

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Департамент жилищно-коммунального хозяйства Белгородской области  
Совет молодых ученых и специалистов Белгородской области  
при Губернаторе Белгородской области  
Филиал ПАО «МРСК-Центр» – «Белгородэнерго»  
Белгородский институт альтернативной энергетики  
Донбасский государственный технический университет, (Алчевск)  
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (г. Макеевка)

**II Международная  
научно-техническая  
конференция**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ  
СИСТЕМЫ**

**Сборник трудов**

(г. Белгород 23–24 ноября 2017 г.)

**Белгород 2017**

УДК 620.9(082)

ББК 3

Э 65

Э65      **Энергетические** системы: сб. трудов II Междунар. науч.-техн. конф. БГТУ им В.Г. Шухова; отв. редактор П.А. Трубаев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. – 565 с.

ISBN 978-5-361-00545-1

В сборнике представлены работы, освещающие современное состояние теоретических и экспериментальных исследований по следующим направлениям:

- теплоэнергетика и теплотехника;
- электроэнергетика и электротехника;
- энергетическое машиностроение;
- системы энергоснабжения;
- энергосбережение и энергоэффективность;
- альтернативные и возобновляемые источники энергии;
- экология энергетики;
- отопление и строительная теплофизика;
- Энергетика, энерго и ресурсосбережение в технологиях.

Сборник предназначен для широкого круга научных и инженерных работников, а также аспирантов, магистрантов и студентов высших учебных заведений.

Издание публикуется в авторской редакции.

Конференция организована при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 17-08-20566).

УДК 620.9(082)

ББК 3

ISBN 978-5-361-00545-1

© Белгородский государственный  
технологический университет  
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### 1. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

<b>Амосов Н.Т., Владимиров Я.А.</b> Определение предельных параметров зоны эффективного теплоснабжения ТЭЦ .....	10
<b>Видлер А.В., Выборнов Д.В.</b> Повышение эффективности работы блочной котельной .....	17
<b>Долгов Н.В., Удовиченко З.В., Мукоед В.Е.</b> Исследование режима работы теплообменного аппарата змеевикового типа.....	22
<b>Захаров В.И., Головач Ю.А.</b> Анализ влияния диаметров и толщин стенок трубопроводов на вероятность безотказной работы газовых сетей.....	28
<b>Захаров В.И., Парамонов А.С.</b> Определение давлений перед отверстиями повреждения газопроводов и величин утечек газа.....	35
<b>Карнаух В.В., Бирюков А.Б., Шмелёва В.В.</b> Теоретические исследования применения природных холодильных агентов на примере диоксида углерода в высокотемпературных тепловых насосах .....	39
<b>Ключников О.Р., Астраханов М.В.</b> Исследование лучистых составляющих теплопотерь материалов и покрытий .....	47
<b>Колосова Н.В., Монах С.И.</b> Влияние толщины отложений на змеевике метантенка на интенсивность теплоотдачи к сбраживаемой биомассе .....	50
<b>Кузнецов В.А., Трубаев П.А.</b> Возможности и проблемы математического моделирования теплотехнологических процессов .....	54
<b>Лукьянов А.В., Качан В.Н.</b> Математическая модель конструктивно-поверочного расчета конвективных элементов котлов ВК-21 .....	62
<b>Назмеев Э.Р., Гусячкин А.М.</b> Разработка и исследование регуляторов давления газа.....	69
<b>Орлов С.М., Лукьянов А.В.</b> Циклон, как спиральная структура .....	74
<b>Сергеев В.В., Амосов Н.Т., Аникина И.Д.</b> Анализ эффективности генерации тепловой и электрической энергии ТЭЦ при использовании тепловых насосов большой мощности .....	80
<b>Степанов С.Ф., Коваленко В.В., Коваленко П.В.</b> Повышение электрического КПД многоконтурной теплосиловой установки.....	85
<b>Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Салтанаева Е.А.</b> Сжигание метано-водородной фракции в котлах с вихревыми горелками .....	92
<b>Ткаченко А.Е., Гавриленко Б.В., Неежмаков С.В.</b> Методика повышения эффективности работы группы котлоагрегатов низкотемпературного кипящего слоя .....	100

<b>Туманов А.Ю., Гуменюк В.И., Туманова М.М.</b> Методика оценки и прогнозирования ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера на плавучих атомных теплоэлектростанциях.....	107
<b>Феоктистов А.Ю., Феоктистов Ю.А.</b> Прогнозирование параметров влажного воздуха в процессах, определяемых угловым коэффициентом луча процесса.....	118
<b>Хафизова А.Ш., Гусячин А.М.</b> Стабилизация гидравлического режима тепловых сетей малых теплогенерирующих предприятий .....	125
<b>2. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА</b>	
<b>Абдулвахаб Мохаммед Валид.</b> Влияние несинусоидальности напряжения на потери электроэнергии в распределительных сетях Ирака ...	129
<b>Андраниан Д.П., Бадалян Н.П.</b> К вопросу об оптимизации параметров динамических систем .....	134
<b>Андраниан Д.П., Бадалян Н.П.</b> Моделирование провисания провода ЛЭП с учетом воздействия климатических факторов .....	138
<b>Артиухов И.И., Бочкирев Д.А.</b> Управление потоками энергии в локальной системе электроснабжения на основе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала .....	143
<b>Артиухов И.И., Краснова Н.Д., Русаяева М.Ю.</b> Система электроснабжения промышленного предприятия с промежуточным звеном постоянного тока .....	150
<b>Бурянина Н.С., Королюк Ю.Ф., Лесных Е.В.</b> Исключение аperiодических составляющих в цифровых защитах.....	155
<b>Бурянина Н.С., Рожина М.А.</b> Электроснабжение «малых потребителей» от высоковольтных линий электропередачи .....	162
<b>Воскресенская С.Н., Бекиров Э.А., Насибов Г.Ф.</b> Исследование работы однофазного инвертора при изменении комплексных сопротивлений фильтров .....	166
<b>Гриценко С. В.</b> Использование автоматизированной системы технического учета электроэнергии для расчета параметров автоматической конденсаторной установки .....	173
<b>Дадабаев Ш.Т.</b> Исследование пусковых переходных процессов высоковольтного синхронного электропривода с учетом нагрева и жаркого климата .....	179
<b>Дмитриева О.С., Мадышев И.Н.</b> Анализ работы трансформатора с применением термоэлектрических преобразователей .....	185

<b>Жиленков А.А., Балобанов Р.Н.</b> Анализ дистанционных методов диагностики изоляторов ЛЭП и ОРУ .....	189
<b>Жилин Е.В.</b> Оптимизация коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию питающего напряжения в системах электроснабжения ИЖС.....	195
<b>Зацаринная Ю.Н., Губаева О.Г., Рахмаев Р.Н.</b> Исследование феррорезонансных явлений в сетях 110-500 КВ.....	201
<b>Зацаринная Ю.Н., Крайкова А.И.</b> Потери мощности на корону на высоковольтных линиях и способы их снижения.....	206
<b>Петухов С.В., Кришьянис М.В.</b> Расчёт электрического поля блока измерительных обмоток трансформатора тока ТГФ-500 КВ .....	210
<b>Рыбачёнок М.А., Хохлов Ю.И.</b> Исследование влияния фазности выпрямительных агрегатов на качественные показатели электрической энергии преобразовательной подстанции электролиза цинка .....	214
<b>Свинцов Г.П., Зайцев Ю.М., Руссова Н.В., Михайлов А.В., Никитина О.А., Петров В.Н., Сазанов Д.С.</b> Проектный расчет форсированного электромагнита постоянного напряжения с последовательно соединенными обмотками.....	219
<b>Хазиева Р.Т., Бочкирева Т.А.</b> Анализ электромагнитной совместимости индуктивно-емкостного преобразователя с системой электроснабжения.....	225
<b>Хворостенко С.В.</b> Особенности определения критериев подобия для частотного электропривода .....	229
<b>Чигвинцев С.В., Ишмухamedов И.К.</b> Витковые замыкания обмотки фазы статора высоковольтного электродвигателя.....	234
<b>Юдин А. А.</b> Исследование алгоритма оптимизации электроэнергетических режимов по напряжению и реактивной мощности с использованием метода штрафных функций .....	238
<b>Яблоков А.А., Меркулов А.Ю.</b> Цифровая обработка сигналов в микропроцессорных УРЗА .....	244

### **3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

<b>Аксенов П.Л., Егоров М.Ю.</b> Анализ методов интенсификации теплообмена в ядерных энергоустановках .....	251
<b>Аксенов П.Л., Егоров М.Ю.</b> Совершенствование конструкции парогенератора АЭС с использованием кольцевых накаток-турбулизаторов .....	258
<b>Губайдуллин Р.Р.</b> Применение аддитивных технологий для исследования влияния формы каналов головки блока цилиндров на их пропускную способность .....	265

<b>Губайдуллин Р.Р.</b> Применение продувочного стенда для исследования влияния формы каналов головки блока цилиндров на их пропускную способность.....	269
<b>Егоров М.Ю.</b> Анализ испарения капель влаги в перегревателе СПП-220 М АЭС с ВВЭР .....	274
<b>Касаткин И.И., Егоров М.Ю.</b> Анализ гидравлических потерь в сепараторе-пароперегревателе типа СПП-500 турбин АЭС змеевикового типа .....	281

#### **4. СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ**

<b>Бурман Д.Г.</b> Направления модернизации и повышения энергетической эффективности системы водоснабжения горно-обогатительного комбината.....	287
<b>Темников Д.О., Суслов Д.Ю.</b> Алгоритмы минимального оставного дерева в системах газоснабжения .....	296
<b>Третьяков Н.В.</b> Повышение эффективности систем пневмоснабжения сталеплавильного производства.....	301
<b>Худяков П.Ю., Кисельников А.Ю., Бурков А.В.</b> Особенности утилизации вторичных энергоресурсов металлургического предприятия при помощи паровинтовых машин .....	309

#### **5. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ**

<b>Гашо Е.Г.</b> Общие приоритеты создания межотраслевого «горизонтального» справочника по наилучшим доступным технологиям повышения энергоэффективности в Российской экономике .....	314
<b>Губарев А.В., Головков М.А., Дьячук Д.С., Бычихин С.А.</b> Способы и аппараты утилизации теплоты отработавших газов стационарных двигателей внутреннего сгорания .....	322
<b>Мехонцев М.В.</b> Исследование влияния способов управления электрическим режимом работы электролизных серий цинка на энергетические показатели преобразовательной подстанции .....	327
<b>Найман Мих.О., Найман С.М., Найман М.О.</b> Возможности энергосбережения в жилищном хозяйстве .....	332
<b>Орлов С.М., Романенко Б.Р.</b> Влияние на энергоэффективность электрических процессов в циклонах при очистке газов от пыли .....	337
<b>Рамазанов Р.С., Суслов Д.Ю., Швыдкая М.А.</b> К вопросу сжигания биогаза в вихревых горелках .....	343

<b>Трубаев П.А., Буланин А.В., Ширриме К.Ж., Кошлич Ю.А.</b>	
Особенности исполнения программного компонента по управлению энергетическими ресурсами Белгородской области.....	350
<b>6. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ</b>	
<b>Елакина А.В., Выборнов Д.В.</b> Анализ тепловых схем аккумулирования теплоты.....	357
<b>Васильев П.Ф., Корякина М.Л.</b> Применение термоэлектрических генераторов в условиях Крайнего Севера .....	363
<b>Корнилова Н.В., Трубаев П.А.</b> Анализ температуры горения ТБО в водогрейном котле малой мощности.....	368
<b>Муровский С.П., Купленный В.О.</b> Электрохимические генераторы в системах децентрализованного электроснабжения различных объектов.....	374
<b>Муровский С.П., Кушнаренко Д.С., Купленный В.О.</b> Внедрение перспективных технологий для автономного электроснабжения удаленных населенных пунктов.....	379
<b>Суслов Д.Ю.</b> Применение биометана для газоснабжения населенных пунктов .....	385
<b>Шамсиева Г.Ш., Найман С.М., Найман Мих.О., Найман М.О.</b> Отходы населения и их распределение по городской территории.....	390
<b>7. ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ</b>	
<b>Амосов Н.Т., Сабурова Д.А.</b> Анализ влияния переработки твердых бытовых отходов на состояние окружающей среды в Санкт-Петербурге.....	395
<b>Выборнов Д.В., Кляус Б.В.</b> Повышение экологической эффективности теплогенерирующих установок путем глубокой утилизации теплоты дымовых газов .....	402
<b>Грунюшкина В.В., Кузнецова Г.М., Ягафарова Г.Г., Насырова Л.А.</b> Обезвоживание осадка, образующегося при производстве биогаза .....	409
<b>Ильина Т.Н., Исаева В.В.</b> Экономическая целесообразность очистки вентиляционных выбросов в подземных парковках.....	413
<b>Кожухова Н.И., Лебедев М.С., Василенко М.И., Gonчарова Е.Н.</b> Воздействие зол-уноса тепловых электростанций на окружающую среду ....	418
<b>Найман Мих.О., Найман С.М., Найман М.О.</b> Определение количества шлама на ТЭЦ.....	424
<b>Новиков В.Ф., Имелбаева Э.В.</b> Проблема очистки сточных вод предприятия от ионов тяжелых металлов .....	429

<b>Новиков В.Ф., Муртазина Г.Р.</b> Влияние температуры на сорбционные свойства пористых материалов .....	433
<b>Трубаев П.А., Веревкин О.В., Гришко Б.М., Тарасюк П.Н., Щекин И.И., Суслов Д.Ю., Рамазанов Р.С.</b> Исследование выхода свалочного газа с тела полигона ТБО .....	436

## **8. ОТОПЛЕНИЕ И СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА**

<b>Бухмиров В.В., Пророкова М.В.</b> Об оценке эффективности энергосберегающих мероприятий для общественных зданий.....	444
<b>Выборнов Д.В., Плужник А.В.</b> Повышение энергосберегающих характеристик зданий коммунально-бытовой сферы на основе комплексного мониторинга .....	448
<b>Зацаринная Ю.Н., Староверова Н.А., Шубина С.К.</b> Разработка виртуального лабораторного стенда системы горячего водоснабжения .....	454
<b>Косухин М.М., Косухин А.М., Богачева М.А., Комарова К.С.</b> Повышение энергоэффективности гражданских зданий путем использования навесных фасадных систем скрепленного типа .....	461
<b>Шацков А.О., Монах С.И.</b> Математическая модель теплообмена излучением при лучистом отоплении.....	471
<b>Яворовский Ю.В., Лихаева А.Ю.</b> Анализ различных вариантов автономного теплоснабжения жилого дома.....	478

## **9. ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ**

<b>Губарева В. В.</b> Снижение энергозатрат при производстве строительных материалов .....	486
<b>Загороднюк Л.Х., Корякина А.А., Севостьянова К.И., Хахелева А.А.</b> Теплоизоляционные композиционные смеси с техногенными материалами .....	490
<b>Коновалов В.М., Кулаков А.А., Литовченко А.В., Гончаров А.А.</b> Повышение эффективности рекуперации тепла в клинкерном холодильнике .....	496
<b>Меркер Э.Э., Степанов В.А., Крахт Л.Н.</b> Разработка метода локально распределенного дожигания горючих газов в дуговой печи при электроплавке железорудного металлизованного сырья .....	503
<b>Меркер Э.Э., Черменев Е.А., Малахова О.И., Степанов В.А.</b> Повышение энергоэффективности электроплавки металлизированного сырья в дуговой печи .....	511

<b>Салахов Р.Р., Березин В.В., Хисматуллин Р.М.</b> Разработка экспериментального стенда и модернизация системы охлаждения двигателя КАМАЗ .....	517
<b>Севостьянов В.С., Горягин П.Ю., Севостьянов М.В., Ермилов Р.А.</b> Конструктивно-технологические особенности агрегатов для измельчения полимерных материалов .....	523
<b>Севостьянов В.С., Ермилов Р.А., Горягин П.Ю., Оболонский В.В.</b> Ресурсосберегающий технологический комплекс для переработки полимерных отходов .....	527
<b>Севостьянов М.В., Севостьянов В.С., Мартаков И.Г.</b> Анализ конструкционных особенностей смесителей циркуляционного действия .....	533
<b>Севостьянов В.С., Шаталов А.В., Севостьянов М.В., Крутов В.С., Шаталов В.А.</b> Техника и технология переработки базальтовых отходов .....	538
<b>Севостьянов В.С., Шинкарев Л.И., Белых М.М.</b> Исследование и разработка технических средств для очистки жидких масел .....	542
<b>Сиваченко Л.А., Севостьянов В.С., Ильина Т.Н.</b> Проблемные задачи в области ресурсо- и энергосберегающих технологий.....	548
<b>Стронин А.А., Барбанягэр В.Д.</b> Сравнение эффективности использования разных типов плотной шаровой загрузки при измельчении портландцементного клинкера .....	554
<b>Тригорлы С.В., Захаров В.В.</b> Математическая модель СВЧ рабочей камеры для высокотемпературной обработки керамики .....	559

# **1. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА**

---

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ЭФФЕКТИВНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ТЭЦ**

канд. техн. наук, проф. Амосов Н.Т.

зам. зав. НИЛ «Промышленная теплоэнергетика» Владимиров Я.А.

*Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

**Аннотация.** Рассмотрены предпосылки необходимости определения зоны эффективного теплоснабжения. Рассматриваются алгоритмы расчета зоны эффективного теплоснабжения источника комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. Выполнен обзор существующих методик расчета предельных параметров зоны эффективного теплоснабжения ТЭЦ. Разработан алгоритм расчета параметров зоны эффективного теплоснабжения потребителя от источника комбинированной выработки тепловой и электрической энергии

**Актуальность.** Вопрос об определении зоны эффективного теплоснабжения возникает не только при определении источника теплоснабжения для нового потребителя и точки его подключения к тепловым сетям, но и при оптимизации систем теплоснабжения населенных пунктов, имеющих несколько источников тепла, в том числе и с комбинированной выработкой [1].

Сравнение показателей эффективности теплоснабжения на стадии выбора варианта источника теплоснабжения позволяет исключить малоэффективные предложения инвестиционных проектов. Для сравнения вариантов должен использоваться единый сравнительный показатель (единий критерий энергоэффективности теплоснабжения потребителя от различных источников теплоснабжения). Для оценки энергетической эффективности централизованного теплоснабжения от различных теплоисточников находится граница эффективности данного вида теплоснабжения. Граница эффективности зоны теплоснабжения определяется из условия конкурентности экономических показателей централизованного и децентрализованного способов теплоснабжения [2].

Таким образом, вопрос разработки методики определения зоны эффективного теплоснабжения является актуальным. [3].

## Цель работы

1. Анализ существующих методик расчета зон эффективного теплоснабжения.

2. Разработка алгоритма расчета параметров зоны эффективного теплоснабжения от источника комбинированной выработки тепловой и электрической энергии

Попытки определения аналитического эффективной зоны теплоснабжения источника предпринимались с 30-х годов. В 1938 г. Е.Я. Соколов сформулировал критерий для нахождения оптимальной радиуса теплоснабжения ТЭЦ. Оптимальный радиус теплоснабжения предлагалось определять из условия минимума выражения для «удельных стоимостей сооружения тепловых сетей и источника»:

$$S = A + Z \rightarrow \min,$$

где  $A$  – удельная стоимость сооружения тепловой сети, руб./(Гкал/ч);  $Z$  – удельная стоимость сооружения котельной или ТЭЦ, руб./(Гкал/ч).

Также Е.Я. Соколовым были предложены зависимости удельных стоимостей сооружения тепловой сети и котельной:

$$A = \frac{105R^{0.48}B^{0.26}s}{\Pi^{0.62}H^{0.19}\Delta\tau^{0.38}}, \quad Z = \frac{a}{3} + \frac{30 \cdot 10^6 \varphi}{R^2 \cdot \Pi},$$

где  $R$  – радиус действия тепловой сети (длина главной тепловой магистрали самого протяженного вывода от источника), км;  $B$  – среднее число абонентов на 1 км<sup>2</sup>;  $s$  – удельная стоимость материальной характеристики тепловой сети, руб./м<sup>2</sup>;  $\Pi$  – теплоплотность района, (Гкал/ч)/км<sup>2</sup>;  $H$  – потеря напора на трение при транспорте теплоносителя по главной тепловой магистрали, м вод. ст.;  $\Delta\tau$  – расчетный перепад температур теплоносителя в тепловой сети, °С;  $a$  – постоянная часть удельной начальной стоимости ТЭЦ, руб./МВт;  $\varphi$  – поправочный коэффициент, зависящий от постоянной части расходов на сооружение ТЭЦ.

Путем дифференцирования приведенных выше зависимостей по  $R$  и определения экстремальных точек [4] аналитическое выражение для оптимального радиуса теплоснабжения выглядит следующим образом:

$$R_{optm} = (140 / S^{0.4}) \cdot \varphi^{0.4} \cdot (B^{-0.1}) \cdot (\Delta\tau / \Pi)^{0.15}.$$

Основываясь на экономическом аспекте теплоснабжения, Е.Я. Соколовым была предложена следующая зависимость для опре-

деления предельного радиуса действия тепловых сетей от источника централизованного теплоснабжения:

$$R_{nped} = \left[ \frac{(p - C)}{1,2 \cdot K} \right]^{2,5},$$

где  $R_{\text{пред}}$  – предельный радиус действия тепловой сети, км;  $p$  – разница себестоимости тепла, выработанного на ТЭЦ и в индивидуальных котельных абонентов, руб./Гкал;  $C$  – переменная часть удельных эксплуатационных расходов на транспорт тепла, руб./Гкал;  $K$  – постоянная часть удельных эксплуатационных расходов на транспорт тепла при радиусе действия тепловой сети, равном 1 км, руб./(Гкал·км).

Однако, данные эмпирические зависимости характерны для экономической модели СССР 1930-х и не могут быть применены в настоящее время без изменений. Тем не менее, общий принцип построения расчетов – сравнение стоимости тепловой энергии от автономного источника теплоснабжения и источника комбинированной выработки тепловой и электрической энергии – ТЭЦ, используется и в современных расчетах.

В 2014 году была опубликована методика расчета радиуса эффективного теплоснабжения [5]. Данная методика позволяет определять параметры зоны эффективного теплоснабжения для существующих ТЭЦ и котельных. С помощью данного метода решаются три типа задач, связанных с развитием систем централизованного теплоснабжения:

- сравнение фактически сложившегося радиуса теплоснабжения с радиусом эффективного теплоснабжения;
- определение возможности расширения существующей зоны действия источника тепловой энергии в зону перспективного строительства;
- оценка последствий перераспределения тепловой нагрузки между источниками с пересекающимися зонами действия.

В общем случае расчет эффективного радиуса теплоснабжения включает в себя следующие виды задач:

- сбор исходных данных для расчета;
- определение прогнозных тепловых нагрузок территории, для которой происходит расчет;
- определение расстояния от точки подключения к существующей тепловой сети до нового потребителя;

- гидравлический расчет системы теплоснабжения с целью определения характеристик вновь строящихся тепловых сетей, а также выявление необходимости перекладки существующих тепловых сетей с увеличением диаметра;
- составление перспективных балансов производства тепловой энергии, потребления топлива, воды и электроэнергии. Для источников комбинированной выработки тепловой и электрической энергии составляется баланс выработки электроэнергии;
- определение совокупных затрат для различных вариантов теплоснабжения перспективного потребителя;
- сравнение совокупных затрат для разных вариантов.

Расчет проводится методом последовательных приближений. Предложенная методика предполагает, что радиус эффективного теплоснабжения для существующего источника тепловой энергии представляет собой не константу, а зависит от подключаемой нагрузки перспективного потребителя. Более того, для каждой потенциальной точки подключения (тепловой камеры) он разный. Таким образом, результат расчета представляет собой серию зависимостей радиуса эффективного теплоснабжения от подключаемой тепловой нагрузки. Данная методика применима для существующих систем централизованного теплоснабжения.

С учетом [5] авторами был разработан алгоритм расчета параметров зоны эффективного теплоснабжения от вновь строящегося источника комбинированной выработки тепловой и электрической энергии.

Как правило, крупные источники комбинированной выработки тепловой и электрической энергии расположены на удалении от центра тепловых нагрузок и населенных пунктов. Согласно СП 42.133330.2011, тепловые электростанции следует размещать, как правило, за пределами городских территорий. Программа расчета была написана в 2014 году, результаты расчетов были впервые апробированы при разработке схемы теплоснабжения Озерского городского округа с 2014 по 2029 годы, утвержденной постановлением Администрации Озерского городского округа №3637 от 06.11.2014 г.

Суть предложенного алгоритма расчета заключается в следующем: предельное расстояние от источника комбинированной выработки тепловой и электрической энергии определяется путем сравнения себестоимости тепловой энергии от ТЭЦ с учетом транспорта до центра тепловых нагрузок и себестоимости тепловой энергии с коллектора альтернативного источника тепловой энергии

(котельной), расположенного в центре тепловых нагрузок. Расстояние считается предельным, когда себестоимости тепловой энергии равны. Расчет производится методом последовательных приближений, путем итераций с заданным шагом.

Все необходимые для расчета значения приняты на основании действующих ценовых справочников, нормативной документации и методических рекомендаций, утвержденных тарифов на энергоносители.

Расчет параметров зоны эффективного теплоснабжения производится по следующему алгоритму:

1. Задается подключаемая тепловая нагрузка.
2. Расчет технико-экономических параметров альтернативной котельной (установленная мощность, постоянные издержки).
3. Расчет параметров тепломагистрали от проектируемой ТЭЦ (расход теплоносителя, диаметр, тип прокладки).
4. Задается расстояние от ТЭЦ до центра тепловых нагрузок.
5. Гидравлический расчет тепломагистрали.
6. Расчет технико-экономических показателей транспорта тепловой энергии (постоянные и переменные издержки, затраты электроэнергии на привод сетевых насосов, объем подпитки и затраты на химически очищенную воду).
7. Расчет топливной составляющей себестоимости тепловой энергии от ТЭЦ.
8. Расчет топливной составляющей себестоимости тепловой энергии от альтернативной котельной.
9. Расчет постоянных издержек ТЭЦ на отпуск тепловой энергии.
10. Расчет переменных издержек ТЭЦ на отпуск тепловой энергии.
11. Расчет переменных издержек альтернативной котельной.
12. Расчет себестоимости тепловой энергии от ТЭЦ и альтернативной котельной.
13. Сравнение полученных себестоимостей тепловой энергии.
14. Путем изменения значения расстояния между ТЭЦ и центром тепловых нагрузок расчет производится до тех пор, пока себестоимости тепловой энергии не будут равны.
15. Вывод значения предельного расстояния эффективного теплоснабжения.
16. Повторение расчета для другой тепловой нагрузки.

В результате выполнения предложенного алгоритма могут быть получены предельные параметры зоны эффективного теплоснабжения ТЭЦ.

Предложенный алгоритм в [6] апробирован в следующих условиях:

Географическое положение – Челябинская область, доля нагрузки ГВС от общей тепловой нагрузки составляет 28%, установленная тепловая мощность ТЭЦ составляет 500 Гкал/час, ТЭЦ работает на газе и угле, причем доля угля в топливном балансе станции составляет 60%, удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии – 145 кг.у.т/Гкал.

Также в расчете сделано следующее допущение: к источнику теплоснабжения подключена тепловая нагрузка равная его установленной мощности. В приведенном в данной статье варианте подключенная тепловая нагрузка ТЭЦ составляет 500 Гкал/час. То есть при определении, например, предельного расстояния при подключаемой нагрузке 100 Гкал/час, мы подразумеваем, что тепловая нагрузка 450 Гкал/час также подключена к ТЭЦ и степень ее загрузки по тепловой мощности составляет 100%.

Для удобства анализа полученных результатов на рисунке 1 зависимость предельного расстояния от ТЭЦ до центра тепловых нагрузок от подключаемой тепловой нагрузки представлена на рис. 1.

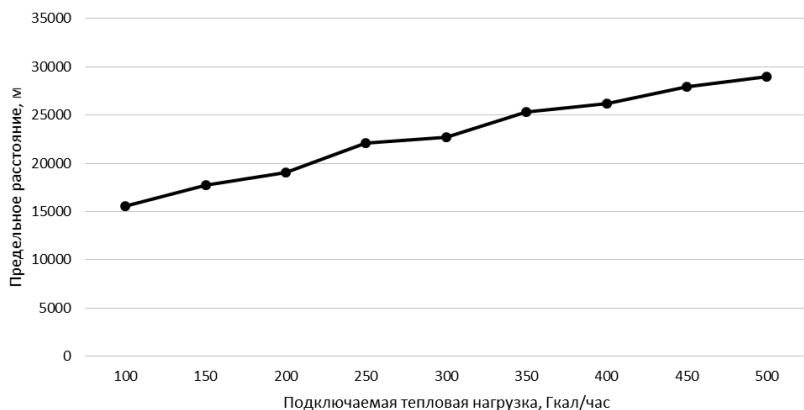


Рис. 1. Зависимость предельного расстояния от ТЭЦ до центра тепловых нагрузок от подключаемой тепловой нагрузки потребителей

Неравномерности в графическом выражении полученной зависимости вызваны дискретностью значений ряда условных проходов трубопроводов, а также различием в удельном расходе условного топлива на выработку тепловой энергии у котлов типа ПТВМ различной мощности, характеристики которых применялись для определения технико-экономических показателей «альтернативной» котельной.

### **Выводы**

1. В настоящее время отсутствует универсальная методика расчета предельных параметров зоны эффективного теплоснабжения источника тепловой энергии.
2. Предложенный авторами алгоритм позволяет определить зависимость предельного расстояния от ТЭЦ до центра тепловых нагрузок от величины подключаемой тепловой нагрузки.
3. Полученные результаты с высокой степенью достоверности укладываются в линейную зависимость.
4. Предельное расстояние от источника тепловой энергии до центра нагрузок возрастает с ростом подключаемой нагрузки.

### **Библиографический список**

1. Методические рекомендации по разработке схем теплоснабжения, утвержденные приказом Минэнерго России и Минрегиона России №565/667 от 29.12.2012.
2. **Плахута А.Д.** Разработка критериев для оценки эффективности централизованного теплоснабжения: Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГТУРП, 2015. 181 с.
3. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 1999. 472 с.
4. **Папушкин В.Н.** Радиус теплоснабжения. Хорошо забытое старое // Новости теплоснабжения. 2010. № 10. С. 44-49.
5. Методика расчета радиуса эффективного теплоснабжения для схем теплоснабжения [Электронный ресурс] / В.Н. Папушкин, С.О. Поляницев, А.П. Щербаков, А.А. Храпков. URL: [http://www.rosteplo.ru/Npb\\_files/npb\\_shablon.php?id=1601](http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1601) (дата обращения: 29.10.2017).
6. **Владимиров Я.А., Амосов Н.Т., Сергеев В.В.** Определение предельного расстояния от проектируемого источника тепловой и электрической энергии до центра тепловых нагрузок // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч.1. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 17-19.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ БЛОЧНОЙ КОТЕЛЬНОЙ

магистрант **Видлер А.В.**

канд. техн. наук **Выборнов Д.В.**

Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры, г. Макеевка

**Аннотация.** Приведен анализ существующих подходов к оценке эффективности работы блочных котельных, методик расчета тепловых потерь при выработке топлива котлоагрегатами малой мощности, рекомендованы мероприятия по снижению теплопотерь путем наладочных мероприятий, а также снижению уноса теплоты с уходящими газами. Приведены рекомендации по оценке теплового потенциала для установки теплоутилизирующего оборудования.

**Введение.** Приоритетным стратегическим направлением любого грамотно развивающегося государства, безусловно, является снижение стоимости на производство энергоресурсов с одной стороны, и повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов – с другой. Значительная доля повышения потенциала энергетической эффективности заключается в термомодернизации теплогенерирующих установок. В городах с большой численностью населения и большой тепловой и электрической нагрузкой обычно присутствует ТЭЦ, на которой эффективность выработки теплоты достигает 45-60%. В небольших и удаленных населенных пунктах автономные, блочные и модульные котельные являются очевидным и единственным экономически целесообразным и объективно выгодным решением в силу того, что практически всегда 100% выработанной тепловой энергии используется для нужд теплоснабжения [1-6].

С другой стороны, имеет место проблема уноса теплоты вместе с продуктами сгорания, что особенно актуально для теплогенерирующих установок малой мощности [7]. Сдвиг приоритетов в сферу теплогенераторов малой мощности стал оправдан и возможен после появления в широком доступе конденсационных котлов малой теплопроизводительности и котлов с достаточно высоким КПД (около 92% для котлов на газообразном топливе). Вследствие этого рассмотрение вопросов повышения тепловой, экономической и экологической эффективности блочных котельных является актуальной задачей на сегодняшний день.

**Целью** статьи является анализ факторов, влияющих на эффективность работы блочных котельных, а также разработка рекомендаций и методик, позволяющих оценить все их важные параметры.

**Содержательная часть.** В настоящее время блочные котельные установки, предлагаемые на рынке целым рядом зарубежных фирм, имеют достаточно высокие теплотехнические характеристики, требуемые санитарно-гигиенические показатели, незначительные трудозатраты на монтаж, сборку и дальнейшую эксплуатацию, что в целом отвечает нормам современного теплогенерирующего оборудования. Обычно в данных блочных котельных предусмотрена установка котлоагрегатов, насосной группы, современных пластинчатых теплообменных аппаратов, узла учета (для газообразного топлива), а также во всех связующих трубопроводов. Данная компоновка позволяет с минимальной привязкой к местности при получении техусловий на существующие коммуникации выполнить подключение уже готового здания котельной контейнерного типа. Эксплуатируются данные котельные, как правило, в автоматическом режиме без постоянно находящегося обслуживающего персонала, что возможно благодаря системам автоматизации. Однако данные о различного рода блочных котельных не систематизированы, отсутствуют оптимизационные параметры для выбора теплогенерирующей установки нужной мощности. Наиболее перспективными, как для покрытия технологической нагрузки, так и для применения в коммунально-бытовом секторе являются блочные водогрейные котельные (рис. 1).

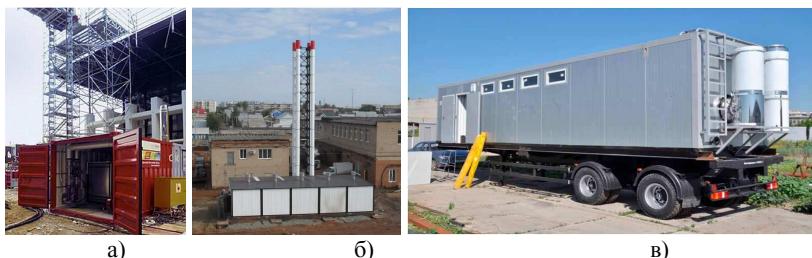


Рис. 1. Блочные котельные:

- а) для покрытия тепловой нагрузки во время строительства; б) для теплоснабжения жилого района; в) транспортабельная блочная котельная

Из вышесказанного следует, что необходим анализ возможности повысить эффективность использования топлива блочных модульных котельных путем внесения в их тепловую схему теплоутилизаторов в хвостовых частях теплогенераторов. При этом необходимо учитывать тепловой баланс котлоагрегата, а также аэродинамическое сопротивление конструкции предлагаемого теплообменного аппарата, т.к. некоторые блочные котельные работают без дымососного оборудования.

К основным потерям теплоты в блочных котельных с теплогенераторами малой мощности относятся потери с уходящими газами,  $q_2$ ; потери от химической неполноты сгорания,  $q_3$ ; потери от механической неполноты сгорания,  $q_4$ ; потери от наружного охлаждения,  $q_5$ ; потери с физическим теплом при шлакозолоудалении,  $q_6$ . При использовании газообразного топлива, как наиболее распространенного в автоматизированных котельных величины  $q_4$  и  $q_6$  отсутствуют, а величина  $q_3$  составляет 0,5...1%. Если принять, что температура уходящих газов,  $t_{yx}$ , не превышает 200°C, энталпия зависит от температуры линейно, а средняя низшая теплота сгорания,  $Q_n$ , составляет порядка 33 МДж/м<sup>3</sup>, то тепловые потери с уходящими газами могут быть определены по формуле [8]

$$q_2 = \frac{20,5 \cdot t_{yx} - \alpha_{yx} \cdot I_{xh}}{Q_n} \cdot (100 - q_4);$$

где  $I_{xh}$  – энталпия подсасываемого холодного воздуха, кДж/(м<sup>3</sup>·°C).

Прирост потерь теплоты как функции от температуры уходящих газов может быть также описан эмпирической зависимостью

$$q_2 = 6,016 - 0,0203 \cdot t_{yx} - 0,000195 \cdot t_{yx}^2.$$

Что касается потерь теплоты от наружного охлаждения, то на основе экспериментальных данных рекомендуется использовать следующую зависимость экспоненциального характера

$$q_5 = 2,45 \cdot e^{-0,11 \cdot Q_{KA}};$$

где  $Q_{KA}$  – тепловая мощность котлоагрегата, МВт.

Данные уравнения позволяют выработать методику по определению эффективной работы котлоагрегатов малой мощности в составе блочных теплогенерирующих установок. Кроме того, при выполнении расчетов должна производиться оценка аэродинамического сопротив-

ления тягодутьевого тракта с учетом запаса давления по самотяге дымовой трубы с целью установки теплоутилизирующего оборудования.

В качестве рекомендаций при эксплуатации данных котельных, кроме максимального использования теплоты за счет дополнительных поверхностей нагрева, можно выделить такие мероприятия, как соблюдение минимального коэффициента избытка воздуха, снижение присосов холодного воздуха, предотвращение зашлакованности экранных радиационных поверхностей нагрева путем отладки топочного режима, предотвращение внутренних отложений в котлоагрегате за счет качественной водоподготовки, конструктивное правильное оформление дополнительных поверхностей теплообмена, обеспечивающее полное омывание их как продуктами сгорания, так и нагреваемым теплоносителем, а также применение для котельных, сжигающих природный газ, вакуумных деаэраторов, что позволяет обеспечить более глубокое охлаждение уходящих газов.

Кроме того, необходимо следить за соблюдением мероприятий по снижению потерь теплоты за счет оптимального ведения топочного режима и потерь теплоты в окружающую среду, к которым относятся следующие: обеспечение достаточного количества воздуха для горения и полное перемешивание его с топливом, поддержание оптимального теплового напряжения в топке и расчетной температуры в топке, забор воздуха не горение из наиболее горячих зон котельного зала, обеспечение достаточно эффективной теплоизоляции всех элементов теплогенератора, использовать частично тепловыделения от оборудования путем забора теплого воздуха из верхней зоны котельного зала дутьевым вентилятором, а также не допускать снижение разрежения в верхней части топки меньше 10-20 Па [9, 10] с целью предотвращения выбивания пламени через неплотности топочной гарнитуры.

**Выводы.** Наиболее эффективным оборудованием для котлоагрегатов мощностью свыше 1,5 МВт с учетом всех изложенных выше требований являются теплоутилизаторы контактного типа [8]. Данные конструкции оправданы с экономической и экологической точки зрения. Конструкция данной поверхности нагрева, как правило, представляет собой калориферную поверхность на основе биметаллических труб в силу их большей стойкости к коррозии. Сами поверхности представляют собой обычно змеевики либо же регистры. Для более точного проектирования и расчета данного теплоутилизирующего оборудования необходимо уточнение математической модели процес-

сов, протекающих при теплообмене между продуктами сгорания, стенкой теплообменного аппарата и нагреваемым теплоносителем.

### **Библиографический список**

1. **Башмаков И. А.** Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения в России и за рубежом // Новости теплоснабжения. 2008. №. 2. С. 6-10.
2. **Некрасов А. С., Синяк Ю. В.** Развитие энергетического комплекса России в долгосрочной перспективе // Проблемы прогнозирования. 2004. №. 4. С. 35-61.
3. **Заддэ В. В.** ВИЭ, мини-ТЭЦ и будущее энергетики России // Энергия: экономика, техника, экология. 2005. №. 9. С. 42-49.
4. **Мелькумов В.Н., Турбин В.С., Сорокин Р.В.** Разработка оптимизационных параметров котлов малой теплопроизводительности систем децентрализованного теплоснабжения / Известия ТулГУ. Сер. Строительство, архитектура и реставрация. Вып.7. Тула: Изд-во ТулГУ , 2004. С. 181-185.
5. Энергосбережение в системах традиционного и альтернативного теплоснабжения / Мелькумов В.Н., Сотникова О.А., Турбин В.С., Китаев Д.Н., Сорокин Р.В. // Энергосбережение в системах традиционного и альтернативного теплоснабжения / АВОК. №2.2004. с.62-67.
6. **Горожанкин С.А., Выборнов Д. В., Монах С.И.** Техническая и ресурсная составляющая процесса энергоресурсосбережения в Украине // Вестник донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Макеевка. 2012. С. 3-8.
7. **Долинский А. А., Басок Б. И., Коломейко Д. А.** Эффективность когенерационных тепловых схем // Научные труды. Техносфера безопасность К.: ИТПР. 2008. Т. 61. №. 4в. С. 30-38.
8. Сорокин Р.В. Тепловая и экономическая эффективности модульных котельных систем децентрализованного теплоснабжения: автореф. канд. техн. наук:05.23.03 / Сорокин, Роман Викторович. Воронеж, 2004. 20 с.
9. **Wulfinghoff D.R.** Energy efficiency manual. Maryland: Energy Institute Press, 1999. Т. 3936.
10. **Durkin T.H.** Boiler system efficiency // ASHRAE Journal. 2006. Т. 48. №. 7. С. 51.

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ЗМЕЕВИКОВОГО ТИПА

канд. техн. наук, доц. **Долгов Н.В.**

канд. техн. наук, доц. **Удовиченко З.В.**

магистрант **Мукоед В.Е.**

*Донбасская национальная академия строительства  
и архитектуры, г. Макеевка*

**Аннотация.** В статье рассматривается совместная работа системы отопления и горячего водоснабжения в индивидуальном тепловом пункте на базе многоконтурного теплообменного аппарата. Определены основные факторы, влияющие на работу индивидуального теплового пункта. Проведены экспериментальные исследования работы лабораторной установки, получены уравнения регрессии расхода теплоносителя в контуре системы отопления.

Независимое подключение местных систем отопления не является новшеством и достаточно исследовано, такие системы подключаются, в основном, с помощью пластинчатых теплообменных аппаратов, устанавливаемых в индивидуальном тепловом пункте (ИТП). Аналогичным образом подключаются системы горячего водоснабжения жилых зданий [1-4]. Таким образом системы отопления и горячего водоснабжения, установленные в одном индивидуальном тепловом пункте, не оказывают влияния друг на друга. Авторами рассматривается индивидуальный тепловой пункт на базе многоконтурного теплообменного аппарата (МТА). В рассматриваемом МТА совместно работают контуры отопления и горячего водоснабжения. Тепловая нагрузка на данные виды потребителей практически одинакова, но в часы максимального водопотребления в теплообменном аппарате возрастает перепад температур между нагреваемым и греющим теплоносителем.

Целью работы является экспериментальное исследование работы контура отопления, а именно, как на нем будет отражаться возрастающий перепад температур теплоносителей в часы максимального водопотребления.

Рассматриваемая экспериментально-лабораторная установка представлена тремя основными контурами: один греющий (контур тепловой сети), и два нагреваемых (контур отопления и горячего водоснабжения). Схема циркуляционных колец представлена на рис. 1 [5].

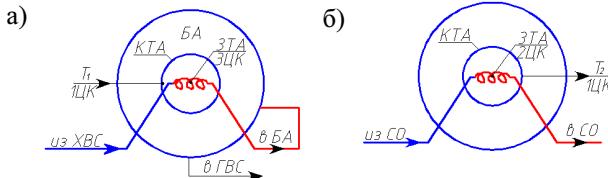


Рис. 1 Схема циркуляционных контуров:

а) контур горячего водоснабжения; б) контур системы отопления;  
 СО – теплоноситель системы отопления; BA- бак-аккумулятор; ГВС - система горячего водоснабжения; ЗТА – змеевиковый теплообменный аппарат;  
 КТА – корпус теплообменного аппарата; ХВС – холодное водоснабжение;  
 1ЦК – первый циркуляционный контур; 2ЦК – второе циркуляционное кольцо контура отопления; 3ЦК – третье циркуляционное кольцо контура ГВС;  
 Т1 – греющий теплоноситель из емкостного котла; Т2 – обратный теплоноситель в емкостной котел

Перед началом эксперимента и в конце его проведения фиксируются следующие параметры:

- температура наружного воздуха;
- температура воздуха внутри помещения;
- давление воды во всех подающих и обратных магистралях;
- температуры воды во всех магистралях;
- расходы теплоносителей во всех магистралях.

Испытания проводятся при установленном температурном и гидравлическом режиме в индивидуальном тепловом пункте с многоконтурным теплообменным аппаратом. Интервал снятия показаний с измерительных приборов составляет 25-30 мин. Испытания проводятся для температурного графика с температурами наружного воздуха +8, +5, 0, -5, -10, -15, -20°C. Для каждой из этих температур варьируются параметры теплового и гидравлического режима работы ИТП с МТА.

Для снятия экспериментальных данных использовались следующие измерительные приборы:

- биметаллические термометры ТБ – 150 класс точности 2,5;
- водосчетчики КВ – 1,5 класс точности 2;
- радиальные манометры Watts F+R200 50/6 1/4".

Перед разработкой плана эксперимента на основе априорной информации были определены уровни варьирования факторов, влияющих на расход теплоносителя системы отопления  $G_{CO}$  (табл. 1).

Таблица 1

Уровни варьирования факторов,  
влияющих на расход теплоносителя для тепловой сети  $G_{CO}$

Фактор	Нижний уровень фактора	Верхний уровень фактора
Расход теплоносителя в контуре теплоснабжения $G_{TC}$ , $m^3/c$	0,104	0,121
Разница давления в контуре тепловой сети $\Delta P_{TC}$ , кПа	19,81	32,3
Разница давления в контуре системы отопления $\Delta P_{CO}$ , кПа	0,33	0,52
Температура теплоносителя системы отопления на выходе из теплообменного аппарата $t_{CO}$ , $^{\circ}C$	55,5	69,5
Температура наружного воздуха $t_h$ , $^{\circ}C$	-20	+8

При построении математической модели осуществлен переход от действительного значения факторов к кодированному (стандартизированному) по формуле 1 [6], результаты сведены в табл. 2.

$$x_i = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j}, \quad (1)$$

где  $x_i$  – нормированное значение фактора;  $x_j$  – натуральное значение фактора;  $x_{j0}$  – основной уровень фактора;  $\Delta x_j$  – интервал варьирования фактора.

Таблица 2

Уровни варьирования факторов эксперимента регрессионного анализа

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной (нулевой)	Верхний +1	
$x_1$ – Расход теплоносителя в контуре теплоснабжения $G_{TC}$ , $m^3/c$	0,104	0,1125	0,121	0,0085
$x_2$ – Разница давления в контуре тепловой сети $\Delta P_{TC}$ , кПа	19,81	26,055	32,3	6,245
$x_3$ – Разница давления в контуре системы отопления $\Delta P_{CO}$ , кПа	0,33	0,425	0,52	0,095
$x_4$ – Температура теплоносителя системы отопления на выходе из теплообменного аппарата $t_{CO}$ , $^{\circ}C$	55,5	62,5	69,5	7
$x_5$ – Температура наружного воздуха $t_h$ , $^{\circ}C$	-20	-5	+10	15

Предположим, что эффекты взаимодействия факторов в исследуемом объекте маловероятны и пренебрежимо малы, поэтому будем

пользоваться  $\frac{1}{4}$  репликой полного факторного эксперимента и проведем дробный факторный эксперимент типа  $2^{5-2}$ . Применив процедуру смещивания, составим матрицу плана дробного факторного эксперимента, которая представлена в табл. 3.

Таблица 3  
Матрица планирования эксперимента  $G_{CO}$

№	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	1	2	Среднее	Модель	Построчная
	X <sub>0</sub>	1	2	X3	X <sub>1</sub> ·X <sub>2</sub> → X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> → X <sub>5</sub>	G <sub>от</sub>	G <sub>от</sub>	$\bar{Y}_{cp}$	Y <sub>mod</sub> , G <sub>от</sub>	Дисперсия $S_j^2$
1	1	1	1	1	1	1	0,027	0,027	0,027	0,02738	0
2	1	-1	1	1	-1	-1	0,024	0,025	0,0245	0,024998	0,0000005
3	1	1	1	1	-1	-1	0,024	0,024	0,024	0,023498	0
4	1	-1	1	1	1	1	0,024	0,023	0,0235	0,023128	0,0000005
5	1	1	1	-1	1	-1	0,018	0,018	0,018	0,017628	0
6	1	-1	1	-1	-1	1	0,02	0,02	0,02	0,019498	0
7	1	1	1	1	-1	1	0,017	0,018	0,0175	0,017998	0,0000005
8	1	1	1	1	1	-1	0,013	0,013	0,013	0,013376	0

Проверяем гипотезу о воспроизводимости опытов, получим: сумма построчных выборочных дисперсий составит  $\sum_{j=1}^N S_j^2 = 15 \cdot 10^{-6}$ , расчетное значение критерия  $G_p = 0,3333333$ . По таблице распределения Кохрена при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  критическое значение критерия Кохрена составит  $G_{kp} = 0,6798$ . Таким образом,  $G_p < G_{kp}$ , следовательно, гипотеза об однородности дисперсий принимается [7].

Уравнение математической модели будем строить без учета парных взаимодействий

$$Y_{(x_1, \dots, x_5)} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i. \quad (2)$$

Проверим коэффициенты уравнения регрессии по формулам (3) (3)

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_i;$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_{ij} y_i,$$

где  $y_i$  – значение параметра оптимизации в  $i$ -том опыте;  $N$  – число опытов в матрице;  $i, j$  – индексы при обозначении переменных.

Результаты расчетов сводим в табл. 3.

Таблица 3  
Численные значения коэффициентов регрессии для  $G_{CO}$

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{123}$
0,020938	0,000688	0,001438	0,003813	-0,00056	0,001063

Проверим значимость коэффициентов регрессии. Значение доверительного интервала для коэффициентов регрессии при уровне значимости  $\alpha=0,05$  составит  $\Delta b_j=0,00024948$ .

$$\hat{y}_{\text{mod}, G_{CO}} = 0,020938 + 0,000688x_1 + 0,001438x_2 + \\ + 0,003813x_3 - 0,00056x_1x_2 + 0,001063x_1x_2x_3 \quad (4)$$

Результаты расчетов выходных параметров по уравнению полученной модели представлены в табл. 3.

Адекватность полученного по экспериментальным данным уравнения регрессии проверяем с помощью критерия Фишера. Так как  $F_{\text{эксп}} < F_{\text{крит}}$ , то гипотезу об адекватности полученной модели необходимо принять.

Для записи математической модели в реальных физических величинах произведем обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному, получив, таким образом, окончательный вид модели

$$\hat{y}_{\text{mod}, G_{CO}} = -4,440 + 2,352 \cdot G_{TC} + 0,170 \cdot \Delta P_{TC} + 0,658 \cdot \Delta P_{CO} \\ - 5,492 \cdot \Delta P_{CO} \cdot G_{TC} - 0,0237 \cdot \Delta P_{CO} \cdot \Delta P_{TC} - \\ - 0,0897 \cdot G_{TC} \cdot \Delta P_{TC} \cdot \Delta P_{CO} \times G_{TC} \cdot \Delta P_{TC}. \quad (5)$$

Адекватность полученной модели подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований (рис. 2).

Вывод. По результатам проведенных экспериментальных исследований режимов совместной работы систем отопления и горячего водоснабжения в ИТП на базе МТА выявлено, что повышение эффективности работы контура системы отопления наблюдается при использовании бака-аккумулятора для компенсации перепадов температур теплоносителей, возникающих в часы максимального водоразбора.

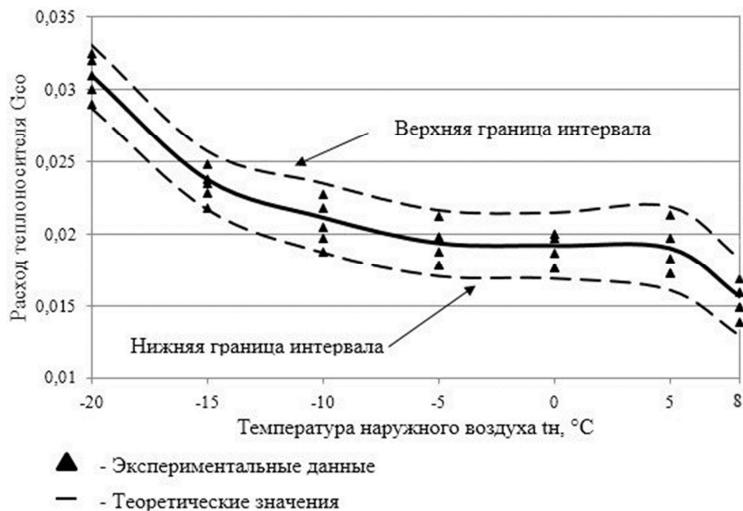


Рис. 2 Доверительный интервал расхода теплоносителя для контура системы отопления в зависимости от изменений температуры наружного воздуха

### Библиографический список

1. Козлов В.В., Палевин В.Ф., Перспективы развития систем теплоснабжения коммунального хозяйства // Сервис в России и за рубежом. 2013. № 1. С.110–122.
2. СП 41-101-95. Проектирование тепловых пунктов. М.: ОАО «ЦПП», 1995. 83 с.
3. Бобух А.А., Ковалев Д.А., Повышение энергосбережения закрытого централизованного теплоснабжения города при реконструкции центрального и модернизации индивидуального тепловых пунктов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 13 (121). С. 12-18.
4. Малая Э.М., Спирин А.В. Оптимизация температурных и гидравлических параметров тепловых сетей // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 3 (23). С. 24–33.
5. Долгов Н.В. Многоконтурный теплообменный аппарат для независимой схемы индивидуального теплового пункта: Автотезф. дис. канд. техн. наук. Макеевка: ДонНАСА, 2017. 22 с.
6. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.
7. Шашков В.Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: учебное пособие. Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. 363 с.

# **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИАМЕТРОВ И ТОЛЩИН СТЕНОК ТРУБОПРОВОДОВ НА ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ГАЗОВЫХ СЕТЕЙ**

канд. техн. наук, доц. **Захаров В.И.**

ассистент **Головач Ю.А.**

Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры, г. Макеевка

**Аннотация.** Проанализировано влияние диаметра и толщины стенки газопровода на значение параметра потока отказов. Выполнен расчет вероятности безотказной работы кольцевой сети высокого давления при параметре потока отказов, зависящем от диаметра и параметре потока отказов, зависящем от средней комплексной величины  $\chi$ , учитывающей толщину стенки газопровода.

В современных условиях развития газотранспортной промышленности Украины одной из важных задач становится рациональное использование природного газа, что невозможно без создания системы газоснабжения, отвечающей необходимым требованиям надежности.

Для принятия обоснованных решений касательно резервирования участков сети, планирования рабочего времени и расхода необходимых технических материалов необходимо иметь как можно более точную картину текущего состояния аварийности газовых сетей и достоверную оценку их показателей надежности, что в свою очередь невозможно без систематизации и обработки информации о повреждаемости распределительных газопроводов.

Одним из основных показателей надежности систем газоснабжения является вероятность безотказной работы и параметр потока отказов. Анализ статистического материала в работе [1] показал, что параметр потока отказов зависит от диаметра газопровода. Работа [2] позволила предположить, что на параметр потока отказов оказывает влияние не только диаметр участка, но и толщина стенки газопровода.

Целью данной статьи является проанализировать влияние диаметров участков газопроводов, а также толщин их стенок, на значение параметра потока отказов и вероятность безотказной работы системы на примере сети распределительных газопроводов высокого давления I категории г. Макеевки.

Для выявления зависимости удельного параметра потока отказов от наружных диаметров участков  $D_h$ , мм, а также толщин стенок газо-

проводов  $\delta$ , мм, были проанализированы данные о повреждаемости газопроводов (утечках) г. Макеевки, вызванной коррозией и разрывом сварных стыков, в период 2010-2016 гг.

Исходные данные о повреждаемости газовых сетей г. Макеевки представлены в табл 1.

Таблица 1  
Исходные данные о повреждаемости газопроводов г. Макеевки

№ п/п	Диаметр $D_n \times \delta$ , мм	Количество утечек, шт.	Протяженность газопровода данного диаметра $L$ , м
1	57x3	1	1442,75
2	57x4	4	1603,06
3	57x4,5	2	748,09
4	76x3	1	1047,38
5	76x4	1	1127,94
6	76x4,5	1	1248,79
7	108x4	3	17142,96
8	108x6	3	19102,15
9	133x7	1	4867,69
10	159x6	1	9742,21
11	159x7	1	11771,84
12	219x7	3	35608,93
13	325x6	1	17613,48
14	530x9	1	31037,19

Общая протяженность газопроводов по диаметрам всех толщин стенок представлена в табл. 2.

Таблица 2  
Общая протяженность газопроводов различных диаметров

№ п/п	Диаметр $D_n$ , мм	Количество утечек, шт.	Протяженность газопровода данного диаметра $L$ , м
1	57	7	5343,52
2	76	3	4028,37
3	108	6	48979,88
4	133	1	11320,2
5	159	2	40592,55
6	219	3	64743,51
7	325	1	25902,18
8	530	1	31997,1

Удельный параметр потока отказов рассчитывается по формуле

$$w_i = \frac{n}{T \cdot L}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество повреждений на газопроводе  $i$ -го диаметра, шт., за расчетный период времени  $T$ ;  $T$  – расчетный период времени, лет;  $L$  – протяженность газопроводов  $i$ -го диаметра, м.

На основании исходных статистических данных (табл. 2) были рассчитаны значения удельного параметра потока отказов газопроводов для различных диаметров по формуле (1), результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3  
Значения удельного параметра потока отказов в зависимости от наружного диаметра газопровода

№ п/п	Диаметр $D_n$ , мм	Удельный параметр потока отказов $w \cdot 10^5$ , 1/(м·год)
1	57	18,71
2	76	10,64
3	108	1,75
4	133	1,26
5	159	0,70
6	219	0,66
7	325	0,55
8	530	0,45

На основании данных табл. 3 при помощи программы CurveExpert 1.3 была получена зависимость удельного параметра потока отказов от наружного диаметра газопровода, описываемая уравнением

$$w \cdot 10^5 = 89,7214 \cdot D_n^{-0,006739 D_n}. \quad (2)$$

Как видно из табл. 3 с увеличением диаметра газопровода удельный параметр потока отказов снижается от значения  $18,71 \cdot 10^{-5}$  1/(м·год) при наружном диаметре 57 мм до  $0,45 \cdot 10^{-5}$  1/(м·год) при наружном диаметре 530 мм.

Для прослеживания зависимости удельного параметра потока отказов от наружного диаметра и толщины стенки газопровода произведем расчет удельного параметра потока отказов по формуле (1) на основании данных табл. 1. Результаты расчета сводятся в табл. 4.

Таблица 4

Значения удельного параметра потока отказов в зависимости от наружного диаметра и толщины стенки газопровода

№ п/п	Диаметр $D_h \times \delta$ , мм	Удельный параметр потока отказов $w \cdot 10^5$ , 1/(м·год)
1	57x3	29,71
2	57x4	26,73
3	57x4,5	19,10
4	76x3	13,64
5	76x4	12,67
6	76x4,5	11,44
7	108x4	2,50
8	108x6	2,24
9	133x7	2,93
10	159x6	1,47
11	159x7	1,21
12	219x7	1,20
13	325x6	0,81
14	530x9	0,46

Табл. 4 позволяет однозначно сделать вывод о том, что толщина стенки газопровода, как и его диаметр, оказывает влияние на значение удельного параметра потока отказов: с увеличением толщины стенки удельный параметр потока отказов снижается. Для получения зависимости, аппроксимирующей данные табл. 4, введем комплексную величину  $\chi$ , представляющую собой произведение наружного диаметра на толщину стенки газопровода,  $\text{мм}^2$ , и выведем среднее значение комплексной величины  $\chi_{cp}$  (рассчитанное как среднее арифметическое), а также среднее значение удельного параметра потока отказов  $w_{cp}$  для каждого диаметра, на котором имеются повреждения. Результаты расчета сводятся в табл. 5.

На основании данных табл. 5 при помощи программы CurveExpert 1.3 была получена зависимость среднего удельного параметра потока отказов от средней комплексной величины  $\chi_{cp}$ , описываемая уравнением

$$w_{cp} \cdot 10^5 = 0,6201 \cdot \chi_{cp}^{150,897/\chi_{cp}}. \quad (3)$$

Таблица 5

Значения среднего удельного параметра потока отказов  
в зависимости от средней комплексной величины  $\chi$

№ п/п	Диаметр $D_h \times \delta$ , мм	Комплексная величина $\chi$ , мм <sup>2</sup>	Средняя комплексная величина $\chi_{cp}$ , мм <sup>2</sup>	Средний удельный параметр потока отказов $w_{cp} \cdot 10^5$ , 1/(м·год)
1	57x3	171	219	25,18
2	57x4	228		
3	57x4,5	256,5		
4	76x3	228	291	12,58
5	76x4	304		
6	76x4,5	342		
7	108x4	432	540	2,37
8	108x6	648		
9	133x7	931	931	2,93
10	159x6	954	1034	1,34
11	159x7	1113		
12	219x7	1533	1533	1,20
13	325x6	1950	1950	0,81
14	530x9	4770	4770	0,46

Проверка значимости полученных зависимостей производилась с использованием числа Фишера. Для зависимости (2) число Фишера, рассчитанное по формулам [3], составляет  $F = 81,56$ , для зависимости (3)  $F = 123,79$ , табличное значение числа Фишера при уровне значимости 1%  $F_{7,6;1\%}^m$  составляет 8,26 [3]. Из этого следует, что уравнения (2) и (3) статистически значимо описывают результаты экспериментов, при этом уравнение, определяющее зависимость среднего параметра потока отказов от средней комплексной величины  $\chi_{cp}$ , имеет большую точность ( $123,79 > 81,56$ ).

В соответствии с ДСТУ 2862-94 вероятность безотказной работы определяется схемой соединения элементов сети и рассчитывается по уравнению

$$P(t) = e^{-\sum w_i \cdot t}, \quad (4)$$

где  $w_i$  – параметр потока отказов  $i$ -го элемента (газопровода, задвижки), (1/год);  $t$  – расчетный период времени, принимаемый равным 10 годам согласно [4].

Влияние параметра потока отказов на вероятность безотказной работы системы можно проследить на расчете кольцевой газовой сети высокого давления первой категории г. Макеевки. Исходные данные для расчета сведены в табл. 6. Схема сети высокого давления представлена на рис. 1.

Таблица 6  
Исходные данные для расчета кольцевой сети высокого давления

Участок	Длина участка, км	Диаметр $D_h \times \delta$ , мм	Участок	Длина участка, км	Диаметр $D_h \times \delta$ , мм
ГРС-1	3,0683	730x7	2-Б	3	219x6
1-2	5,924	730x7	3-В	1,212	377x9
2-3	6,91	529x7	4-Г	0,8	426x9
3-4	1,33	529x7	5-Д	4,013	426x9
4-5	2,5	529x7	6-Е	0,7	426x9
5-6	4	529x7			
6-1	5,02	630x7			

Значения параметра потока отказов были рассчитаны для двух случаев – по уравнениям (2) и (3), параметр потока отказов стальных задвижек согласно [4] принимается равным  $0,3 \cdot 10^{-3}$  1/год.

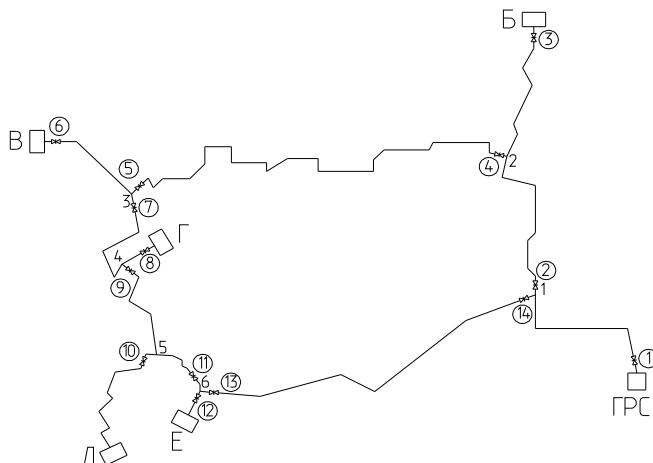


Рис. 1. Схема сети высокого давления

Вероятность безотказной работы кольцевой сети высокого давления рассчитывалась в зависимости от схемы присоединения участков сети (параллельного или последовательного). Результаты расчета показали, что вероятность безотказной работы сети при расчете параметра потока отказов по уравнению (2) составляет 0,9999, а при расчете параметра потока отказов по уравнению (3) – 0,7896.

### **Выводы**

1. Анализ данных по повреждаемости газовых сетей г. Макеевки показал, что параметр потока отказов зависит не только от диаметров участков сети, но и от толщины стенок труб.

2. С увеличением диаметра и толщины стенки газопровода параметр потока отказов снижается.

3. Учет толщины стенки газопровода при расчетах параметра потока отказов существенным образом влияет на вероятность безотказной работы газовой сети.

Последующая работа предусматривает сбор информации об аварийности подземных газопроводов различных диаметров с целью разработки рекомендаций и методик определения нормативных значений показателей надежности.

### **Библиографический список**

1. Головач Ю.А., Захаров В.И. Расчет надежности тупиковой газовой сети // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры: сб. науч. трудов. Научное методическое, практическое обеспечение градостроительства территориального стратегического планирования. 2014. №3 (107). С 13-19.

2. Головач Ю.А., Захаров В.И. Анализ зависимости параметра потока отказов от диаметра газопроводов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры: сб. науч. трудов. Инженерные системы и техногенная безопасность. 2010. № 6 (86). С. 117-122.

3. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высш. школа, 1982. 224 с.

4. Ионин А.А. Газоснабжение: учебник для ВУЗов; 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989. 439 с.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ ПЕРЕД ОТВЕРСТИЯМИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ И ВЕЛИЧИН УТЕЧЕК ГАЗА

канд. техн. наук, доц. **Захаров В.И.**

магистрант **Парамонов А.С.**

Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры, г. Макеевка

**Аннотация.** На основе эмпирических данных давлений газа перед отверстиями повреждений газопроводов получены уравнения, которые позволяют определить величины давления газа ( $P_x$ ) в различных точках по длине газопровода. Выполнен анализ величин утечек в зависимости от давления газа перед отверстиями повреждений газопроводов.

Природный газ является одним из самых распространенных энергоносителей и основным видом топлива для многих видов потребителей. Возникновение аварий на подводящих трубопроводах оказывает непосредственное влияние на техногенную безопасность предприятий и населения. Обнаружение места утечки в кратчайшие сроки сокращает время ремонта, тем самым увеличивает надежность работы энергетических комплексов и повышает энергобезопасность потребителей.

Цель работы заключается в повышении надежности энергетических объектов путем определения давлений газа перед отверстиями, которые возникают в результате повреждения газопроводов по разным причинам, а также величин утечек газа при возникновении аварийных ситуаций.

Для определения объемов утечки газа из газопроводов, на которых имеются повреждения, применяется упрощенная, идеализированная модель газопровода, который имеет одинаковый диаметр и одинаковый расход газа. При расчетах учитывается, что для газопроводов систем газоснабжения применяется классификация, которая приведена в [1]. В статье рассмотрены расчеты на газопроводах среднего давления, с учетом формул, приведенных в [2].

Относительное расположение места повреждения газопровода определяется коэффициентом  $C_1$ , который определяется как отношение длины участка газопровода от его начала до места повреждения ( $l_x$ ) к расчетной длине газопровода ( $l_p$ ) [3], то есть описывается следующим уравнением:

$$C_1 = \frac{l_x}{l_p} \quad (1)$$

где  $l_x$  - длина участка газопровода от его начала до места повреждения, м;  $l_p$  - расчетная длина газопровода, м.

Расчетная длина газопровода,  $l_p$ , определяется по формулам приведенным в [1].

Определение давления газа и величин выброса газа  $V_x$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , проводится для случаев расположения повреждений в начале, в середине и в конце газопровода, а также в двух промежуточных точках, то есть при значениях  $C_1$ , которые приведены в [3].

Площадь отверстия повреждения,  $\text{см}^2$ , оценивается безразмерным значением коэффициента  $C_2$ , который представляет собой отношение площади отверстия повреждения  $f_{\text{отв}}$  к площади поперечного сечения трубы  $f_{\text{tp}}$ , [3], то есть описывается следующим уравнением:

$$C_2 = \frac{f_{\text{отв}}}{f_{\text{tp}}}, \quad (2)$$

где  $f_{\text{отв}}$  - площадь отверстия повреждения,  $\text{см}^2$ ;  $f_{\text{tp}}$  - площадь поперечного сечения трубы,  $\text{см}^2$ .

При расчетах значения коэффициента  $C_2$  принимались в соответствии с рекомендациями, которые приведены в [3].

Рассмотрены следующие условно принятые категории повреждения газопроводов [3]:

- 1) максимально возможное, то есть  $C_2 = 1$ ;
- 2) очень большое и большое повреждение, то есть  $C_2 = 0,5$  и  $C_2 = 0,25$ ;
- 3) среднее повреждение, то есть  $C_2 = 0,125$ .

Объем утечки газа из поврежденного газопровода  $V_x$  по своему физическому смыслу представляет расход газа через отверстие повреждения.

Для получения и анализа эмпирической зависимости давления газа  $P_x$  перед отверстием повреждения газопровода от относительного расположения места повреждения до начала газопровода производилась обработка экспериментальных данных, полученных при различных значениях коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$ . Исходные данные, которые были получены для  $C_2 = 0,125$  и расчетного расхода  $Q_p$ , равного  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  приведены в табл. 1.

Анализ эмпирических данных показал, что гипотеза нормальности распределения может быть принята.

С помощью программы CurveExpert 1.3 подбираются эмпирические формулы, определяются коэффициенты в них и строятся графики.

Таблица 1

Данные зависимости давления  $P_x$  от относительного расположения места повреждения  $C_1$  для  $C_2 = 0,125$

№ п/п	$C_1$	$P_x$ , МПа
	$x$	$y$
1	0,1	0,3
2	0,3	0,225
3	0,5	0,18
4	0,7	0,17
5	0,9	0,16

Наиболее оптимальный вариант – зависимость, представленная функцией Weibull Model, имеющей вид:

$$y = 0,30002 - 0,14694 \cdot e^{-0,04595 \cdot x^{-2,20628}}. \quad (3)$$

Следующим вариантом, наиболее точно отображающим имеющуюся зависимость, является функция Quadratic Fit:

$$y = 0,34084 - (-0,46214) \cdot x - 0,29464 \cdot x^2. \quad (4)$$

Графики зависимостей приведены на рис. 1.

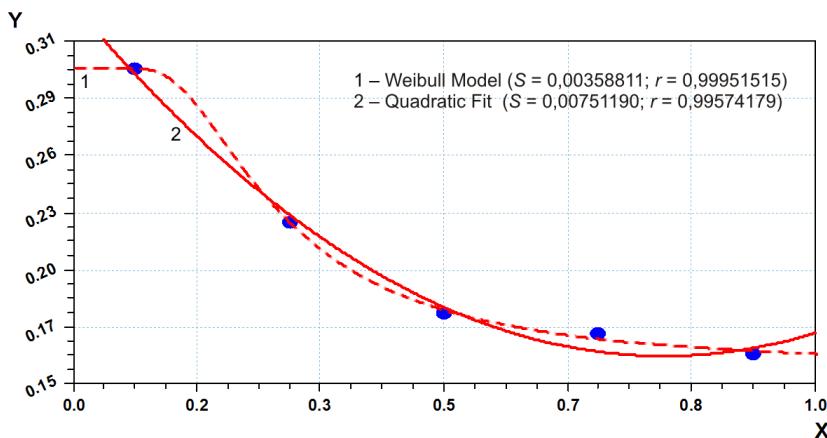


Рис. 1. Аппроксимация эмпирических данных, выраженная с помощью функций Weibull Model и Quadratic Fit

Были определены числа Фишера для уравнений (3) и (4).

Значение числа Фишера для уравнения (4)  $F = 765,7$  меньше значения числа Фишера уравнения (3) –  $F = 773,62$ , следовательно уравнение (3) точнее описывает зависимость между исходными данными.

### **Выводы**

1. Из анализа графиков (см. рис. 1) следует, что давление газа перед отверстиями, возникающих при повреждении газопроводов,  $P_x$ , при значениях коэффициента от  $C_1 = 0,1$  до  $C_1 = 0,5$  возможно определять как по уравнению (3), так и по уравнению (4), при значениях коэффициента  $C_1$  от 0,5 до 1,0 по уравнению (3).

2. Давления газа перед отверстиями повреждений по мере увеличения относительного расположения от начала газопроводов уменьшаются примерно в 1,85 – 1,9 раза.

3. Величины утечек газа из отверстий повреждений, которые возникают на газопроводах, по мере увеличения относительного расположения повреждений от начала газопроводов уменьшаются в 1,5-3 раза в зависимости от вида повреждения.

4. Отношения величин утечек газа из отверстий при повреждении газопроводов к давлениям перед этими отверстиями при значениях коэффициента  $C_2$  от 0,1 до 0,5 имеют постоянные значения, не зависящие от мест расположения повреждений.

Работа будет продолжена для получения зависимости давления от коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$ .

### **Библиографический список**

1. Стаскевич Н.Л., Северинец Г.Н., Вигдорчик Д.Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. Л.: Недра, 1990. 762 с.
2. Фастов Л.М., Иванов А.И., Хореев В.В. Методика определения потерь газа в системах газораспределительных организаций. Саратов: Госэнергонадзор, 2002. 25 с.
3. Соловьев Е.Б. Влияние режимов газопотребления на объем выбросов газа из мест повреждений надземных газопроводов // Актуальные научно-технические проблемы совершенствования систем газораспределения и газопотребления: Сб. материалов конф. Саратов: Гипронигаз, 2005. С. 153-157.

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСАХ

канд. техн. наук, доц. **Карнаух В.В.**<sup>1</sup>,  
д-р техн. наук, проф. **Бирюков А.Б.**<sup>2</sup>,  
студентка **Шмелёва В.В.**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Донецкий национальный университет экономики и торговли  
имени Михаила Туган-Барановского, г. Донецк

<sup>2</sup>Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

**Аннотация.** Проведен анализ эффективности использования  $R744$  ( $CO_2$ ) как рабочего вещества в высокотемпературной парокомпрессионной теплонасосной установке (ТНУ), включенной в качестве дополнительного элемента в систему обратного водоснабжения промышленного предприятия и предназначенный для теплоснабжения близлежащих административно-бытовых зданий. Приведены результаты расчётов цикла парокомпрессионного теплового насоса на  $CO_2$ ; построены зависимости значения коэффициента преобразования теплоты и экспергетического КПД от значения температуры низкотемпературного теплоносителя на входе в теплонасосную установку при  $P_k = 8,5$  МПа и  $P_k = 9$  МПа.

Главной причиной глобальных процессов, которые приводят к изменению климата на нашей планете, являются современные технологии, оказывающие негативное воздействие не только на климат, но и на здоровье людей при выбросе в атмосферу парниковых газов, обуславливающих возникновение парникового эффекта. Основным загрязнителем атмосферы является  $CO_2$ , образующийся в результате сжигания органического топлива при выработке электроэнергии и теплоты. Согласно исследованиям Межправительственной группы экспертов ООН по изменению климата, антропогенные выбросы парниковых газов достигли  $49 \pm 4,5$  Гт $CO_2$ -экв/год (гигатонны эквивалента  $CO_2$  в год). Выбросы  $CO_2$  в результате сжигания топлива внесли около 78% в увеличение суммарных выбросов парниковых газов с 1970 по 2012 гг., что привело к потеплению на  $0,85^{\circ}C$  [1].

Одним из решений проблемы сохранения невозобновляемых энергоресурсов и сокращения вредных выбросов в атмосферу продуктов сгорания является использование энергосберегающих технологий на основе применения тепловых насосов в коммунальном и производственном теплоснабжении.

Целью данной работы является рассмотрение специфики применения R744 ( $\text{CO}_2$ ) как рабочего вещества в парокомпрессионной высокотемпературной ТНУ, использующей в качестве низкопотенциального источника теплоты теплоту охлаждающей воды в системе оборотного водоснабжения промышленного предприятия для решения задач отопления и горячего водоснабжения зданий при температурах 60 и 83°C.

Как отмечается в работах [2, 3] в качестве рабочего вещества тепловых насосов может служить диоксид углерода, который относится к рабочим веществам высокого давления. Авторами [4] предложена ТНУ на диоксиде углерода, состоящая из двух тепловых насосов: одного для отопления, а второго для получения горячей воды.

Данный холодильный агент обладает некоторыми уникальными термодинамическими и теплофизическими свойствами (табл. 1) [5]. Прежде всего, это низкая критическая температура, которая приводит к тому, что процесс конденсации заменен охлаждением газообразного R744 в транскритической области.

Достаточно высокая температура газа после компрессора и значительное изменение температуры при охлаждении газообразного диоксида углерода позволяет нагревать высокотемпературной источник теплоты на большую разность температур с небольшими потерями энергии [2].

Таблица 1

Основные параметры и характеристики R744 ( $\text{CO}_2$ ) для расчета цикла парокомпрессионной высокотемпературной теплонасосной установки

Параметр	Рабочее вещество
	R744
Химическая формула	$\text{CO}_2$
Потенциал разрушения озонового слоя ODP (относительно R11)	0,0
Потенциал глобального потепления GWP	0,0
Молекулярная масса $\mu$ , кг/кмоль	44,1
Критическое давление $p_{kp}$ , МПа	7,38
Критическая температура $t_{kp}$ , °C	31,1
Нормальная температура кипения $t_s$ , °C	-78,4 (сублимация)

Необходимо отметить особенности диоксида углерода как рабочего вещества тепловых насосов, считая их преимуществами:

- малое отношение давлений в цикле создает эффективные условия для работы компрессора;
- малый удельный объем  $v''$  и высокая удельная объемная производительность  $q_v$  обуславливают небольшие размеры компрессора;
- высокая доля работы расширения в работе цикла создает условия для использования детандера с целью повышения коэффициента преобразования теплового насоса [3].

Анализ термодинамической эффективности циклов парокомпрессионной ТНУ на диоксиде углерода осуществлялся при следующих исходных параметрах [6]:

- Тип теплового насоса: ТНУ «вода-вода».
- Тип цикла: с рекуперативным теплообменником и переохладителем.
- Источник низкопотенциальной теплоты: технологическая вода из системы оборотного водоснабжения ТЭЦ  $t_h = 15 \dots 30^\circ\text{C}$ .
- Потребитель: административно-бытовое помещение  $t_b = 70 \dots 80^\circ\text{C}$  (на отопление) и  $t_b = 60^\circ\text{C}$  (на горячее водоснабжение).

Значение температуры кипения холодильного агента в испарителе определялась по формуле (1):

$$t_0 = t_{h_2} - 10, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

где  $t_{h_2}$  – температура НИТ после теплового насоса,  $^\circ\text{C}$ .

Термодинамическая эффективность тепловых насосов оценивалась по методике, предложенной авторами в [7, 8]. Предварительно были построены циклы работы ТНУ на фазовой диаграмме холодильного агента (в данной работе приводим циклы, построенные при температуре кипения  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ , рис. 1 и 2). Термодинамические расчеты проводились с использованием прикладных программ MicrosoftExcel 2010 и Simpleone-stage CO<sub>2</sub> version 2.40 (IPU@DanskEnergi, freeware).

Для оценки эффективности работы ТНУ варьировали значение температуры низкопотенциального источника от  $15^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$ . Значение  $P_k$  зависит от температуры кипения  $t_0$  (давления кипения  $p_0$ ), температур теплоносителя на входе и выходе  $t_{b1}$  и  $t_{b2}$ , заданной минимальной разности температур между газообразным R744 и теплоносителем  $\Theta_{min}$  [3]. В данной работе расчеты выполнены при значениях давления газоохлаждения (конденсации)  $P_k = 8,5 \text{ MPa}$  и  $P_k = 9 \text{ MPa}$ .

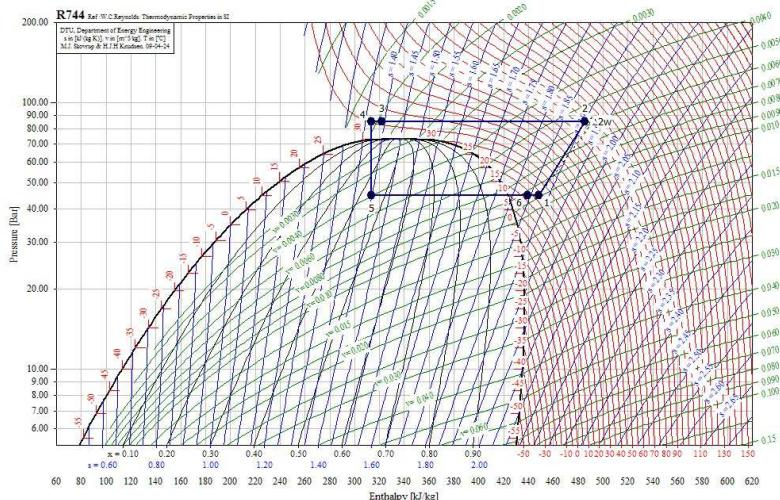


Рис. 1. Термодинамический цикл парокомпрессионной одноступенчатой ТНУ для R744 при давлении газоохлаждения  $P_k = 8,5$  МПа и  $t_0 = 10^\circ\text{C}$

Цикл парокомпрессионного теплового насоса состоит из следующей последовательности термодинамических процессов: 5-6 – изотермическое кипение холодильного агента в испарителе ТНУ за счет теплоты низкопотенциального источника; 6-1 – перегрев паров холодильного агента в промежуточном теплообменнике; 1-2 – адиабатное сжатие паров в компрессоре; 2-3 – охлаждение газообразного R744 в газоохладителе и передача теплоты высокопотенциальному источнику; 3-4 – охлаждение газообразного R744 в промежуточном теплообменнике; 4-5 – дросселирование R744.

Тепловая нагрузка на ТНУ ( $\text{кДж}/\text{кг}$ ) определялась по формуле (2):

$$q_{\text{тн}} = q_k + q_{\text{по}}, \quad (2)$$

где:  $q_k$  – удельная тепловая нагрузка конденсатора,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $q_{\text{по}}$  – удельная тепловая нагрузка переохладителя,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

Показатели энергетической эффективности работы ТНУ, такие как экспергетический КПД теплового насоса ( $\eta_s$ ) и коэффициент преобразования (трансформации) теплоты ( $\mu$ ) были рассчитаны по формулам, приведенным в [7].

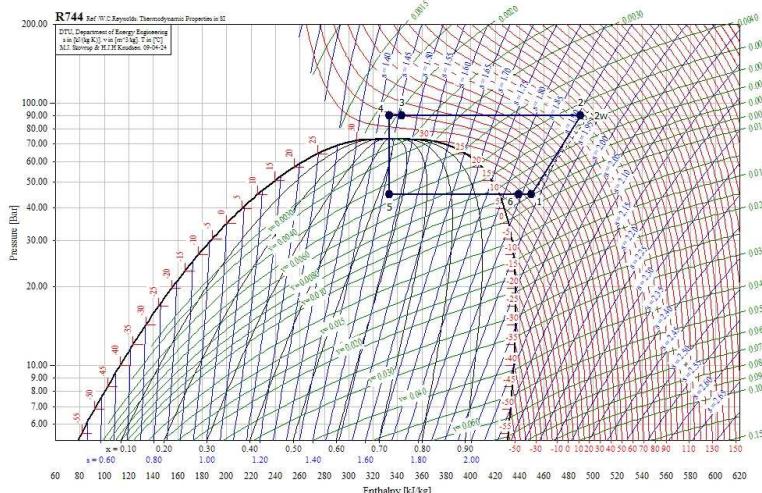


Рис. 2 .Термодинамический цикл парокомпрессионной одноступенчатой ТНУ на R744 при давлении газоохлаждения  $P_k = 9$  МПа и  $t_0 = 10^\circ\text{C}$

Приводим регистр исходных данных и полученных результатов при  $P_k = 8,5$  МПа и  $P_k = 9$  МПа (табл. 2).

Таблица 2  
Исходные данные и результаты расчетов термодинамической эффективности ТНУ, работающей на R744

Значение давления конденсации, $P_k$ , МПа	8,5				9		
Температура кипения хладагента, $t_0$ , °C	0	5	10	15	5	10	15
1	2	3	4	5	6	7	8
Температура конденсации хладагента, $t_k$ , °C	96	87,1	78,8	71	93,9	85,5	77,47
Температура НИТ на входе в тепловой насос, $t_{hl}$ , °C	15	20	25	30	20	25	30
Температура НИТ на выходе из теплового насоса, $t_{h2}$ , °C	10	15	20	25	15	20	25

Окончание табл. 2

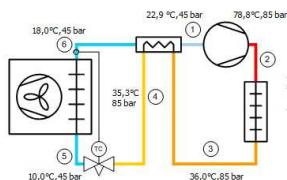
1	2	3	4	5	6	7	8
Температура ВИТ на входе в тепловой насос, $t_{el}$ , °C	47	47	47	47	70	70	70
Температура ВИТ после теплового насоса, $t_{el2}$ , °C	57	57	57	57	80	80	80
Тепловая нагрузка на испаритель, $q_0$ , кДж/кг	133,24	130,14	126,25	121,38	109,81	106,05	101,37
Тепловая нагрузка на конденсатор, $q_k$ , кДж/кг	188,06	175,27	162,39	149,24	159,12	146,14	132,93
Тепловая нагрузка на переохладитель, $q_{no}$ , кДж/кг	8	8	8	8	8	8	8
Тепловая нагрузка на тепловой насос, $q_{mn}$ , кДж/кг	196,06	183,27	170,39	157,24	167,12	154,14	140,93
Работа сжатия в компрессоре $l_{comp}$ , кДж/кг	54,8	45,1	34,2	27,9	49,3	40	31,5
Энергетический КПД теплового насоса, $\eta_{\vartheta}$	0,45	0,45	0,48	0,46	0,55	0,57	0,59
Коэффициент преобразования теплоты $\mu$	3,58	4,06	4,98	5,64	3,39	3,85	4,47
Тепловой эквивалент электроэнергии, потребляемой компрессором на сжатие рабочего вещества, кДж/кг	64,49	53,09	42,52	32,78	54,63	44,32	34,09

Результаты расчётов параметров термодинамических циклов при температуре кипения  $t_0 = 10^\circ\text{C}$  в программе Simpleone-stage CO2 показаны на рис. 3.

При сравнительном анализе полученных результатов (табл. 2) для горячего водоснабжения при давлении газоохлаждения  $P_k = 8,5$  МПа предпочтительно выбирать температуру кипения холодильного агента  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ , так как значения коэффициента преобразования теплоты  $\mu$  и удельной тепловой нагрузки  $q_{mn}$  наибольшие. Аналогично для отопления принимаем температуру кипения холодильного агента  $t_0 = 10^\circ\text{C}$  при давлении газоохлаждения  $P_k = 9$  МПа.

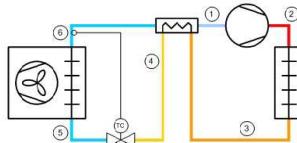
a)

### Simple CO<sub>2</sub> one stage plant



$$\begin{aligned} Q_e &= 126,25 \text{ kJ/kg} \\ W &= 42,52 \text{ kJ/kg} \\ Q_c &= 162,39 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\text{COP}_c = 2,97 \quad \text{COP}_h = 3,82$$

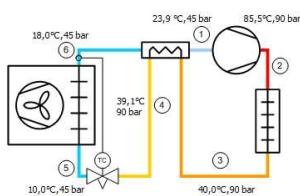


Point	T [°C]	P [bar]	v [m³/kg]	Rho [kg/m³]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg K]
1	22,30	45,01	0,0088	113,3	448,0	1,87
2	79,56	85,00	0,0057	174,8	485,3	1,90
3	36,20	85,00	0,0018	556,8	321,8	1,29
4	35,27	85,00	0,0017	992,0	315,3	1,37
5	10,20	45,01	0,0039	253,5	315,3	1,40
6	18,20	45,01	0,0084	119,7	439,6	1,84

h2w [kJ/kg]: 491,9

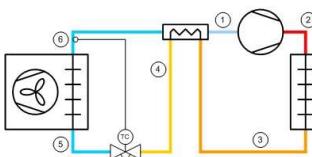
б)

### Simple CO<sub>2</sub> one stage plant



$$\begin{aligned} Q_e &= 106,05 \text{ kJ/kg} \\ W &= 47,16 \text{ kJ/kg} \\ Q_c &= 146,14 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\text{COP}_c = 2,25 \quad \text{COP}_h = 3,10$$



Point	T [°C]	P [bar]	v [m³/kg]	Rho [kg/m³]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg K]
1	23,91	45,01	0,0089	112,1	449,7	1,88
2	85,45	90,00	0,0055	180,9	489,7	1,91
3	40,00	90,00	0,0021	484,1	343,6	1,46
4	39,08	90,00	0,0019	522,7	333,5	1,43
5	10,00	45,01	0,0046	218,1	333,5	1,47
6	18,00	45,01	0,0084	119,7	439,6	1,84

h2w [kJ/kg]: 496,8

Рис. 4. Результаты расчёта параметров термодинамического цикла парокомпрессионной одноступенчатой ТНУ на R744 при:

a)  $P_k = 5 \text{ МПа}$  и  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ ;  $P_k = 9 \text{ МПа}$  и  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ :

- 1 – линия всасывания; 2 – линия нагнетания; 3 – переход с газоохладителя на промежуточный теплообменник; 4 – линия перед дросселированием; 5,6 – линия входа и выхода из испарителя

По данной схеме целесообразно использовать компрессора для транскритических циклов CO<sub>2</sub>, предложенные фирмой BITZER [9]. В работе, исходя из полученных результатов, подобран полугерметичный поршневой компрессор модели 4PTEU-7LK-40S.

## **Заключение**

1. Для парокомпрессионных ВТН проведены построения на фазовых диаграммах  $lgp-h$  и расчеты термодинамических циклов для R744 при варьировании значений температуры НИТ  $t_u = 15\ldots30^\circ\text{C}$  и двух значениях давления газоохлаждения  $P_k = 8,5 \text{ МПа}$  и  $P_k = 9 \text{ МПа}$ , соответственно.
2. Включение предлагаемой ТНУ является целесообразным для системы обратного водоснабжения металлургических предприятий для обеспечения горячего водоснабжения близлежащих административно-бытовых помещений.
3. По данной схеме целесообразно использовать компрессор полугерметичный поршневой модели 4PTEU-7LK-40S фирмы BITZER.

## **Библиографический список**

1. Межправительственная группа экспертов по изменению климата: Обобщющий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад // МГЭИК. 2014. С. 2–5.
2. Калнинь И.М., Пустовалов С.Б., Кривцов Д.В. Масштабы и перспективы применения тепловых насосов на R744 // Холодильная техника. 2013. № 3. С. 22–26.
3. Разработка и внедрение энергосберегающих технологий с применением тепловых насосов [Электронный ресурс] / И.М. Калнинь, В.Е. Накоряков, Н.И. Григорьева и др. М.: НПФ «ЭКИП», 2004. С. 18-26. URL: [http://esco.co.ua/journal/2011\\_8/art197.pdf](http://esco.co.ua/journal/2011_8/art197.pdf)
4. Sit M.L., Burciu V.I. District Heating System Using Heat Pump Installations and CHP // Journal of the Academy of Sciences of Moldova «Problemeleenergeticiiregionale. SeriaTermoenergetică». 2015. № 3 (29). С.67–72.
5. Электронный справочник: химические и физические свойства: углерода (IV) оксид [Электронный ресурс]. URL: [http://www.chemport.ru/chemical\\_substance\\_829.html](http://www.chemport.ru/chemical_substance_829.html)
6. Про використання теплових насосів для покриття навантажень гарячого водопостачання та опалення / В.В. Кравцов, С.В., Грідін, А. Саф'янсь, В.В. Карнаух // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. Вип. 29. Донецк: Донецк. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського, 2012. С. 106–113.
7. Трубаев П.А., Гришко Б.М. Тепловые насосы: Учеб. пособие. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. 142 с.
8. Antonijevic D., Komatina M., Rudonja N. Ground water Heat Pump Selection for High Temperature Heating Retrofit // Energy and Buildings. 2012. № 49. P. 294-299.
9. BITZER Software v6.7.0 rev1852 [Электронный ресурс]. URL:<https://www.bitzer.de/websoftware/Default.aspx>.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЛУЧИСТЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕПЛОПОТЕРЬ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

д-р хим. наук, проф. Ключников О.Р.

магистрант Астраханов М.В.

Казанский национальный исследовательский

технологический университет, г. Казань

Казанский государственный

энергетический университет, г. Казань

**Аннотация.** Разработана лабораторная установка и методика измерения плотности тепловых потоков. Проведены измерения конвективных и радиационных тепловых потерь материалов. Установлены доли лучистых теплопотерь.

В настоящее время актуальной является тема уменьшения тепловых потерь. Важной задачей является снижение тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий, в частности, оконных проемов. При эксплуатации систем теплоснабжения часть переданной от источника потребителю тепловой энергии теряется через тепловую изоляцию трубопроводов. Анализ тепловых потерь является важным аспектом при выборе теплоизоляционных материалов. На сегодняшний день ведутся много работ по уменьшению теплопотерь через теплопроводы.

Цель работы: определение тепловых потерь через образцы материалов с дальнейшим вычислением доли лучистых составляющих теплопотерь.

Как известно тепловые потери делятся на конвективные и радиационные составляющие. Необходимо установить доли лучистых составляющих теплопотерь образцов материалов. Измерения проводились на установке, показанной на рисунке 1. Источником теплового излучения является лампа накаливания мощностью 40 Вт, помещенный в металлическую коробку. Лучистые составляющие теплопотерь измеряются неселективным радиометром Аргус-03.

Методика проведения экспериментов заключается в следующем.

На образец материала крепятся датчики температуры и регистрации тепловых потоков прибора ИТП-МГ4.03/Х(II). Далее материал крепится на одной из сторон данной металлической коробки и включается источник теплоты. В течение 50 минут температура внутри коробки повышается до установления постоянного значения. Данные датчиков регистрируются в течение 60 минут. Для измерения лучи-

стых составляющих теплопотерь включается радиометр «Аргус-03» и выдерживается в течение 3-5 минут до приобретения датчика температуры окружающей среды, измеряется фоновое излучение окружающей среды по показаниям «Аргус-03», далее убирается теплоизолирующая ширма и через 3 секунды записывается показание радиометра, измерения проводятся 5 раз. По окончании измерений ширма устанавливается перед датчиком радиометра. Результаты измерений представлены в табл. 1.

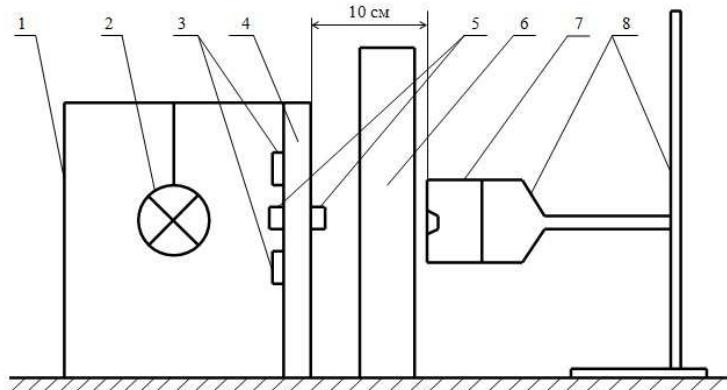


Рис. 1. Схема лабораторной установки для измерения плотности тепловых потоков: 1 - металлическая коробка, 2 - лампа накаливания, 3 - датчики плотности теплового потока прибора "ИТП - МГ4.03", 4 - исследуемый материал, 5 - датчики температуры, 6 - теплоизолирующая ширма, 7 - датчик радиометра "Аргус-03", 8 – штатив

Таблица 1  
Результаты экспериментальных исследований

Название образца материала	Теплопотери, Вт/м <sup>2</sup>		Доля лучистых теплопотерь
	Конвек-тивные	Радиационные	
Металлический лист со СКЭПТ+AL	693,4	92,2	13,3%
Лист гипсокартона с фольгой	456,2	78,6	17,2%
Металлический лист с гипсом	560,3	88,0	15,7%
1 камерный мультифункциональный стеклопакет с ИК-отражающим покрытием (2 стекла)	659,8	149,4	22,6%
1 камерный стеклопакет (2 стекла)	685,6	427,0	62,3%

Окончание табл. 1

Название образца материала	Теплопотери, Вт/м <sup>2</sup>		Доля лучистых теплопотерь
	Конвек-тивные	Радиа-ционные	
Фольгоизол, производитель 1	353,4	132,2	37,4%
Фольгоизол, производитель 2	512,6	70,0	13,6%
2 камерный мультифункциональный стеклопакет с ИК-отражающим покрытием (3 стекла)	678,8	160,2	23,6%
2 камерный стеклопакет (3 стекла)	664,7	369,1	55,5%
Сотовый поликарбонат толщиной 8 мм	555,8	485,3	87,3%
Сотовый поликарбонат толщиной 20 мм	433,4	326,7	75,4%

Таким образом, по результатам измерений можно установить, что коэффициент лучистых теплопотерь в зависимости от испытуемых материалов колеблется от 13,3 до 87,3 %. Как показывают результаты, стеклопакеты с ИК-отражающим покрытием значительно энергоеффективнее стандартных. А сотовые поликарбонаты обладают сравнительно большими лучистыми составляющими теплопотерь, в отличие от других испытуемых материалов. Следовательно, для уменьшения тепловых потерь необходимо использовать в качестве одного из слоев утеплителя ИК-отражающий материал или покрытие.

### Библиографический список

1. Хижняков С.В. Тепловая изоляция. М.: Энергия, 1985. 421 с.
2. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов. М.: Стройиздат, 1989. 399 с.
3. Шойхет Б.М., Ставрицкая Л.В., Ковылянский Я.А. Тепловая изоляция трубопроводов тепловых сетей. Современные материалы и технические решения // Энергосбережение. 2002. № 5. С. 43-45.
4. Теплоизоляционные материалы и конструкции / Ю.Л. Бобров, Е.Г. Овчаренко, Б. М.Шойхет, Е.Ю. Петухова. М.: Изд-во Инфра-М, 2010. 154 с.
5. Арутюнян А.А. Основы энергосбережения. М.: Энергосервис, 2007. 600 с.

# **ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЗМЕЕВИКЕ МЕТАНТЕНКА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ К СБРАЖИВАЕМОЙ БИОМАССЕ**

ассистент Колосова Н.В.

канд. техн. наук, доц. Монах С.И.

Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры, г. Макеевка

**Аннотация.** Получение биогаза путем анаэробного сбраживания органических отходов животноводческих ферм зависит от многих факторов, основным из которых является поддержание постоянной температуры. В процессе эксплуатации метантенка возникает появление отложений органических веществ на нагревательном элементе, что приводит к ухудшению теплопередачи от греющего теплоносителя к сбраживаемой массе. В статье приведены опытные данные, полученные на лабораторной установке, рассчитан коэффициент теплопередачи.

Наиболее распространённый процесс получения биогаза является анаэробное сбраживание отходов животноводческих ферм (биомассы). На интенсивность выхода биогаза влияет стабильность процесса анаэробного сбраживания биомассы (поддержание постоянной температура внутри метантенка (МТ), уровень pH, влажность и качество субстрата, равномерность перемешивания биомассы и др.[1]). Для поддержания постоянной температуры биомассы конструкцией метантенка предусмотрен нагревательный элемент. Оптимальный температурный режим для производства биогаза является мезофильный с температурой 32-42°C [2]. Технологически предусмотрено периодическое перемешивание биомассы с целью равномерного распределения температуры по всему объему МТ и уменьшения образования на поверхности корки, а так же выпадения осадка[3]. В процессе работы МТ наблюдается налипание органической массы, в виде отложений на нагревательный элемент. Это приводит к снижению теплопередачи из-за низкой теплопроводности отложений и как следствие увеличению времени нагрева биомассы.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка влияния толщины отложений, на нагревательном элементе МТ, на интенсивность теплопередачи к биомассе.

Толщина отложений зависит от плановой влажности субстрата, скорости и количества перемешиваний и длительности сбраживания.

Плановую влажность субстрата рекомендуется принимать в пределах 85-95%. Повышение влажности выше 95% процентов приводит к нерентабельности использования МТ, а при уменьшении влажности меньше чем 85% становится проблематичным перемещение биомассы. Таким образом, технологически изменение плановой влажности субстрата не является целесообразным. Представляет интерес изучение влияния длительности сбраживания и перемешивания на толщину отложений.

По разработанной конструкции метантенка, приведенной в работе [4], создана лабораторная установка для изучения теплообмена в МТ. Основным элементом установки является реактор, в котором расположен нагревательный элемент и мешалка. Весь рабочий объем заполнен биомассой (смесь отходов крупного рогатого скота и воды), с влажностью 90%. В качестве нагревательного элемента принята латунная спирально навитая трубка с наружным диаметром 0,004м (змеевик). В качестве теплоносителя используется вода с параметрами 60/40°C [5]. Рабочая температура внутри МТ принята 40°C [6]. Для перемешивания используется турбинная мешалка, расположенная в центре МТ.

Было проведено три серии опытов с различными скоростями перемешивания 1 об./с, 2 об./с и 4 об./с. Длительность каждого опыта 30 дней. Опыты проводились при постоянной температуре сбраживания. Два раза в сутки осуществлялось перемешивание с постоянной скоростью. Каждые 12 часов замерялась толщина отложений на змеевике.

Исследования показали, что наблюдается не равномерность в толщине отложений по длине змеевика после перемешивания. На части змеевика, которая расположена в одной горизонтали с мешалкой появление отложений не значительно, а в нижней и верхней частях змеевика наблюдаются большие отложения твердых частиц биомассы. Это связано с тем, что при перемешивании аксиальная составляющая потока значительно меньше тангенциальной и радиальной составляющих [7]. Поэтому изменение количества оборотов мешалки не оказывает существенного влияния на толщину отложений. На основании этого можно сделать вывод, что толщина отложений незначительно зависит от скорости перемешивания. Поэтому дальнейший анализ будет основан на данных опыта полученных при скорости перемешивания 2 об./с.

Замеры толщины отложений принимались средние по всей длине змеевика. На рис. 1 показан график зависимости толщины отложений от длительности сбраживания при скорости перемешивания 2 об./с.

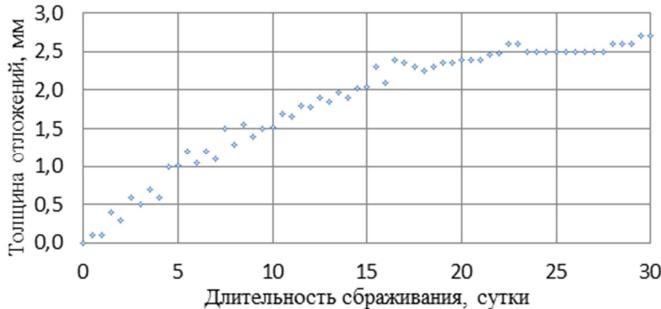


Рис.1. Зависимость толщины отложений от длительности сбраживания

Из графика видно, что резкий рост толщины отложений (до 2мм) наблюдается в первые пятнадцать суток. После этого налипание органических веществ на змеевик не значительно увеличивается.

Для анализа интенсивности теплоотдачи был рассчитан коэффициент теплопередачи от греющего теплоносителя к сбраживаемой массе при полученных толщинах отложений. По рассчитанным данным построена зависимость коэффициента теплопередачи от толщины отложений (рис. 2).

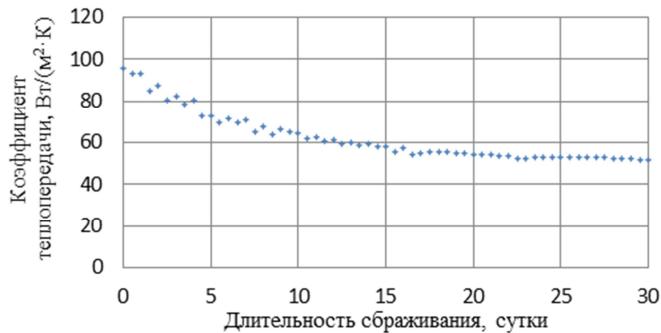


Рис. 2 Зависимость коэффициента теплопередачи от длительности сбраживания

На графике (рис. 2) видно, что увеличение толщины отложений на коэффициент теплопередачи существенно влияет только в первые

ые пятнадцать суток. Дальнейший рост толщины отложений практически не влияет на интенсивность теплопередачи.

На основании проведенных опытов и расчетов можно сделать вывод, что толщина отложений на греющем элементе МТ, снижает теплопередачу от греющего теплоносителя к сбраживаемой массе. Это приводит к уменьшению температуры внутри МТ и ухудшению анаэробного сбраживания.

В настоящее время проводятся расчетно-аналитические исследования зависимости возможного увеличения температуры греющего теплоносителя от толщины отложений на змеевике.

Определение зависимости температуры греющего теплоносителя от толщины отложений позволит скорректировать технологический процесс сбраживания биомассы без снижения интенсивности выхода биогаза.

### **Библиографический список**

1. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: теория и практика: Пер. с нем. М.: Колос, 1982. 148 с.
2. Дубровский В.С., Виестур У.Э. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов. Рига: Зиннатне, 1988. 204 с.
3. Олексюк А.О., Сербін В.А., Радько Н.Ф. Енергозбереження при використанні нетрадиційних джерел: Навчальний посібник. Донецьк: ДАЖКГ Держжитлокомуунгоспу України, 2004. 156 с.
4. Колосова Н.В., Чеботарёва О. В., Сербин В.А. Анализ технологических особенностей сбраживания биомассы в метантенках для получения биогаза // Вісник Донбаської нац. академії будівництва і архітектури : зб. наук. праць. Інженерні системи та техногенна безпека. Вип. 2010-6(86). Макіївка, 2010. С. 131-134.
5. Колосова Н.В. Чеботарёва О. В., Сербин В.А. Процессы теплообмена в метантенке при сбраживании биомассы // Вісник Донбаської нац. академії будівництва і архітектури: зб. наук. Праць. Інженерні системи та техногенна безпека. Вип. 2011 -5 (91). Макіївка, 2011. С.31-37.
6. Бойлс Д. Биоэнергия: технология, термодинамика, издержки; пер. с англ. под ред. Е.А.Бирюковой. М.: Агропромиздат, 1982. 152 с.
7. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности; пер. с чешского под ред. И. С. Павлушкина. –: Ленинградское отделение Госхимиздата, 1963. 416 с.

# ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ<sup>\*</sup>

д-р техн. наук, проф. Кузнецов В.А.

д-р техн. наук, доц. Трубаев П.А.

Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород

**Аннотация.** В работе рассмотрены проблемы, возникающие при численном решении системы дифференциальных уравнений Навье–Стокса для моделирования турбулентного движения среды. Отмечено, что компьютерное представление чисел выполняется с небольшой погрешностью их округления, которая в численных методах заметно возрастает, накапливаясь для совокупности узлов сетки в методе прогонки до критического уровня. Предложены методы снижения погрешности, которые рассмотрены на примере математической модели и моделирующей компьютерной программы обжига керамзита во вращающейся печи. Показано, что применение методов приводит к замедлению сходимости и увеличению числа расчетных итераций, но к получению адекватных результатов. Рассмотрена проблема выбора и применения работоспособной модели турбулентности. Предложен новый алгоритм вычисления турбулентной вязкости, позволяющий снизить вычислительную погрешность. Приведены результаты применения такого подхода к вычислению турбулентной вязкости в стекловаренной печи с подковообразным пламенем.

В настоящее время проектирование промышленных печей выполняется чаще всего на основе приближенных эмпирических зависимостей. Новые перспективы в этом отношении открывает применение современных методов математического моделирования, позволяющих исследовать численно теплотехнологические процессы, находить оптимальные конструктивные решения и режимы тепловой работы высокотемпературных установок.

Тепломассоперенос в большинстве случаев осуществляется в сплошной жидкой или газообразной среде. Его математические модели, как правило, ориентированы на численное решение достаточно сложных систем дифференциальных уравнений в частных производных. Это, прежде всего, уравнения Навье–Стокса, численное решение которых определяет компоненты скорости среды  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , направленные по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

---

\* Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

Чтобы упростить запись в уравнениях тензорных величин, целесообразно пронумеровать оси координат и соответствующие им компоненты вектора скорости. Тогда в тензорных обозначениях все три дифференциальных уравнения Навье–Стокса для установившегося дозвукового движения газообразной среды могут быть представлены в следующей компактной форме:

$$\frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} g h, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газа,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости,  $h$  – вертикальная координата. Давление  $p$  заменено здесь функцией давления  $\tilde{p}$ , которая вводит в уравнения силу тяжести неявно и однотипно для всех трех осей координат [1, 2]:

$$\tilde{p} = p + \rho g h,$$

Индексы  $i$  и  $j$  принимают значения 1, 2 или 3 в соответствии с нумерацией трех координатных осей. Сумма трех членов, имеющих в уравнении одинаковую структуру, заменяется в тензорной записи одним слагаемым с повторяющимся в нем индексом (в данном случае слагаемые левой части уравнения содержат повторяющийся индекс  $j$ ).

Чтобы учесть влияние на скорость среды распределения давления, в математическую модель вводятся уравнения для расчета функции и поправки давления, значения которых, в свою очередь, зависят от распределения компонент скорости. В результате формируется система взаимозависимых дифференциальных уравнений, для решения которой эффективный численный метод прогонки приходится дополнять многочисленными итерациями, уточняющими коэффициенты дискретных аналогов дифференциальных уравнений.

Численное решение системы уравнений значительно усложняется при моделировании ими турбулентного движения среды. Турбулентный аналог кинематического коэффициента вязкости  $v_t$  обычно определяется по локальным значениям кинетической энергии турбулентности  $k_t$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon_t$  с помощью стандартной двухпараметрической диссипативной модели [3]:

$$v_t = C_\mu k_t^2 / \varepsilon_t, \quad (2)$$

где коэффициент пропорциональности  $C_\mu = 0,09$ .

Значения  $k_t$  и  $\varepsilon_t$  находят в узлах сетки посредством численного решения двух дифференциальных уравнений переноса:

$$\frac{\partial \rho u_j k_t}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho (v + v_t) \frac{\partial k_t}{\partial x_j} \right] = \rho (G_t - \varepsilon_t),$$

$$\frac{\partial \rho u_j \varepsilon_t}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial x_j} \right] = \rho (c_{\varepsilon 1} G_t - c_{\varepsilon 2} \varepsilon_t) \frac{\varepsilon_t}{k_t},$$

где  $G_t$  – скорость генерации энергии турбулентности, значения которой зависят от распределения компонент скорости;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ;  $c_{\varepsilon 1} = 1,44$  и  $c_{\varepsilon 2} = 1,92$  – эмпирические коэффициенты.

Следует иметь в виду, что компьютерное представление чисел выполняется, казалось бы, с небольшой погрешностью их округления, которая заметно возрастает, накапливаясь для совокупности узлов сетки в методе прогонки. Взаимозависимость дифференциальных уравнений в математической модели также приводит к возрастанию погрешности их численного решения. Например, если компоненты скорости, определяемые уравнениями (1), приобретают в итерациях неточные значения, то их погрешности передаются в дифференциальные уравнения модели турбулентности (2). Вычисление компонент скорости в очередных итерациях по уравнениям (1) при заведомо неточных коэффициентах турбулентной вязкости, приводит к возрастанию их случайного отклонения от определяемых значений и, как результат, к замедлению, или даже к прекращению, сходимости итераций.

По образцу такого рода алгоритмов численного исследования высокотемпературных теплотехнологических процессов была разработана математическая модель и моделирующая компьютерная программа обжига керамзита во вращающейся печи [4]. В качестве объекта численного моделирования выбрана вращающаяся печь длиной 40 м с диаметром корпуса 2,5 м при толщине шамотной футеровки 230 мм, угол наклона продольной оси печи к горизонту  $3,5^\circ$  и частоте вращения 0,27 рад/с (2,6 об/мин). Производительность по керамзиту задана равной 7 т/ч при расходе природного газа  $800 \text{ м}^3/\text{ч}$  с теплотой сгорания  $34800 \text{ кДж}/\text{м}^3$ . Предполагалось, что воздух, нагретый до  $320^\circ\text{C}$ , подается по всему свободному поперечному сечению печи при коэффициенте избытка 1,1. Влажность глиняных гранул, поступающих в печь, принята равной 11%.

Трехмерная математическая модель учитывала наличие слоя обжигаемого материала, занимающего четверть окружности печи. Стационарное горение природного газа в диффузионном факеле моделировалось дифференциальными уравнениями переноса массы компонентов горения. Дополнительное дифференциальное уравнение переноса водяного пара позволило рассчитывать увеличение его концентрации в газах и соответствующее снижение их температуры при испарении влаги из поступающих в печь сырьевых гранул.

При расчете температуры внутренней горячей поверхности стен определялись тепловые потоки к ним от газов конвекцией и излучением. Учитывалось также прямое переизлучение футеровки на обжигаемый материал в "окнах" спектра и температурные скачки, возникающие в ней при периодическом поступлении вращающихся стен под слой керамзита. В ходе численного эксперимента приходилось рассчитывать и уточнять физические свойства газообразной среды и обжигаемого слоя, изменяющиеся в процессе нагрева, обжига и вспучивания гранул.

Для численного решения на персональном компьютере системы из двенадцати дифференциальных уравнений в более чем 200 тысячах узлов сетки методом полинейной прогонки потребовалось свыше 12 тысяч итераций, что обеспечило достаточно высокую точность вычисления параметров газообразной среды по всему объему печи.

Результаты численного эксперимента позволяют детально исследовать процессы движения газов, горения и теплообмена, составляющие в совокупности тепловую работу обжиговой печи. Чтобы сформировать короткий теплонапряженный факел, создающий эффективный "тепловой удар" в зоне вспучивания керамзитовых гранул, в математической модели была предусмотрена подача природного газа в печь с высокой скоростью 434 м/с.

Представление об изменении температурного поля по длине и радиусу вращающейся печи дает его графическое изображение на рис. 1. Максимальная температура на фронте пламени в зоне вспучивания керамзита составляет 1800...2000°C, что заметно превышает среднюю температуру газовой среды в поперечных сечениях печи, достигающую в той же зоне 1600°C. Расчетная температура газов на выходе из вращающейся печи 488°C хорошо согласуется с ее эксплуатационными значениями.

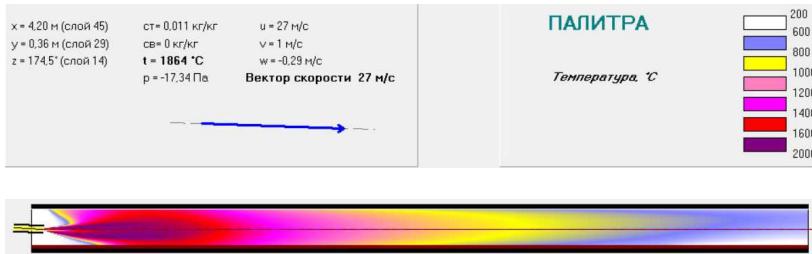


Рис. 1. Компьютерное изображение температурного поля при обжиге керамзита во вращающейся печи

Таким образом, несмотря на то, что погрешность округления чисел привела к замедлению сходимости и увеличению числа расчетных итераций, были получены адекватные результаты математического моделирования обжига керамзита во вращающейся печи. Однако следует иметь в виду, что в более сложных условиях возникают значительные затруднения в программной реализации математической модели высокотемпературных теплотехнологических процессов. В качестве примера приведем здесь опыт численного моделирования диффузионного горения природного газа и радиационно-конвективного теплообмена в стекловаренной печи с подковообразным пламенем [5].

В качестве объекта численного моделирования выбрана стекловаренная печь с бассейном длиной 5,2 м и шириной 3 м. На рис. 2 представлен вид на фронтовую стену печи с прямоугольными окнами в ней для ввода горячего воздуха и отвода газов. Там же схематично изображен продольный разрез области численного моделирования, имеющей достаточно сложную конфигурацию.

Природный газ с теплотой сгорания 35500 кДж/м<sup>3</sup> подается в количестве 180 м<sup>3</sup>/ч со скоростью 102 м/с через сопло диаметром 25 мм в воздушный влет, нижняя часть которого образует своеобразный предтопок длиной 600 мм. Топливное сопло наклонено вверх под углом 5°. Свод воздушного влета установлен под углом 25° к горизонтали, в результате чего поток воздуха, нагретого в регенераторе до 1000°C, приобретает импульс, направленный вниз к бассейну печи. Температура стекломассы в бассейне принята равной 1420°C, температура плавления шихты на поверхности стекломассы 1220°C.

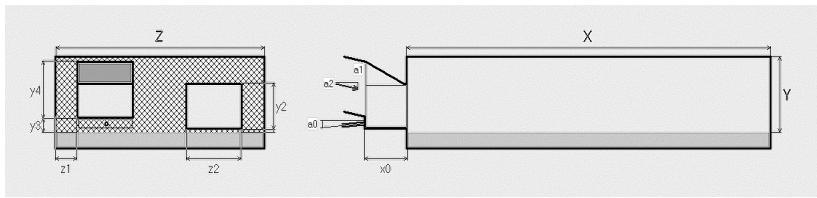


Рис. 2. Изображение стекловаренной печи на экране монитора при вводе исходных данных для численного эксперимента

При численном моделировании диффузионного горения в стекловаренной печи особенно остро всталась проблема выбора и применения работоспособной модели турбулентности. Стандартная модель не обеспечила сходимости итераций при решении системы взаимозависимых уравнений в сложных условиях подковообразного потока высокотемпературных газов. Погрешности вычисления коэффициента турбулентной вязкости по формуле (2) приводили, в конечном счете, к чрезмерно большим колебаниям расчетных значений компонент скорости, вследствие чего прекращалась сходимость итераций.

Поэтому был применен новый алгоритм вычисления турбулентной вязкости, в основу которого положено выражение, представляющее собой модификацию формулы (2):

$$v_t = C_\mu \sqrt{k_t \epsilon_t / e_t} / e_t . \quad (3)$$

Здесь символ  $e_t$  обозначает отношение скорости диссипации энергии турбулентности к величине кинетической энергии турбулентности ( $e_t \equiv \epsilon_t / k_t$ ). Значения  $e_t$  определялись по дифференциальному уравнению, полученному в [6].

Можно показать, что расчет турбулентной вязкости по выражению (3) осуществляется более точно, если принять во внимание, что при умножении и делении величин их относительные погрешности складываются [7]. Так как в ходе итераций, соотношение  $e_t$  изменяется много слабее (по крайней мере, на порядок), чем величины  $\epsilon_t$  и  $k_t$ , то погрешность расчета турбулентной вязкости по выражению (3) снизилась почти втрое по сравнению с формулой (2), что привело к восстановлению сходимости итераций и позволило реализовать численно математическую модель тепломассопереноса в стекловаренной печи.

Результаты применения такого подхода к вычислению турбулентной вязкости в стекловаренной печи с подковообразным пламенем представлены на рис. 3 применительно к изменению турбулентного аналога  $v_t$  кинематического коэффициента вязкости вдоль горизонтальной линии, проведенной от топливного сопла к задней стене стекловаренной печи.

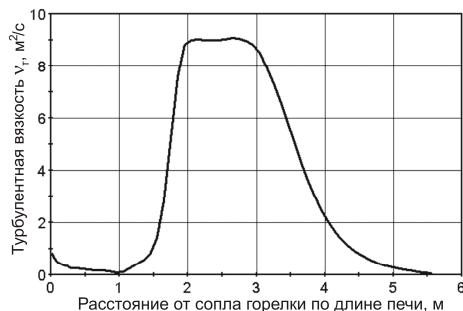


Рис. 3. Изменение турбулентного аналога кинематического коэффициента вязкости газовой среды по длине печи на уровне горелки

Кривая на этом рисунке показывает, что на расстоянии 1...1,4 м от фронтовой стены печи и окна воздушного влета происходит многократное возрастание турбулентной вязкости потока газов вследствие его торможения в тупиковой части рабочего пространства печи. Интенсивность турбулентного смешения природного газа с воздухом при этом существенно повышается, что и приводит в итоге к сгоранию топлива в экстремально коротком диффузионном факеле, вид которого представлен на рис. 4.

Горение природного газа в коротком факеле в среде высоко нагретого воздуха приводит к предельно высокой температуре области горения, достигающей 2300...2500°C на фронте пламени. За пределами короткого факела в застойной части рабочего пространства печи температура газов постепенно понижается, приближаясь к температуре поверхности расплавленной стекломассы. Как известно, именно пониженный уровень температуры в застойной части рабочего пространства, позволяет при эксплуатации стекловаренных печей с подковообразной схемой движения газов создавать зону студки в конце бассейна расплавленной стекломассы.



Рис. 4. Вид сверху на диффузионный факел в стекловаренной печи с подковообразным движением газов

По нашему мнению, принятый в инженерной практике термин "с подковообразным пламенем" не вполне подходит для промышленных печей такого рода. Им более соответствует наименование "печь с подковообразным движением газов", исключающее недостоверное упоминание о форме факела в рабочем пространстве стекловаренной печи.

#### **Библиографический список**

1. Ferziger J.H., Perić M. Computational methods for fluid dynamics. Berlin: Springer, 2002. 423 p.
2. Кузнецов В.А., Кожевников В.П. Математическая модель свободной конвекции воздуха в комнате // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2008. № 7-8. С. 15-27.
3. Пейтэл В.К., Роди В., Шойере Г. Модели турбулентности для течений в пристеночной области с малыми числами Рейнольдса // Аэрокосмическая техника. 1986. № 2. С. 184-197.
4. Кузнецов В.А. Численное моделирование горения и теплообмена при обжиге керамзита во вращающейся печи // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 170-174.
5. Кузнецов В.А., Трубаев П.А. Математические модели тепломассопереноса в высокотемпературных установках. Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. 208 с.
6. Кузнецов В.А., Рязанцев О.А. Применение диссипативной модели турбулентности в неизотермических условиях // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 7-8. С. 29-35.
7. Кузнецов В.А., Рязанцев О.А., Трулёв А.В. Численное моделирование горения и теплообмена в цементной вращающейся печи // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 4. С. 161-164.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНСТРУКТИВНО-ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА КОНВЕКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОТЛОВ ВК-21

проф., д-р.техн.наук **Лукьянов А.В.**

проф., д-р. техн. наук **Качан В.Н.**

Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры, г. Макеевка

**Аннотация.** Представлено математическое описание гидродинамических и массообменных элементарных событий процесса теплообмена в жаротрубных водогрейных котлах на примере ВК-21. Эти события объединены в математическую модель в виде двух балансов: времени пребывания воды и продуктов сгорания и традиционного теплового баланса в объёме котла.

**Постановка проблемы.** Необходимость перерасчёта конструктивных элементов конвективного пучка возникает при поверочном расчёте любого котлоагрегата при замене топлива (его вида, химсостава, теплотворной способности).

Пересчитывать приходится много раз, приближаясь к допустимой невязке, равной 0,5% от  $Q^0 p$  в кДж. Особенно это имеет место в котлах с двухступенчатой передаче теплоты (топка и конвективная часть), например, типа ВК и КВ.

В статье предлагается вариант предварительного расчёта конвективных элементов котла с использованием не только баланса теплоты [2, 3, 4], но и баланса времени пребывания воды и продуктов сгорания по всей цепочке возможных элементов теплопередачи (в фестоне, конвективных пучках, экономайзере и воздухоподогревателях).

Время пребывания воды в рамках объёма котла всегда будет намного большим, чем продуктов сгорания внутри котла. Поэтому внутrikотловой объём воды будет аккумулировать теплоту от десятков таких объёмов продуктов сгорания топлива, проходящих через котёл за время пребывания (нагревания) воды в котле.

Рассмотрим эти балансы в математической форме. Для примера используем самый простой по конструкции жаротрубный водогрейный котёл ВК-21.

Баланс времени нахождения теплоносителя-воды и продуктов сгорания обычно имеет вид

$$\tau_{\text{преб.в}} \gg (\tau_{\text{преб.г.т}} + \tau_{\text{преб.г.х}}), \text{ с}, \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{преб.в}}$  – время пребывания воды в котле, необходимого для нагрева её от  $t_1$  до  $t_2$ , °C;  $\tau_{\text{преб.г.т}}$ ,  $\tau_{\text{преб.г.х}}$  – время пребывания продуктов сгорания мазута в топке и в конвективной части котла, с.

Баланс времени нагрева воды и пребывания газообразных продуктов сгорания в котле можно достичь, используя предложенный нами коэффициент выравнивания времени в виде формулы:

$$K_{\text{вырав}} = \tau_{\text{преб.в}} / (\tau_{\text{преб.г.т}} + \tau_{\text{преб.г.х}}). \quad (2)$$

Тогда уравнение (1) можно представить в виде

$$\tau_{\text{преб.в}} = K_{\text{вырав}} / (\tau_{\text{преб.г.т}} + \tau_{\text{преб.г.х}}), \text{ с.} \quad (3)$$

Для достижения поставленной задачи составим уравнение секундного желаемого баланса теплоты для котла в целом, кДж:

$$Q_{\text{в}} = (Q_{\text{г.т}} + Q_{\text{г.к}}), \text{ кДж}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{г.т}}$  – теплота, переданная воде в топке котла, кДж;  $Q_{\text{г.к}}$  – теплота, переданная воде в конвективной части котла, кДж;  $Q_{\text{в}}$  – теплота, необходимая для нагрева теплоносителя-воды при его постоянном расходе  $G_{\text{в}}$ , кДж.

Тогда

$$Q_{\text{в}} = G_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot \Delta t_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}}, \text{ кДж}, \quad (5)$$

где  $C_{\text{в}}$  – теплоёмкость воды, равная 4,187 кДж/(кг·град);  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta t_{\text{в}} = t_{\text{в.к}} - t_{\text{в.н}}$ , °C.

#### Расчёт времени пребывания:

А) воды в конвективной части:

$$\tau_{\text{преб.в}} = V_{\text{в}} / (S_{\text{меж.пр}} \cdot \omega_{\text{в.меж.пр}}), \text{ с}, \quad (6)$$

где  $S_{\text{меж.пр}}$  – живое сечение межтрубного пространства для прохода воды через конвективную часть котла, м<sup>2</sup>;  $\omega_{\text{в.меж.пр}}$  – скорость движения воды, м/с;  $V_{\text{в}}$  – объём воды в межтрубном пространстве (м<sup>3</sup>)

$$\tau_{\text{преб.г.т}} = V_{\text{в}} / (S_{\text{меж.пр}} \cdot \omega_{\text{г.т.ср}}), \text{ с}, \quad (7)$$

где  $S_{\text{вых.г.т}}$  – живое сечение выхода газа из топки, м<sup>2</sup>;  $V_{\text{г.т.ср}}$  – средняя скорость движения газа в топке, м/с;  $V_{\text{г.т.}}$  – объём дымовых газов в топке, м<sup>3</sup>, который рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{г.т.}} = V_{\text{т}} - V_{\text{фак}} + V_{\text{вход.к}}, \text{ м}^3, \quad (8)$$

где  $V_t$  – объём топки, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{фак}}$  – объём топливного факела, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{вход.к}}$  – объём газа во входном пространстве в конвективную часть, м<sup>3</sup>.

$$V_{\text{вход.к}} = l_{\text{вход}} \cdot 0,786 \cdot D_{\text{вн.к}}^2, \text{ м}^3,$$

где  $l_{\text{вход}} = 0,15 \text{ м}$ .

$$V_t = 0,786 \cdot D_{\text{вн.т}}^2 \cdot L_t, \text{ м}^3,$$

где  $L_t = 2,253 \text{ м}$  – длина топки.

$$V_{\text{фак}} = 1/3 \cdot 0,786 \cdot (0,1^2 + 0,1 \cdot 0,48 + 0,48^2) \cdot L_{\text{фак}}, \text{ м}^3.$$

В этой формуле дан расчёт объёма факела топлива в виде конуса.  
Б) продуктов сгорания в конвективной части котла:

$$\tau_{\text{преб.г.к}} = V_{\text{г.к}} / (\Sigma S_{\text{г.тр}} \cdot v_{\text{г.тр.ср}}), \text{ с}; \quad (9)$$

$$V_{\text{г.к}} = V_{\text{г.т}};$$

$$\Sigma S_{\text{г.тр}} = \pi / 4 d_{\text{вн}}^2 Z, \text{ м}^2; \quad (10)$$

$$v_{\text{г.тр}} = B_p \cdot W_{\text{г.к}} / \Sigma S_{\text{тр.вн}}, \text{ м/с}, \quad (11)$$

где  $B_p = 0,06 \text{ кг/с}$  – секундный расход мазута;  $W_{\text{г.к}} = 12,05 \text{ м}^3/\text{кг}$  – удельный объём продуктов сгорания мазута;  $Z$  – число трубок, шт.;  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубок, м.

В развернутом виде коэффициент выравнивания будет равен

$$\kappa_{\text{вырав.}} = \frac{V_6}{S_{\text{меж.нр}} v_{\text{в.меж.нр}} \left( V_{\text{г.к}} / \left( \Sigma S_{\text{г.тр}} v_{\text{г.тр.ср}} \right) + V_{\text{г.т}} / \left( S_{\text{вых.г.т}} v_{\text{г.тр.ср}} \right) \right)} \quad (12)$$

Далее распишем составляющие теплового баланса (4)

$$Q_v = K_{\text{вып}} \cdot (Q_{\text{г.т}} + Q_{\text{г.к}}), \text{ кДж}. \quad (13)$$

а) поглощение теплоты водой в топке:

$$Q_{\text{г.т}} = B_p \cdot W_{\text{г.т}} \cdot V_{\text{г.т}} \cdot \rho_{\text{г.т.ср}} \cdot \Delta I_{\text{г.т}} / (\Sigma S_{\text{вых.г.т}} \cdot v_{\text{г.т.ср}}), \text{ кДж}, \quad (14)$$

где  $\Delta I_{\text{г.т}}$  – снижение энтальпии продуктов сгорания по длине топки, кДж/кг.

$$\Delta I_{\text{г.т}} = I_{\text{г.ф}} - I_{\text{г.вых.т}}, \text{ кДж/кг}. \quad (15)$$

б) поглощение теплоты водой в конвективной части:

$$Q_{\text{г.к}} = B_p \cdot W_{\text{г.к}} \cdot V_{\text{г.к}} \cdot k_{\text{исп}} \cdot \rho_{\text{г.к.ср}} \cdot \Delta I_{\text{г.к}} / (\Sigma S_{\text{г.тр}} \cdot \psi_{\text{г.тр.ср}}), \text{ кДж}, \quad (16)$$

где  $\rho_{\text{г.к.ср}}$  – средняя плотность дымового газа в конвективной части с учётом снижения температуры от 1054 до 210°C.

Начальную плотность приравниваем к плотности на выходе из топки,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , т.е.

$$\begin{aligned}\rho_{\text{г.т}} &= \rho_{\text{г.к.н}} = 0,265 \text{ кг}/\text{м}^3; \\ \rho_{\text{г.к.ср}} &= 0,5(\rho_{\text{г.к.н}} + \rho_{\text{г.к.к}}), \text{ кг}/\text{м}^3; \\ \rho_{\text{г.к.к}} &= 273/(273+t_{210}), \text{ кг}/\text{м}^3.\end{aligned}$$

Коэффициент использования теплоты

$$\begin{aligned}k_{\text{исп}} &= 1 - (q_{\text{мех.н}} + q_{\text{т.пот}}); \\ k_{\text{исп}} &= 1 - (0,003 + 0,035) = 0,962.\end{aligned}$$

С учётом вышеизложенного, используя формулы (5), (15), (16) для расчёта необходимой теплоты для нагрева воды  $Q_{\text{в}}$  и поглощённой теплоты в топке и конвективной части  $Q_{\text{г.т}}$  и  $Q_{\text{г.к}}$ , запишем основное уравнение конструктивно–поверочного расчёта элементов конвективного пучка:

$$\begin{aligned}C_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot \Delta t_{\text{в}} &= K_{\text{вып}} \cdot B_p \cdot W_{\text{г.к}} \cdot V_{\text{г.к}} \cdot k_{\text{исп}} \cdot [\Delta I_{\text{г.к}} \cdot \rho_{\text{г.к.ср}} / (\Sigma S_{\text{г.тр}} \cdot \psi_{\text{г.тр.ср}}) + \\ &+ \Delta I_{\text{г.т}} \cdot \rho_{\text{г.т.ср}} / (\Sigma S_{\text{вып.г.т}} \cdot \psi_{\text{г.т.ср}})], \text{ кДж}. \quad (17)\end{aligned}$$

Невязка между полезно использованной (левая часть уравнения) и переданной теплоты воде горячим дымом (газом) рассчитывается по формуле:

$$\text{Невязка} = [(\text{правая часть формулы минус левая})/\text{правая}] \cdot 100\%.$$

Ниже приведён контрольный пример конструктивно–поверочного расчёта котла ВК-21 при использовании малосернистого мазута и числовых значений параметров в уравнениях (12) и (17):

а) для ВК-21 взяты для расчёта следующие исходные данные:

$$\begin{aligned}V_{\text{в}} &= 1,89 + 0,176 = 2,07 \text{ м}^3; \\ C_{\text{в}} &= 4,187 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}; \\ \Delta t_{\text{в}} &= 45^\circ\text{C}; \\ \rho_{\text{в}} &= 1000 \text{ кг}/\text{м}^3; \\ B_p &= 0,06 \text{ кг}/\text{с}; \\ W_{\text{г.к}} &= 12,05 \text{ м}^3/\text{кг};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\rho_{\text{вых.г.т}} &= 0,265 \text{ кг/м}^3; \\
V_{\text{г.к}} &= 1,33 \text{ м}^3; \\
\Delta I_{\text{г.к}} &= 19900 - 3240 = 16600 \text{ кДж/кг}; \\
v_{\text{г.тр.ср}} &= 3,03 \text{ м/с}; \\
\Sigma S_{\text{г.тр}} &= 0,15 \text{ м}^2; \\
\Delta I_{\text{г.т}} &= 41000 - 19900 = 21200 \text{ кДж/кг}; \\
S_{\text{вых.г.т}} &= 0,694 \text{ м}^2; \\
v_{\text{вых.г.т}} &= 1,05 \text{ м/с}; \\
v_{\text{г.т.ср}} &= 1,95 \text{ м/с}; \\
S_{\text{меж.пр}} &= 0,834 \text{ м}^2; \\
v_{\text{в.меж.пр}} &= 0,0134 \text{ м/с}; \\
Z &= 152 \text{ трубы.}
\end{aligned}$$

Для более точного расчёта определяем средние по длине топки и трубок скорости движения газов:  $v_{\text{г.т.ср}} = 1,95 \text{ м/с}$ ,  $v_{\text{г.тр.ср}} = 3,03 \text{ м/с}$ .

Рассчитывая коэффициент  $K_{\text{вып}}$  путем подстановки значения параметров в (12) получаем значение 47.

Это значит, что продукты сгорания в котле должны обновиться 47 раз, чтобы нагреть воду разового объёма  $2,07 \text{ м}^3$ .

Подставляем конкретные значения в уравнение (17) и получаем:

$$\begin{aligned}
4,18 \cdot 2,07 \cdot 1,008 \cdot 45 \cdot 1000 &= 47 \cdot 0,06 \cdot 12,05 \cdot 1,33 \cdot 0,962 \times \\
\times [(16600 \cdot 0,42 / (0,15 \cdot 3,03)) + (21200 \cdot 0,14 / (0,694 \cdot 1,95))] \text{, кДж.}
\end{aligned}$$

$$\text{Или } 378000 \neq 47 \cdot 0,925 \cdot (15357 + 2193) = 601000 \text{ кДж.}$$

Сравниваем:  $378\ 000 \ll 601\ 000 \text{ кДж}$ .

Рассчитываем невязку, равную:

$$\text{Невязка} = (601000 - 378000) / 601000 \cdot 100\% = 37\%.$$

Эта невязка очень большая. Что делать? Куда делись 37% теплоты?

Скорее всего с продуктами сгорания ушли в трубу так и не нагрев воду до  $105^\circ\text{C}$ !

Согласно рекомендациям [1, 2] необходимо увеличить поверхность нагрева воды в конвективном пучке, так как теплопередача в топке остаётся постоянной при неизменяемых габаритах котла, качестве и расходе топлива, а также заданного расхода нагреваемого теплоносителя-воды.

Возможны три варианта повышения поверхности нагрева конвективного пучка:

- 1 – увеличение внутреннего диаметра трубок ( $d_{\text{вн}}$ );
- 2 – увеличение количества трубок ( $n_{\text{тр}}$ );
- 3 – увеличение  $d_{\text{вн}}$  и  $n_{\text{тр}}$ .

Проведенные расчеты показали, что для первого варианта (увеличение  $d_{\text{вн}}$  до 64 мм) невязка составила 33%, для второго варианта (увеличение  $n_{\text{тр}}$  до 228 мм) невязка составила 36%, для третьего варианта (увеличение  $d_{\text{вн}}$  до 64 мм и увеличение  $n_{\text{тр}}$  до 228 мм) невязка составила 38%.

Таким образом, достигнутой цели достичь не удалось во всех трёх вариантах увеличения поверхности нагрева. Это подтверждает мнение, что поверхностью нагрева достичь нужной невязки не возможно.

**Предлагается 4-ый вариант - конструктивный.** Если имеется запас слоя изоляции, а его можно предусмотреть при проектировании, то внутренний диаметр конвективной части котлоагрегата увеличиваем на 2 см за счёт уменьшения слоя изоляции  $\Delta\delta_{\text{из}}$  всего на 1 см. Все остальные параметры оставляем такие же, как и в 3-ем варианте.

Учитываем добавку  $2\Delta\delta_{\text{из}}$  к внутреннему диаметру конвективной части котла путём уменьшения толщины слоя изоляции в следующих формулах:

Рассчитываем добавочное сечение и объём межтрубного пространства:

$$\Delta S_{\text{доб}} = \pi/4 [(D_{\text{вн},k} + 2\Delta\delta_{\text{из}})^2 - D_{\text{вн},t}^2], \text{ м}^2;$$

$$\Delta V_{\text{доб}} = \Delta S_{\text{доб}} \cdot L_{\text{k,тр}} + D_{\text{вн},k}^2 \cdot L_{\text{торц}}, \text{ м}^3.$$

Определяем новый объём воды:

$$V_{\text{в,межтр}}^{\text{н}} = V_{\text{в,межтр}} + \Delta V_{\text{доб}}, \text{ м}^3.$$

Рассчитываем скорость её движения и время пребывания:

$$v_{\text{в,меж,пр}}^{\text{н}} = G_{\text{в}} / ((S_{\text{меж,тр,пр}} + \Delta S_{\text{доб}}) \cdot \rho_{\text{в}}), \text{ м/с.}$$

В данном случае изменятся:  $V_{\text{в}} = 0,455 \text{ м}^3$ ;  $v_{\text{в,меж,пр}} = 0,058 \text{ м/с}$ ;  $S_{\text{меж,тр,пр}} = 0,19 \text{ м}^2$ ;  $v_{\text{г,тр,ср}} = 0,99 \text{ м/с}$ ;  $\Sigma S_{\text{г,тр}} = 0,73 \text{ м}^2$ ;  $Z = 228$  трубок.

Тогда

$$\tau_{\text{преб.в}} = 0,455 / (0,19 \cdot 0,058) = 41 \text{ с};$$

$$\tau_{\text{преб.г.т}} = 1,33 / (0,694 \cdot 1,95) = 1,9 \text{ с};$$

$$\tau_{\text{преб.г.к}} = 1,33/(0,73 \cdot 0,99) = 1,84 \text{ с};$$

$$k_{\text{вырав}} = 41/(1,9+1,84) = 11 \text{ раз.}$$

Подставим новые параметры в основное уравнение (17):

$$4,18 \cdot 0,455 \cdot 1,008 \cdot 45 \cdot 1000 = 11 \cdot 0,06 \cdot 12,05 \cdot 1,33 \cdot 0,962 \cdot [(21200 \cdot 0,14 / (0,694 \cdot 1,95) + 16600 \cdot 0,42 / (0,73 \cdot 0,99)].$$

Или 83 700 кДж ≈ 84 530 кДж.

Поэтому невязка будет малой и равной:

$$\text{Невязка} = (84530 - 83700) / 84530 \cdot 100\% = 0,98\%.$$

### Выводы

1. Самым приемлемым вариантом достижения нормативной невязки является вариант с использованием баланса мощностей.
2. Путём увеличения поверхности нагрева воды (3-й вариант) и уменьшения толщины изоляционного слоя всего на 1 см удалось снизить невязку до 0,98%, что почти соответствует требуемым значениям 0,5%. Если уменьшить  $\Delta_{\text{из}}$  до 0,8 или 0,9 см невязка достигнет 0,5%. Такой подход может быть приемлемым и для других типов котлов.
3. Полученный  $k_{\text{выр}} \approx 10 \dots 12$  оказался близким к оптимальному для котлов типа ВК-21 при использовании низкосернистого мазута и высококалорийного газа.
4. Работа будет продолжена с целью оптимизации поверочного расчёта элементов конвективной части котла ВК-21 на ЭВМ для использования в курсовых и дипломных работах.
5. Ожидается, что путём оптимизации конструктивных элементов котлоагрегатов разных типов КПД можно повысить на 1...3%.

### Библиографический список

1. **Лукьянов А.В.** Теплогенераторы для локальных систем теплоснабжения. Макеевка: Изд. ДонГАСА, 2003. 156 с.
2. **Кузнецов Н.В., Митор В.В.** Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Изд. Энергия, 1973. 296 с.
3. **Частухин В.И.** Тепловой расчет промышленных теплоагрегатов. К.: Изд. Вища школа, 1980. 183 с.
4. **Скрыпников В.В.** Энергосберегающая технология системы микроклимата промышленного объекта. Днепропетровск: Изд. РИО ПГАСА, 2004. 205 с.

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

инженер-конструктор **Назмеев Э.Р.<sup>1</sup>**

канд. техн. наук, доц. **Гусячкин А.М.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*ООО НПП «Агрегат», г. Казань*

<sup>2</sup>*Казанский государственный энергетический  
университет, г. Казань*

**Аннотация.** Представлены модульная схема и описание работы регулятора давления с функцией автоматического прерывания потока газа при отклонении выходного давления от допустимых значений, разработанный в ООО НПП «Агрегат». Приведены принципиальная схема стенда и результаты испытаний регулятора на работоспособность.

В России нередки несчастные случаи из-за утечек газа в быту и на производстве. Одним из ярких примеров является произошедшее в ноябре 2014 года, когда в результате поломки регулятора давления в 28 домах города Москвы произошла утечка бытового газа, в 14 из них были взрывы и пожары. Утечка произошла вследствие того, что газ высокого давления не был понижен регулятором до нужного уровня при поступлении в сеть низкого давления, и бытовые газовые приборы, не рассчитанные на высокое давление, вышли из строя и дали утечку [1].

Для предотвращения подобных аварий необходимо разработать регуляторы давления газа, обладающие надежностью, высокими рабочими характеристиками и оснащенные функцией автоматического прерывания потока газа при аварийном отклонении выходного давления от заданных значений.

В основном регуляторы делятся на два типа: поршневые и мембранные. Мембранные регуляторы давления обладают высокой надежностью, они не подвержены отказам, носящим внезапный характер, но имеют серьезные недостатки: недостаточную долговечность, связанную, прежде всего, с процессом естественного старения резины с течением времени, и высокую себестоимость.

Поршневые регуляторы имеют следующие преимущества: срок службы самого поршня практически неограничен, замене подлежат только уплотнения и сальники; исключается такой вид отказов, как постепенный износ, связанный со старением материалов, и поршневые регуляторы проще в изготовлении и дешевле мембранных [2].

В ООО НПП «Агрегат» (г. Казань) разработан модуль спаренных регуляторов МСР РДП ПЗК-50-1 [3], оснащенный функцией автоматического прерывания потока газа при аварийном отклонении выходного давления от заданных значений (рис. 1).

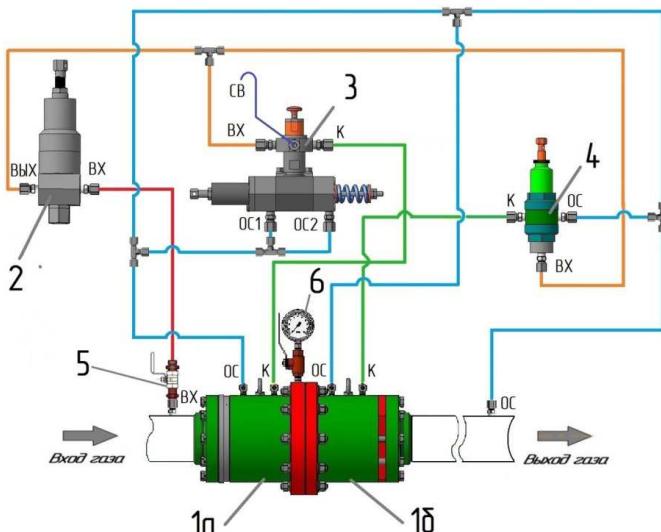


Рис. 1. Модульная схема МСР РДП ПЗК-50-1:

1 – устройство исполнительное (1 $\alpha$  – регулятор-отсекатель, 1 $\beta$  – регулятор - рабочий); 2 – входной редуктор; 3 – устройство следящее; 4 – устройство командное; 5 – кран шаровый; 6 – манометр.

В исходном состоянии оба регулятора давления исполнительного устройства (отсекатель и рабочий) закрыты под действием пружины. Газ высокого давления из входного трубопровода подается на вход отсекателя 1 $\alpha$ . При открытии шарового крана 5, входное давление передается на вход входного редуктора 2, где происходит его редуцирование до давления, достаточного для открытия исполнительного устройства. В входном редукторе 2 формируется командное давление, которое затем передается в полости следящего 3 и командного 4 устройств.

В полость К устройства исполнительного 1 $\alpha$  командное давление подается из следящего устройства 3. При этом происходит открытие

исполнительного устройства 1а. Под воздействием командного давления, поршень с жестко закрепленным с ним клапаном, пересилив действие пружины, начинает движение на открытие клапана, образуя проход газа между клапаном и уплотнением, который попадает на вход устройства исполнительного 1б. Контроль открытия устройства исполнительного 1а осуществляется манометром 6, который расположен между исполнительными устройствами 1а и 1б. На входе и на выходе устройства исполнительного 1а давление одинаковое.

Редуцирование газа в устройстве исполнительном 1б регулятора происходит за счет его дросселирования в щели, образованной клапаном и прокладкой затвора.

Устройство командное 4 устанавливает необходимое командное (управляющее) давление, которое поступает от устройства командного в полость «К» устройства исполнительного 1б. Под действием командного давления поршень и клапан перемещаются влево, при этом образуется необходимый зазор между клапаном и прокладкой затвора, обеспечивающий требуемое выходное давление на выходе из устройства исполнительного 1б.

Выходное давление из выходного трубопровода передается в полости «ОС» устройств исполнительных 1а и 1б для осуществления обратной связи.

При достижении равновесия всех сил, действующих на поршень, клапан устанавливается в определенном равновесном положении при установленном расходе газа и заданном выходном давлении.

При возрастании давления в выходной магистрали выше заданного, происходит перемещение поршня и клапана устройства исполнительного 1б вправо (закрытие), уменьшая проходное сечение щели. При уменьшении выходного давления относительно заданного происходит перемещение поршня и клапана влево (открытие), увеличивая проходное сечение щели. Таким образом, обеспечивается постоянство величины заданного выходного давления.

Выходное давление (ОС), которое надо отслеживать, подается в полости ОС1 и ОС2 устройства следящего 3 и в полость ОС устройства исполнительного 1а. При отклонении выходного давления от заданных значений, между полостями ВХ и К устройства следящего, перекрывается подача командного давления на устройство исполнительное 1а. Одновременно с этим открывается проход между полостями К и СВ, происходит сброс командного давление на «свечу» из полости К устройства исполнительного 1а. Под воздействием выходного

давления в полости ОС и пружины устройства исполнительного 1б закрывается клапан, отсекая поток газа в трубопровод после себя.

После изготовления регуляторов необходимо произвести их настройку и проверку работоспособности. Для этого нами в ООО НПП «Агрегат» был разработан и изготовлен стенд для проверки и настройки регуляторов давления газа (рис. 2).

В ресивере Е1 создается необходимое для испытаний регуляторов высокое давление газа (воздух) компрессором К1. Из ресивера Е1 воздух через шаровый кран К Ш1 подается к испытуемому регулятору РД1 и затем через вентили КШ2 выбрасывается в атмосферу. Блок вентилей КШ2 позволяет имитировать изменение расхода и давления газа в распределительной системе газоснабжения. Повышая давление после регулятора с помощью вентилей КШ2 сначала производят настройку регулятора на необходимое давление, а затем проверяют работоспособность и стабильность работы регулятора.

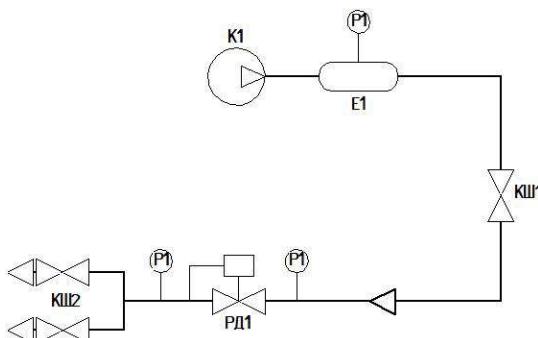


Рис. 2. Принципиальная схема стенда для проверки регуляторов давления газа: Е1-рессивер; Р1-манометры показывающие; К1-компрессор; РД1- испытуемый регулятор давления; КШ1-кран шаровый; КШ2- вентили регулировочные

На рис. 3 представлены результаты испытания регулятора давления газа МСР РДП ПЗК-50-1, рабочее давление которых на входе не более 10 МПа, на выходе 0,3-3,0 МПа, температура газа на входе может меняться от -10 до +70°C, температура окружающей среды от -60 до +40°C. Регулятор был настроен на номинальное давление на выходе 1,0 МПа. Он предназначен для регулирования давления газа в газораспределительных системах высокого давления.

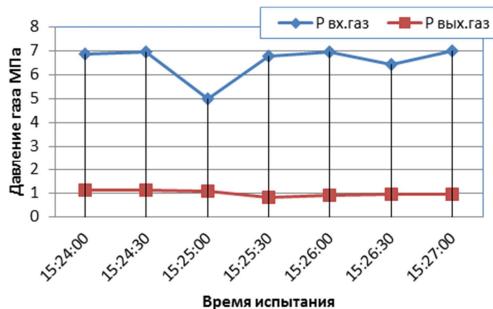


Рис. 3. Результаты испытания регулятора давления газа МСР РДП ПЗК-50-1

Среднеарифметическое значение выходного давления при нестабильном входном давлении за время испытаний составил 0,992 МПа, то есть имеется незначительное отклонение от номинала. Наибольшее отклонение выходного давления в меньшую сторону от номинального значения составил 0,163 МПа (16,3%) при резком снижении входного давления на 2,0 МПа. Через 30 сек. это отклонение составило 0,08 МПа. Наибольшее превышение номинального значения выходного давления составил 0,13 МПа. Основное (стандартное) отклонение выходного давления составляет 0,11 МПа. Эти результаты соответствуют требованиям СП 62.13330.2011 к газораспределительным системам высокого давления 1 категории.

Регулятор также стабильно поддерживал выходное давление при переменном расходе газа из выходного трубопровода. При изменении выходного давления выше заданных параметров срабатывал предохранительно-запорный клапан и прекращалась подача газа в газораспределительную сеть. Таким образом, регуляторы МСР РДП ПЗК-50-1 соответствуют заявленным техническим характеристикам и имеют высокую стабильность работы.

### Библиографический список

1. Российская газета [Электронный ресурс]. URL: <http://rg.ru/2014/11/18/gaz.html>.
2. Ионин А.А. Газоснабжение: Учеб. для вузов. М.: Стройиздат, 1989. 439 с.
3. Пат. 147597 Рос. Федерация, МПК G05D 16/00. Регулятор-усилитель спаренный / А.И. Кривошеев, А.А. Макаров, А.Н. Афанасьев, А.Р. Фаляхов; заявитель и патентообладатель ООО НПП «Агрегат». № 2014104866/28; заявл. 11.02.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 31.

## **ЦИКЛОН, КАК СПИРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА**

канд. техн. наук, доц. **Орлов С.М.**  
д-р техн. наук, проф. **Лукьянин А.В.**  
*Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры г. Макеевка*

**Аннотация.** Проведен анализ процессов, протекающих в циклоне, с наиболее характерной спиральной структурой в природе как торнадо. Установлено, что многие процессы в циклоне и торнадо аналогичны. Имеется существенное различие в масштабах явления и в уровне электромагнитных процессов, протекающих в циклоне и торнадо. В нашей стране применяются циклоны как «правого», так и «левого» направления вращения газового потока, в то время как вихрь в торнадо в северном полушарии направлен против часовой стрелки. Рассмотрены существующие теории, описывающие существование торнадо. Сделан вывод, что применение циклонов с «левым» направлением вращения в северном полушарии Земли предпочтительней, поскольку гидравлическое сопротивление их ниже, чем циклонов с «правым» направлением вращения, а соответственно и ниже энергетические затраты при очистке газа от пыли.

Техника обеспыливания характеризуется большим разнообразием конструкций и форм исполнения обеспыливающего оборудования.

Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей, которые, как правило, имеют простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации. Ввиду этих преимуществ циклоны получили широкое распространение. Наиболее важной характеристикой циклона является его производительность и гидравлическое сопротивление, которое играет существенную роль в энергозатратах на очистку газа от пыли.

Цель работы – поиск и обоснование наиболее простых методов снижения гидравлического сопротивления циклонов и как следствие, снижение энергетических затрат на очистку газа от пыли.

Для того чтобы приступить к решению данной задачи необходимо детально рассмотреть работу циклона и все процессы, протекающие в нем. Циклон представляет собой искусственно созданную спиральную структуру. Искусственность заключается в том, что создание спиральной структуры в циклоне происходит не естественным путем, например, как торнадо, а искусственным, за счет придания вращательного потока в циклоне при помощи завихрителей различной конструкций.

Сpirальныe структуры встречаются в природе достаточно часто. Если внимательно присмотреться к объектам природы, то можно убедиться, что спиральную структуру принимают те или иные предметы или явления природы. Так стволы деревьев закручиваются в спиральную структуру, поэтому при обработке древесины существует понятие по шерсти, против шерсти. Наиболее характерные явления природы, которые можно наблюдать, это водовороты на реке, торнадо, где воздух закручивается в мощные восходящие спиральные структуры. Примеров, которым соответствуют спиральные структуры, можно привести еще достаточно много.

Теорий, почему образуются спиральные структуры достаточно много, однако единой четкой теории, почему образуются такие образования, до сих пор отсутствуют.

Первой попыткой объяснить явление торнадо (это явление наиболее близко подходит к процессам, происходящим в циклоне) была предпринята при помощи теории Кориолисовой силы и конвекционных потоков воздуха [1].

Так же имеются следующие теории:

1. Электромагнитная теория торнадо [2]. Смерч (торнадо) рассматривается как плазменно-капельное образование, которое возникает в атмосфере под сильно электризованным грозовым облаком и присутствия магнитного поля Земли. Это не, что иное, как спиральное движение заряженных частиц вдоль силовых линий магнитного поля Земли.

2. Плазменная теория смерча [3]. В работе предложен механизм образования и построена плазменная теория смерча. Смерч рассматривается как стационарный газовый разряд, который создается капельным облачным зарядом. Найдены электрические поля, токи, электромагнитные силы, поля скоростей.

3. Электромагнитогидродинамическая теория смерча (ЭМГД) [4]. В этой теории показано, что одной из причин возникновения торнадо может служить взаимодействие электрических и магнитных полей с электрически заряженной средой материнского облака. В пользу такого подхода говорят многочисленные наблюдения, которые свидетельствуют о протекании интенсивных электрических процессов в воронке торнадо и вблизи неё.

4. Интегральная электромагнитогидродинамическая и термическая теория (ИЭМГДТ) [5].

Авторами были проведены ряд экспериментов на основе помешения модели Земли в сосуд с электропроводной жидкостью [5]. Проведенные эксперименты имеют много аналогий с Землей.

На основании выше перечисленного, авторы приходят к выводу, что сила Кориолиса и электрические токи в атмосфере в сочетании с магнитным полем Земли действуют совместно.

В литературе [6] сделано обоснование теснейшей взаимосвязи спиральных образований с электромагнитными взаимодействиями. Это утверждение основывается на глубоком анализе различных друг от друга явлений природы и обширного экспериментального материала, что и позволяет сделать вывод о близкой связи электродинамики со спиральными структурами для многих явлений природы.

В имеющихся теориях объясняется закономерности протекания наиболее распространенных явлений торнадо, которые по физической сущности наиболее наглядно отображают процессы, протекающие в циклонах, несмотря, что в процессах имеются и существенные различия.

Изобразим винтовые линии тока при отсутствии стенок циклона (рис.1, а). На рис. 1, б изображена фотография торнадо. Как видно из приведенного рисунка, процессы, протекающие в циклоне и в торнадо, внешне схожи. Как в циклоне, так и в торнадо имеется ядро вихря, которое вращается по законам твердого тела с постоянной угловой скоростью.

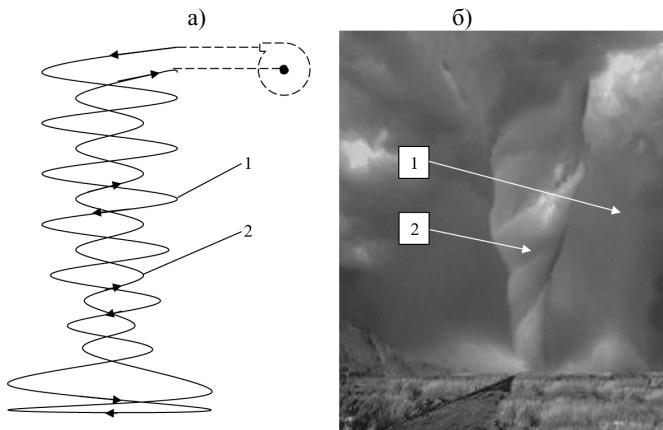


Рис.1. Винтовые линии тока при отсутствии стенок циклона (а) и нисходящие «1» и восходящие «2» винтовые линии тока торнадо (б)

Разрежение в центре восходящего ядра наибольшее, что позволяет торнадо поднимать на большую высоту достаточно тяжелые предметы (машины, дома и др.), в циклоне по этой же причине наблюдается проскок достаточно больших частиц пыли. Разница состоит только в масштабах: тангенциальная скорость в циклонах редко превышает 20 м/с, а тангенциальная скорость в торнадо может достигать сверхзвуковых скоростей; аналогично и для давлений, в циклоне перепад давления редко превышает 2000 Па, в торнадо эта величина может достигать десятых долей атмосфер [7].

Известно, что циклоны применяются как «левого» так и «правого» направления вращения потока, то есть по часовой и против часовой стрелки. В северном полушарии Земли направление вращения спиральных структур происходит против часовой стрелки.

В работе [7] проанализировав существующие теории торнадо, пришли к выводу, что, несмотря на схожесть процессов в торнадо и циклонах есть и существенные отличия. Процессы, протекающие в циклонах, помимо масштабов, происходят в пространстве, ограниченном стальными стенками циклона, и при отсутствии сильно электризованного материнского грозового облака, поэтому в циклонах будет действовать только сила Кориолиса, которая будет направлена по ходу вращения вихря в циклоне или встречно. Таким образом, сила Кориолиса будет способствовать уменьшению гидравлического сопротивления циклона с «левым» направлением вращения в северном полушарии Земли, а соответственно и снижению энергетических затрат при очистке газа от пыли.

На рис. 2 показано процентное увеличение гидравлического сопротивления циклонов «правого» направления вращения по сравнению с циклонами «левого» направления вращения в зависимости от диаметра циклона. Показаны наиболее распространенные виды циклонов типа ЦН11. Расчеты производились из учета действия только силы Кориолиса для широты города Донецк. Как показывает расчет, влияние силы Кориолиса на гидравлическое сопротивление циклонов различного направления вращения незначительное и практического значения не имеет.

Однако проведенные эксперименты с циклонами ЦН11-300 подтвердили, что действительно циклоны с «левым» направлением вращения имеют меньшее гидравлическое сопротивление, чем циклоны с «правым» направлением вращения.

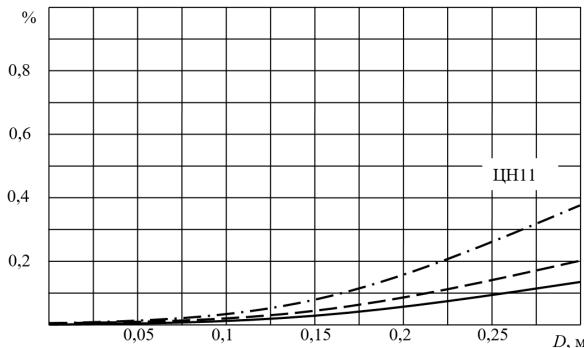


Рис. 2. Зависимости процентной разности гидравлического сопротивления от диаметра циклонов: ----- -- расчетная характеристика; ----- - экспериментальная без пыли; — - — — экспериментальная с пылью

Эксперимент проводился на лабораторной установке, в которой циклоны «правого» и «левого» вращения были установлены последовательно (рис. 3). Соединения в лабораторной установке были сделаны герметично, что исключило возможность подсоса воздуха в циклоны. Измерялись статические давления во входных и выходных патрубках циклонов и динамическое давление в воздуховоде между циклонами.

Гидравлическое сопротивление циклонов определялось как разница полных давлений во входном и выходном патрубках каждого циклона. Эксперимент показал, что гидравлическое сопротивление циклона с «левым» направлением вращения меньше расчетного практически в полтора раза при отсутствии пыли.



Рис. 3. Экспериментальная установка

Наличие пыли в циклоне увеличивает данное расхождение уже более значительно. Имеющееся расхождения можно объяснить тем, что циклон в лабораторной установке был изготовлен из тонколистовой стали и, поэтому магнитное поле Земли экранировалось незначительно. В составе атмосферы, особенно в приземном слое, присутствуют ионы, которые являются носителями электричества. При наличии в циклоне пыли, которая при нахождении в мощном вихревом потоке подвержена сильной электризации, эффект движения заряженных частиц в постоянном магнитном поле проявляется в большей степени, чем при чистой атмосфере [6]. Данный эксперимент подтверждает теорию теснейшей взаимосвязи спиральных образований с электромагнитными взаимодействиями.

### **Выводы**

1. Установлено, что процессы, протекающие в циклонах и в таком спиральном образовании как «торнадо», во многом схожи, однако и имеются существенные различия.
2. Показано, что при наличии наэлектризованной пыли в циклоне и взаимодействии ее с магнитным полем Земли наблюдается снижение гидравлического сопротивления циклона с «левым» направлением вращения.
3. Установлено, что если изготовить циклон из материала, не экранирующего магнитное поле Земли, можно добиться еще большего снижения гидравлического сопротивления циклона с «левым» направлением вращения, и снизить энергетические затраты на очистку газа.

### **Библиографический список**

1. **Бялко А.В.** Наша планета. Земля. Библиотечка «Кванта». М.: Изд. Наука, 1989. Вып. 29. 209 с.
2. **Боеv А.Г.** Электромагнитная теория смерча. I ч. Электродинамика вихря // Радиофизика и радиоастрономия, 2009. Вып. № 2. С.121-149.
3. **Боеv А.Г.** Плазменная теория смерча // Вопросы атомной науки и техники. 2008. Вып. 6. С.133-138.
4. **Меркулов В.И.** Электрогравидинамическая модель НЛО, торнадо и тропического урагана. Новосибирск: Изд. Института математики, 1998. 287 с.
5. Секрет вращения земли и причины возникновения циклонов, тайфунов, торнадо [Электронный ресурс] / Н.В. Косинов, В.И. Гарбрук, Л.В. Косинов. 2014. 11с. URL: <http://www.kazedu.kz/referat/64697> (дата обр. 12.08.2017).
6. **Торшин В.В.** Спиральные образования в природе и электродинамике. М.: Изд. ЦП ВАСИЗДАСТ, 2008. 251 с.
7. **Орлов С.М.** Энергосберегающие технологии при очистке газа от пыли в циклонах // Вестник Луганского Государственного университета имени Владимира Даля. 2016. Вып. 2. С.97-101.

# **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТЭЦ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ**

д-р техн. наук, чл.-кор. РАН **Сергеев В.В.**  
канд. техн. наук, доцент **Амосов Н.Т.**  
канд. техн. наук, доцент **Аникина И.Д.**  
*Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

**Аннотация.** Статья посвящена анализу эффективности совместной эксплуатации теплонасосных установок большой мощности и генерирующего оборудования теплоэлектроцентралей с учетом режимов работы ТЭЦ. Все расчеты производились для паротурбинной ТЭЦ, состоящей из пяти блоков с турбинами Т-100, работающей в открытой системе теплоснабжения. Рассматривалась схема применения теплового насоса большой мощности для подогрева подпиточной воды теплосети перед вакуумными деаэраторами. Оценка производилась методами имитационного моделирования четырех характерных режимов работы ТЭЦ с тремя вариантами использования теплоты от теплового насоса. Максимальный эффект достигается при применении тепловых насосов для дополнительного отпуска теплоты от ТЭЦ для зимнего режима работы с малыми отопительными нагрузками: снижение удельных расходов условного топлива на отпуск теплоты и выработку электроэнергии достигает 8,1 % и 0,7% соответственно.

Высокая энергоемкость производимой продукции является одной из наиболее значимых проблем, требующей качественных изменений в сфере энергетики. На теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) это должно отражаться в снижении удельных затрат условного топлива на выработку электроэнергии и отпуск теплоты. Этого можно достичь с помощью усовершенствования режимов работы станции (определение эффективных режимов работы оборудования, контроль технико-экономических показателей работы ТЭЦ и т.д.) или же с помощью внедрения установок, утилизирующих сбросную теплоту и передающих ее в цикл, например, тепловых насосов (ТН). Технология получения теплоты с применением ТН известна с 1824 г., когда Карно сформулировал в своей диссертации принцип действия теплового насоса [1]. Массовое применение ТН за рубежом началось во второй половине двадцатого века. В России же до сих пор применение ТН является редкостью, связано это, в первую очередь, с традиционным предпочтением централизованного теплоснабжения на базе теплофикации

онных режимов работы. Идея применения ТН в теплофикационном цикле является, на первый взгляд, привлекательной, но требующей тщательного анализа особенностей режимов работы ТЭЦ.

Цель работы – произвести анализ эффективности совместной эксплуатации теплонасосных установок большой мощности в технологических схемах ТЭЦ с учетом режимов работы станции.

Эффективность применения ТН в тепловой схеме ТЭЦ определяется расчетом его влияния на эффективность режимов работы станции с одновременным определением характеристик ТН.

Произведем такую оценку для теплоэлектроцентрали, состоящей из пяти паротурбинных блоков с турбинами Т-100. ТЭЦ работает в открытой системе теплоснабжения и характеризуется большими расходами подпиточной воды теплосети. Поэтому для оптимального применения ТН была выбрана схема подогрева подпиточной воды теплосети на выходе из встроенных пучков конденсаторов турбин перед вакуумными деаэраторами (рис. 1).

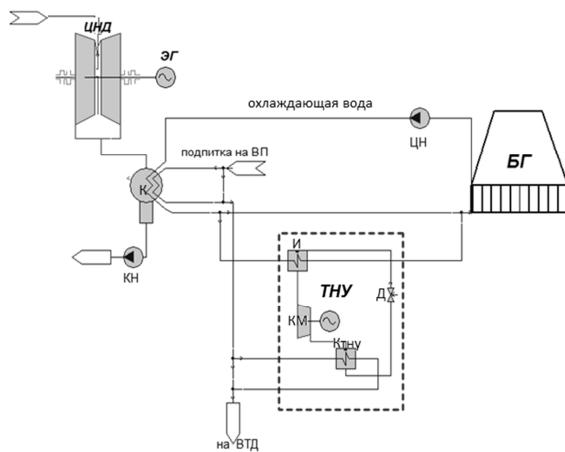


Рис. 1. Схема теплонасосной установки для подогрева подпиточной воды теплосети. ЦНД – цилиндр низкого давления; ЭГ –генератор электроэнергии; К – конденсатор паровой турбины; КН – конденсатный насос; ВП – встроенный пучок конденсатора; ЦН – циркуляционный насос; БГ – башенная градирня; ТНУ – теплонасосная установка; И – испаритель ТН; КМ –компрессор ТН, Ктну – конденсатор ТН; Д - дроссельный вентиль ТН; ОКБ – охладитель конденсата бойлера; ВТД – «высокотемпературная деаэрация»

Для данной ТЭЦ были проанализированы следующие режимы работы, являющиеся характерными: зимний режим с большим (I режим) и малым (II режим) отпуском теплоты, режим периодического протапливания (III режим) и летний режим (IV режим). Расчеты производились для схем без применения ТН и схемы с использованием простейшей схемы парокомпрессионного теплового насоса с отпуском теплоты для подогрева подпиточной воды теплосети. Отпуск теплоты от теплового насоса выбирался равным 50 МВт для зимних режимов и режима периодического протапливания, для летнего режима он составил 25 МВт. Для определения изменения режимов работы тепловыми насосами использовались методы имитационного моделирования режимов работы ТЭЦ в САПР «United Cycle» [2,3].

Удельные рассчитывались по физическому (балансовому) методу, который в настоящее время применяется на территории Российской Федерации [4].

Рассматривалось три варианта использования теплоты, произведенной тепловым насосом, на ТЭЦ:

- для дополнительного отпуска теплоты от ТЭЦ ( $\uparrow Q_{\text{от}}$ ), при этом выработка электроэнергии и расход топлива на ТЭЦ не изменились;
- для дополнительного производства электроэнергии ( $\uparrow N_{\text{вып}}$ ) на клеммах генераторов паровых турбин, за счет снижения отпуска теплофикационных отборов турбин, при неизменном отпуске теплоты в теплосеть и расходе топлива на ТЭЦ;
- для снижения расхода топлива ( $\downarrow B_p$ ), сожженного в энергетических котлах, при этом выработка электроэнергии и отпуск теплоты на ТЭЦ не изменились [5].

На рис. 2 представлено сравнение затрат электроэнергии на собственные нужды ТН ( $N_{\text{тн}}$ ) и величины дополнительно произведенной электроэнергии ( $\Delta N_{\text{вып}}$ ) при применении ТН для снижения отпуска теплофикационных отборов турбин для четырех характерных режимов работы. Затраты электроэнергии на собственные нужды ТН включают в себя затраты электроэнергии на привод компрессора ТН и затраты на прокачку источника низкопотенциальной теплоты к ТН и потребителя тепла от ТН.

Диаграммы с изменениями удельных расходов условного топлива на выработку электроэнергии и отпуск теплоты для четырех характерных режимов работы ТЭЦ по трем вариантам использования теплоты от ТН представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно. Из рисунков

видно, что для большинства режимов при использовании ТН на ТЭЦ возрастают удельные расходы условного топлива на выработку электроэнергии за счет увеличения затрат собственных нужд электроэнергии на ТН.

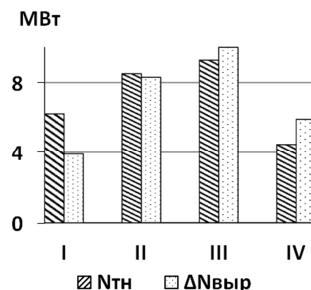


Рис. 2. Сравнение затрат электроэнергии на собственные нужды теплового насоса( $N_{th}$ ) и величины дополнительно произведенной электроэнергии ( $\Delta N_{бвир}$ )

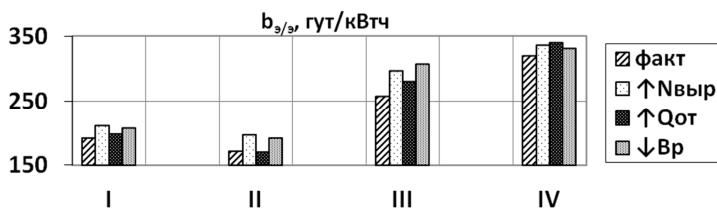


Рис. 3. Изменение удельных расходов условного топлива на выработку электроэнергии ТЭЦ при применении ТН

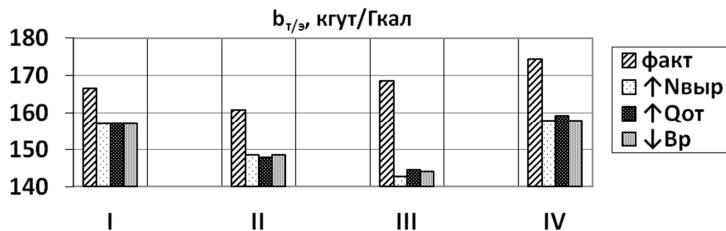


Рис. 4. Изменение удельных расходов условного топлива на отпуск теплоты при применении ТН

Максимальное улучшение технико-экономических показателей достигается при применении тепловых насосов для дополнительного отпуска теплоты от ТЭЦ для зимнего режима работы с малыми отопительными нагрузками: снижение удельных расходов условного топлива на отпуск теплоты и выработку электроэнергии достигает 8,1% и 0,7% соответственно.

**Выводы.** Совместная эксплуатация тепловых насосов и основного оборудования теплоэлектроцентралей является перспективным направлением современной энергетики, требующим тщательного анализа изменения режимов работы ТЭЦ. Для ТЭЦ, работающих в открытых системах теплоснабжения, перспективной является схема применения теплового насоса большой мощности для подогрева подпиточной воды теплосети. Оценка производилась методами имитационного моделирования четырех характерных режимов работы ТЭЦ с тремя вариантами использования теплоты от теплового насоса. Для большинства режимов работы паротурбинной ТЭЦ применение тепловых насосов увеличивает затраты условного топлива на выработку электроэнергии. Максимальный эффект достигается при применении тепловых насосов для дополнительного отпуска теплоты от ТЭЦ для зимнего режима работы с малыми отопительными нагрузками: снижение удельных расходов условного топлива на отпуск теплоты и выработку электроэнергии достигает 8,1 % и 0,7% соответственно.

### **Библиографический список**

1. Янтовский Е. И., Пустовалов Ю.В. Парокомпрессионные теплонасосные установки. М.: Энергоиздат , 1982. 144 с.
2. Demidov O. I. Kutakhov A.G. Romanov S.N. Simulation of AVV1 st Power Plant with United Cycle Software // ECOS-2003. Kopengagen, 2003. Р. 1697-1704.
3. Тепловые схемы ПГУ: автоматизация конструирования и расчета / В.М. Боровков, О.И. Демидов, А.Г. Кутахов, С. Н. Романов // Электрические станции. 1994. № 7. С.36-40.
4. Чучуева И.А. Вычислительные методы определения удельных расходов условного топлива ТЭЦ на отпущенную электрическую и тепловую энергию в режиме комбинированной выработки // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 2. С. 135-165.
5. Тепловые насосы в схемах деаэрации подпиточной воды ТЭЦ / И.Д. Аникина, В.В. Сергеев, Н.Т. Амосов, М.Г. Лучко //Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 2 (243). С. 24-33.

# **ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КПД МНОГОКОНТУРНОЙ ТЕПЛОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ**

д-р техн. наук, проф. Степанов С.Ф.

канд. техн. наук, доц. Коваленко В.В.

аспирант Коваленко П.В.

*Саратовский государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов*

**Аннотация.** В статье рассматривается многоконтурная газотурбинная электростанция с тремя независимыми контурами выработки электроэнергии и системой управления генераторов при работе на общую нагрузку. Повышение электрического КПД в данной теплосиловой установке происходит за счет применения низкокипящих теплоносителей.

Как известно, разумной альтернативой централизованного энергоснабжения является так называемая «малая энергетика», для которой принципиальным является вопрос повышения эффективности работы автономных источников тепловой и электрической энергии малой мощности до уровня эффективности, существующего в настоящее время в энергосистеме. Основой «малой энергетики» выступают автономные энергетические системы, одним из перспективных источников энергии для которых видятся микротурбины, разработки которых получили большое развитие в последние десятилетия у зарубежных фирм, таких как Honeywell, Elliott, Capstone (США), Turbec (Volvo Aero Швеция). Их общие преимущества в надежности, длительном сроке службы до капитального ремонта, низких выбросах вредных веществ в атмосферу.

Микротурбины всех производителей работают на одних и тех же принципах и отличаются друг от друга применяемыми материалами, сплавами, конструктивными особенностями отдельных узлов, что является ноу-хау производителя, тепловыми параметрами технологической установки и др. При этом КПД выработки электроэнергии существующими микротурбинами лежит в диапазоне 26–34%, а их работа сопровождается выделением большого количества тепла (температуры до 300–350°C), которое никак не используется, а рассеивается в окружающем пространстве, т.е. попросту сбрасывается. Возникает задача дополнительного преобразования выбрасываемой тепловой энергии в полезную энергию.

Преобразование низкопотенциальной тепловой энергии может осуществляться в различных термодинамических циклах, но на сегодняшний день наибольшее внимание специалистов привлекает органический цикл Ренкина (ORC), на технологии которого, например, работает тепловой электрогенератор WHG125 марки Capstone [1].

Для решения задач повышения КПД в энергетике разработаны двухконтурные схемы генерации энергии. Применительно к рассматриваемым технологиям, имеется готовое решение, предлагаемое ООО «ИТ Синтез» (г. Новосибирск), заключающееся в комплексном применении 6-ти микротурбин Capstone C65 и ORC-турбины WHG125: выработка 6-ти микротурбин составляет 390 кВт с эффективностью 29%. Добавление WHG125 увеличивает выработку электроэнергии на 125 кВт – до уровня 515 кВт без использования дополнительного топлива. Таким образом, достигается новый уровень эффективности в 38% без увеличения эмиссии вредных веществ.

Основываясь на анализе существующих микротурбинных технологий и разработанных проектов автономных электростанций предлагается многоконтурная газотурбинная электростанция с тремя независимыми контурами выработки электроэнергии. Схема предлагаемой многоконтурной газотурбинной электростанции изображена на рис. 1 [2].

Предполагается, что первый контур установки представляет собой микротурбину готового промышленного производства (например, марки Capstone) с выходной электрической мощностью 60-65 кВт. Газы, отработавшие на первом контуре, используются в качестве греющего теплоносителя, в том числе в контуре с низкокипящим теплоносителем, в качестве которого применяются фреоны, водный раствор аммиака, пентан, изопентан, изобутан и др.

Второй и третий контур работают на цикле Ренкина, но в зависимости от выбора греющего теплоносителя и выходных тепловых параметров второй контур может работать на парогазовом цикле Ренкина (в котором в качестве теплоносителя предполагается очищенная вода) или на органическом цикле Ренкина, а третий, низкотемпературный, контур – на органическом цикле Ренкина с более глубокой утилизацией тепла.

В каждом контуре на одном валу с турбиной устанавливается свой высокоскоростной электрогенератор.

Для предлагаемой схемы были заданы следующие значения выходной электрической мощности: 1 контур – 60 кВт, 2 контур – 30 кВт, 3 контур – 10 кВт.

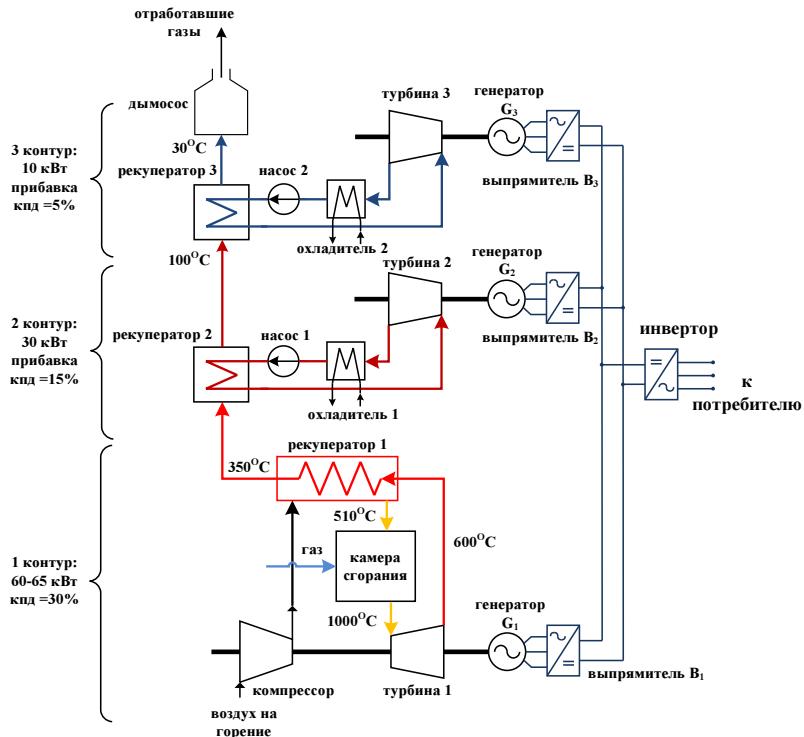


Рис. 1. Структурная схема трехконтурной теплоэлектрической установки

Как было сказано выше, на первом контуре электрический КПД существующей микротурбины составляет в среднем 30% (для различных производителей). В таком случае при заданных параметрах электроустановки мощность затрачиваемой тепловой энергии первоисточника составляет  $60/0,3 = 200$  кВт, на втором контуре при затрачиваемой тепловой мощности в 200 кВт КПД можно повысить до

$$(60+30)/200 = 45\%,$$

на третьем контуре соответственно, до

$$(60+30+10)/200 = 50\%.$$

Таким образом, при построении системы по трехконтурной схеме суммарной мощностью 100 кВт можно увеличить электрический КПД в 1,5 раза по сравнению с обычной одноконтурной микротурбинной системой, без дополнительной эмиссии вредных веществ в атмосферу.

Выходная тепловая энергия микротурбины Capstone C65 составляет 591 000 кДж/час (164 кВт). Этот показатель был взят за основу теоретических расчетов. При расчете микротурбины 2 контура при перепаде температур с 350°C до 100°C при использовании цикла на водяном паре теоретический КПД установки составила 40%. Здесь на выработку электроэнергии необходимо затратить тепловую мощность, равную  $30 \text{ кВт}/0,40 = 75 \text{ кВт}$ . При расчете микротурбины 3 контура при перепаде температур со 100°C до 30°C при использовании цикла на этаноле КПД установки составила 15%. Здесь на выработку электроэнергии необходимо затратить тепловую мощность, равную  $10 \text{ кВт}/0,15 = 67 \text{ кВт}$ . В итоге, суммарная тепловая мощность на выходе с первого контура для получения дополнительной выработки электроэнергии должна быть не меньше 142 кВт. Как было сказано ранее, выходная тепловая мощность с газотурбинной установки первого контура составляет 164 кВт. Таким образом, можно констатировать, что при такой выходной тепловой мощности, возможно обеспечить более глубокую утилизацию тепла с доведением КПД установки, путем добавления дополнительных двух контуров, до 50%.

Для возможности электроснабжения конечного потребителя предлагаемой энергоустановки необходимо решение ряда задач, такие как обеспечение требуемых параметров качества электроэнергии по величине напряжения и частоте. Приемлемые значения КПД термодинамического преобразования в энергетических установках малой мощности обеспечиваются при достаточно высокой частоте вращения ротора турбины. Это обстоятельство предполагает применение в качестве электромеханического преобразователя энергии высокочастотных генераторов.

Оценивая преимущества и недостатки различных типов синхронных и асинхронных генераторов, а также опираясь на опыт, накопленный отечественными и зарубежными специалистами при изучении работы высокоскоростных электротурбомашин при мощностях, не превышающих 200-250 кВт, в качестве электрогенераторов предлагаются синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов, что исключает проблемы, возникающие при параллельной работе генераторов. При этом невозможность регулирования выходного напря-

жения компенсируется применением полупроводниковых преобразователей электроэнергии.

Таким образом, потребитель подключается к электрогенерирующей установке через преобразователь частоты со звеном постоянного тока, т.е. вырабатываемый переменный ток сначала выпрямляется, а затем через инвертор  $I_1$ , обеспечивающий требуемую частоту, передается потребителю (рис. 2) [3].

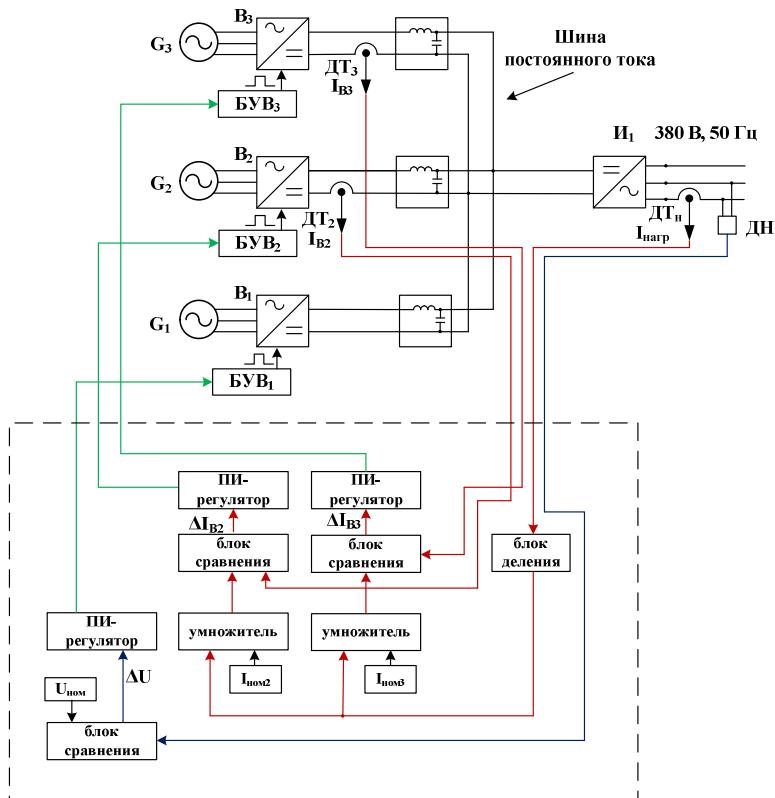


Рис. 2. Структурная схема формирования управляемых сигналов выпрямителей при работе на общую нагрузку

В концепции трехконтурной энергоустановки предлагается для каждого генерирующего контура (генераторы G1, G2, G3) свое выпрямительное устройство В1, В2, В3 с индивидуальным блоком управления (БУВ), работающее на общую шину постоянного тока, посредством которой осуществляется суммирование мощности отдельных генерирующих контуров.

При этом необходимо обеспечить:

- одинаковое значение выпрямленного напряжения для каждого контура;
- синхронное управление выпрямителями в комплексе трех параллельно работающих генераторов различной мощности.

Управление выпрямителями В2 и В3 осуществляется посредством обратной связи по току нагрузки, определяемому датчиком ДТН. Сигнал с ДТН передается на блок деления, в котором величина тока нагрузки сравнивается с заданной величиной номинального тока генерируемого электроустановкой. Для получения информации о величинах выработанного тока IB2, IB3 в выходные цепи выпрямителей подключены датчики тока ДТ2, ДТ3. В блоках сравнения определяется отклонение величины вырабатываемого тока генераторов от требуемого по условиям нагрузки и задается сигнал управления, который передается на управляемый электрод триистора выпрямительной установки и отпирает его. Так как изначальный сигнал обратной связи по величине тока нагрузки поступает одновременно на все блоки управления выпрямителями (БУВ) и процесс формирования управляющего сигнала одинаков, процентное распределение величины генерируемой мощности каждым генератором сохраняется при любой величине нагрузки. Таким образом, загрузка генераторов одинакова и изменяется синхронно пропорционально своей номинальной мощности.

Управление выпрямителем В1 осуществляется посредством обратной связи по напряжению, определяемому датчиком ДН на выводах инвертора. Информация о величине напряжения от датчика напряжения ДН сравнивается в блоке сравнения с величиной заданного опорного напряжения  $U_{\text{ном}}$ . Сигнал с блока сравнения поступает через регулятор на блок управления выпрямителем БУВ1, который формирует управляющий сигнал, необходимый для поддержания напряжения на необходимом уровне, независимо от величины нагрузки. Таким образом, сформирована система стабилизации напряжения, позволяющая обеспечить требуемую величину напряжения на выводах выпрямителя, в том числе в режиме холостого хода.

Применение двухмостового автономного инвертора (тока или напряжения) с тиристорно-реакторной схемой компенсации позволяет получить выходное напряжение на выводах потребителя с требуемым качеством по величине и гармоническому составу.

Идеи, заложенные в представленной энергоустановке, могут найти реализацию при проектировании автономных систем электроснабжения для удаленных потребителей, например крайнего севера, где вопрос поставки энергоресурсов является достаточно острый и эффективность их использования является наиболее актуальной.

В работе доказана техническая целесообразность построения много модульных систем генерирования электроэнергии на низкокипящих теплоносителях в сочетании с газотурбинными электростанциями, позволяющая повысить электрический КПД до 50%.

### **Библиографический список**

1. Высокоскоростные турбогенераторы для автономных энергетических установок малой мощности с использованием низкопотенциального тепла / М.Ю. Румянцев, Н.Е. Захарова, А.В. Поликарпо и др. // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем», ЭНЕРГО-2010, 1-3 июня 2010 г., Москва. В двух томах. Том 1. М.: Издательский дом МЭИ. 2010. С.240–243.
2. Пат. №2012137474/06 Рос. Федерация, МПК<sup>7</sup> F01K 23/10 (2006.01) Автономная газотурбинная электростанция с многоконтурной теплосиловой установкой / Степанов С.Ф., Коваленко В.В., Коваленко П.В. и др.; заявитель и патентообладатель Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. заявл. 31.08.12; опубл. 27.05.13, Бюл. № 15. 2 с.
3. **Коваленко П.В. , Степанов С.Ф., Дубинин А.Б.** Система распределения мощности в многоконтурной электрогенерирующей установке повышенной эффективности // UKR-Power 2013. Комплексное решение проблем энергосбережения в промышленной и коммунальной энергетике. Инвестиции и инновации: материалы XXХIII международной научно-практической конференции (Украина, г. Ялта, 24-28 июня 2013 г.). Ялта: Ассоциация теплоэнергетических компаний Украины, 2013. С. 35-38.

## **СЖИГАНИЕ МЕТАНО-ВОДОРОДНОЙ ФРАКЦИИ В КОТЛАХ С ВИХРЕВЫМИ ГОРЕЛКАМИ**

д-р техн. наук, проф. Таймаров М.А.

ст. преп. Ахметова Р.В.

ст. преп. Салтанаева Е.А.

*Казанский государственный энергетический  
университет, г. Казань*

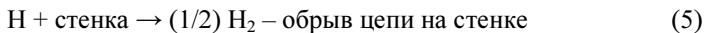
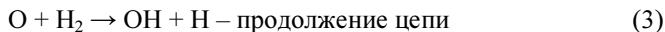
**Аннотация.** В статье исследуются показатели режимов работы энергетических котлов ТГМ-84А с вихревыми горелками при сжигании в них метано-водородной фракции, получаемой в производстве этилена и используемой в качестве котельно-печного топлива.

В связи с углублением процесса переработки нефти и увеличением выхода конечных светлых продуктов на нефтеперерабатывающих заводах возросло количество метано-водородной фракции. В настоящее время из-за удорожания стоимости природного газа возросла необходимость применения метано-водородной фракции в качестве альтернативного топлива для энергетических котлов ТЭС. Статья посвящена актуальной теме – исследованию показателей режимов работы энергетических котлов ТГМ-84А с вихревыми горелками при сжигании в них метано-водородной фракции, получаемой в производстве этилена.

**Цель работы.** Исследование показателей режимов работы энергетических котлов ТГМ-84А с вихревыми горелками при сжигании в них метано-водородной фракции.

**Содержательная часть.** Метано-водородная фракция в больших количествах образуется при производстве этилена и углубленной переработке нефти с повышенным выходом светлых конечных жидких нефтепродуктов [1-3]. Метано-водородная фракция, содержит метана до 30% (молярных) и водорода до 50% (молярных) и обладает рядом специфических особенностей при сжигании сравнению с природным газом, содержащим метан в количестве около 95,5...98,5 %. В общем виде горение – это процесс быстрого высокотемпературного окисления, сочетающий физические и химические явления. Горение состоит из большого числа элементарных окислительно-восстановительных процессов, приводящих к перераспределению валентных электронов между атомами взаимодействующих веществ – цепная реакция. В процессе цепной реакции возникают свободные атомы, радикалы и другие

неустойчивые промежуточные соединения, обладающие повышенной химической активностью – активные центры. Реагируя с исходным веществом, активные центры образуют конечные продукты реакции и новые активные промежуточные центры. Начальный процесс образования активных центров из исходных веществ называется зарождением цепи. Этот процесс всегда идет с поглощением энергии, т.е. является эндотермическим. Разветвление цепи происходит в результате разрывания активного центра с исходным веществом, в результате образуется несколько активных центров. Под обрывом цепи понимают процесс, при котором активный продукт исчезает. Если скорость разветвления больше скорости обрыва, то происходит развитие цепной реакции. Если скорость обрыва больше, чем скорость разветвления, то реакция не идет. Цепная реакция с неразветвленными цепями характеризуется формированием только одного нового активного центра – результат взаимодействия существовавшего активного центра с исходным веществом. Цепная реакция с разветвляющимися цепями характеризуется формированием нескольких активных центров, что приводит к значительному ускорению реакции. К обрыву цепи может привести столкновение активных центров: между собой, с молекулами инертного вещества, со стенкой топки. Механизм реакции горения водорода относится к цепной реакции с разветвляющимися цепями и состоит из следующих элементарных стадий [4-6]:



В результате взаимодействия атома водорода с молекулой кислорода получаются 2 молекулы воды и 3 новых атома водорода, которые являются активными центрами, то есть цепная реакция является разветвленной. Полнота горения исследуется двумя методами: по анализу газовоздушной смеси в смесителе горелки и по анализу продуктов сгорания. Теплота сгорания природного газа  $Q_{\text{н}}^{\text{Р}}=34,38 \text{ МДж/м}^3$ , метано-водородной фракции –  $Q_{\text{н}}^{\text{Р}}=28,89 \text{ МДж/м}^3$ . Метано-водородная фрак-

ция имеет более широкие пределы взрываемости по содержанию от 4,1% до 75% при 20°C в смеси с воздухом по сравнению с природным газом, пределы взрываемости которого от 5,3% до 15% [3, 4].

На интенсивность горения топлива могут оказывать влияние следующие факторы: повышение температуры реагирующих веществ – топлива и окислителя. При повышении температуры на каждые 10° скорость реакции возрастает в 2–4 раза по правилу Вант-Гоффа. В табл. 1 приведены диапазоны наименьших и наибольших значений коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , при которых происходит воспламенение смеси воздуха с водородом H<sub>2</sub>, метаном CH<sub>4</sub>, окисью углерода CO и пропаном C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> [5, 6].

Таблица 1  
Значения коэффициентов избытка воздуха  $\alpha$  и температура для воспламенения смесей горючих газов

Газ	Водород H <sub>2</sub>	Метан CH <sub>4</sub>	Окись углерода CO	Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	0,14...9,83	0,59...1,95	0,14...2,40	0,33...2,04
Температура воспламенения в смеси с воздухом °C	400	630	610	450

Из табл. 1 видно, что водород имеет более широкий предел воспламеняемости и более низкую температуру воспламенения в смеси с воздухом по сравнению с метаном, окисью углерода и пропаном, что должно быть учтено при сжигании метано-водородной фракции в энергетических котлах, предназначенных для сжигания природного газа, содержащего 95,5...98,5 % метана.

Экспериментальная часть исследования проведена на Нижнекамской ТЭЦ-1 (НкТЭЦ-1) на котле ТГМ-84А (станционный №4) при сжигании природного газа Уренгойского месторождения. Данные экспериментов по режимным параметрам сопоставлялись с расчетными результатами при сжигании метано-водородной фракции. Схема размещения горелок в котле ТГМ-84А с указанием направлений крутки приведена на рис. 1.

Модернизированные вихревые горелки ХФ-ЦКБ-ВТИ-ТК3 по 4 шт. на один котел ТГМ-84А размещены на фронтальной стене топки в 2 яруса. Горелки имеют единичную тепловую мощность при работе на

газе 76,7 МВт и при работе на мазуте 79,7 МВт. Газораздача смешанная (периферийная и центральная) с улиточным, тангенциальным и аксиальным завихрителями воздуха [7]. Технические характеристики газораздачи приведены на рис. 2 и в табл. 2

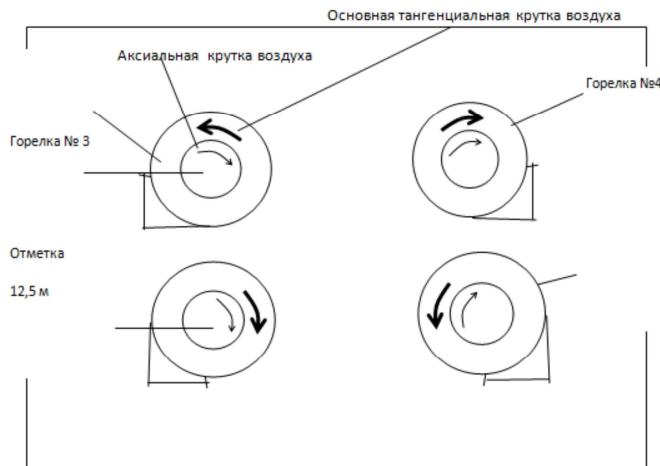


Рис. 1. Схема нумерации горелок, круток воздуха в горелках и расположения горелок ХФ-ЦКБ-ВТИ-ТКЗ на фронтальной стене топки котла ТГМ-84А №4 НкГЭЦ-1

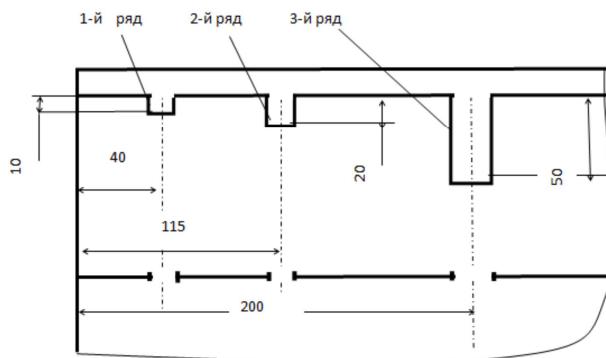


Рис. 2. Схема размещения периферийных трубок и центральных отверстий для подвода газа в горелках котла ТГМ-84А №4 НкГЭЦ

Таблица 2

Технические характеристики газораздачи по горелкам котлов  
ТГМ-84А (ст.№4) НкТЭЦ -1

№	Подвод газа	Конструктивные параметры	
		Количество отверстий	Диаметр отверстий, мм
1	Центральный	1 ряд – 17 шт.	18
		2 ряд – 18шт.	18
		3 ряд – 17шт.	27
	Периферийный	1 ряд – 16шт.	18
		2 ряд – 16шт.	20
		3 ряд – 16шт.	23
2	Центральный	1 ряд – 17 шт.	18
		2 ряд – 18шт.	18
		3 ряд – 17шт.	27
	Периферийный	1 ряд – 16шт.	18
		2 ряд – 16шт.	20
		3 ряд – 16шт.	23
3	Центральный	1 ряд – 17шт.	18
		2 ряд – 18шт.	18
		3 ряд – 17шт.	27
	Периферийный	1 ряд – 16шт.	18
		2 ряд – 16шт.	20
		3 ряд – 16шт.	23
4	Центральный	1 ряд – 17шт.	18
		2 ряд – 18шт.	18
		3 ряд – 17шт.	27
	Периферийный	1 ряд – 16шт.	18
		2 ряд – 16шт.	20
		1 ряд – 17 шт.	18

Смешанная периферийно-центральная газораздача (см. рис. 2, табл. 2) с использованием тангенциальной и аксиальной круток воздуха способствует интенсификации смесеобразования топлива с воздухом и позволяет ускорить процессы горения с получением более короткого факела по сравнению с периферийной трубчатой газораздачей, применяемой до модернизации на котле ТГМ-84А (ст. № 4) НкТЭЦ -1. Методика измерения режимных параметров котла ТГМ-84А подробно описана в работах [8, 9]. При поведении экспериментов сжигался природный газ с низшей теплотой сгорания 34,24 МДж/м<sup>3</sup>. Погрешность определения КПД по обратному балансу составила ±3,1%.

**Результаты исследования и их обсуждение.** В настоящей работе произведены тепловые расчеты тепловыделений в топках при химических реакциях горения метано-водородной фракции и природного газа при различных избытках воздуха, подаваемого на горение. Результаты расчетов приведены в сравнении с экспериментальными данными для природного газа. Составы метано-водородной фракции и сжиженного природного газа приведены в табл. 3, 4.

Горение водорода формально выражается известной реакцией  $H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$ . Однако эта реакция не позволяет представить разветвленные цепные реакции, протекающие в смесях водорода с воздухом и другими газами. В реакциях участвуют восемь компонентов:  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $OH$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2O_2$ . Подробная кинетическая схема химических реакций между данными компонентами включает более 20 элементарных реакций с участием свободных радикалов в реагирующей смеси. При наличии в системе соединений азота и углерода число компонентов и элементарных реакций существенно увеличивается.

Таблица 3  
Состав метано-водородной фракции

Компоненты	Молекулярный вес, кг/кг·моль	Молярная доля, %
$H_2$	2,01	50,10
$CH_4$	16,04	30,41
$C_2H_6$	30,07	14,58
$C_3H_8$	44,09	2,63
$nC_4H_{10}$	58,12	6,46
Молекулярный вес, кг/кг·моль		12,87
Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>		0,5357
Низшая теплота, кДж/кг		53248
Низшая теплота, ккал/м <sup>3</sup>		6807,8

Таблица 4  
Состав природного газа

Компоненты	Молекулярный вес, кг/кг·моль	Молярная доля, %
$CH_4$	16,04	95,48
$C_2H_6$	30,07	2,38
Плотность газа, кг/м <sup>3</sup>		0,7039
Низшая теплота сгорания, кДж/м <sup>3</sup>		34380
Низшая теплота сгорания, ккал/м <sup>3</sup>		8211

При сжигании метано-водородной фракции с большим содержанием водорода скорость горения в 2 - 5 раз выше скорости горения природного газа. Поэтому скорость подачи метано-водородной фракции в топку должна быть минимум в 2 раза большей, чем для природного газа. Горелки, с помощью которых газ смешивается в топке, создают нестабильное пламя вследствие недостаточной турбулизации потока, поскольку количество инжектируемого воздуха недостаточно. Стабильное горение метано-водородной фракции достигается при его интенсивном турбулентном перемешивании с достаточным количеством воздуха.

Смесь водорода с кислородом воздуха образует гремучую смесь, которая воспламеняется и горит с большой скоростью, что приводит к взрыву. Скорость горения водорода зависит от концентрации кислорода в смеси и колеблется в пределах 120 - 1000 см/сек. При сжигании водорода в смеси с воздухом максимальная скорость горения достигает 260 см /сек [10]. Расчеты данной работы показали, что в радиантных топках при использовании существующих горелок, рассчитанных на сжигание природного газа, горение водорода происходит в области выхода топок в районе ширм, то есть за пределами непосредственно самой радиантной топки. Это связано с малой скоростью подвода воздуха и метано-водородной фракции в зону горения. Поэтому температура на выходе повышается в среднем на 35...40°C (рис.3) при повышении массовой доли водорода от 6 до 12%. Сложность расчетов заключалась в том, что для поддержания необходимой температуры нагрева на выходе из топки при увеличении доли водорода в метано-водородной фракции необходимо увеличивать также расход этой фракции, подаваемой на горение (рис. 4).

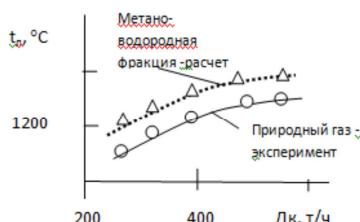


Рис. 3. Температура продуктов сгорания  $t_n$  на выходе из топки при различных нагрузках  $Dk$  при сжигании метано-водородной фракции и природного газа



Рис. 4. Расход метано-водородной фракции и природного газа в зависимости от нагрузки  $Dk$  котла ТГМ-84Б

## **Выводы**

1. Для поддержания стабильного горения и предотвращения взрывов в топках котлов ТГМ-84Б необходимо процесс горения метано-водородной фракции проводить при увеличенных скоростях подачи метано-водородной фракции и воздуха на горение.
2. Снижение температуры продуктов сгорания на выходе из топок может быть достигнуто путем уменьшения доли водорода в составе метано-водородной фракции.

## **Библиографический список**

1. Таймаров М.А., Додов И.Р., Степанова Т.О. Сжигание сбросных газов для теплофикации в нефтехимии // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т.18, В.24. С.95-98.
2. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод, С.-П., ОАО НПО ЦКТИ. 1998. 258 с.
3. Танатаров М.А., Ахметшина М.Н., Фасхутдинов Р.А. Технологические расчеты установок переработки нефти. М.: Химия, 1987. 352 с.
4. Гипшман И.М., Кутлер П.П. Особенности сжигания мазута на паровых и водогрейных котлах. М.: ГОУ ДПО ИПКгосслужбы, 2010. 123 с.
5. Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород: параметры горения и взрыва, М.: Физматлит, 2008. 288 с.
6. Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубовкин Н.Ф. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. М.:Химия, 1989. 672 с.
7. Gelderen L, Malmquist L.M.V.; Jomaas G. Vaporization order and burning efficiency of crude oils during in-situ burning on water. 2017. P. 558-537.
8. Трембовля В.И. Теплотехнические испытания котельных установок. М.: Энергия, 1977. 297 с.
9. Ведрученко В.Р., Крайнов В.В., Кокшаров М.В. Особенности сгорания водомазутных эмульсий в котельных топках // Промышленная энергетика. 2012. № 2. С. 32-39.
10. Тепловой расчет барабанного котла ТГМ-84. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012612419 от 6.03.2012.

# МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГРУППЫ КОТЛОАГРЕГАТОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

ст. преп. Ткаченко А.Е.

канд. техн. наук, доц. Гавриленко Б.В.

канд. техн. наук, доц. Неежмаков С.В.

Донецкий национальный технический  
университет, г. Донецк

**Аннотация.** Отпуск тепла шахтным потребителям по укрупненным показателям, эксплуатация низкоэффективных слоевых топок, использование дорогостоящего топлива, отсутствие оперативного управления производительностью котлоагрегатов приводит к перерасходу тепла в системах теплоснабжения угольных шахт. В статье рассмотрены топки низкотемпературного кипящего слоя (НТКС) как альтернативные теплогенерирующие установки угольных предприятий и предложена методика повышения эффективности их функционирования. В качестве критерия эффективной работы принят максимальный средневзвешенный КПД по котельной. Представлен алгоритм расчета состава и текущих производительностей топок НТКС по прогнозному расчету теплового спроса абонентов шахты.

Вопрос снижения стоимости производства тепла актуален как для жилищно-коммунальных хозяйств, так и для промышленных предприятий. В частности для шахт Донбасса, котельные установки которых традиционно оборудованы несколькими котлоагрегатами со слоевыми топками, возможна промышленная эксплуатация топок низкотемпературного кипящего слоя (НТКС). Данная технология актуальна именно для горных предприятий, поскольку позволяет сжигать отходы углеобогащения и некондиционный уголь с показателями до 70% зольности и минимальными расходами на транспортировку [1].

Шахта как объект теплоснабжения имеет ряд особенностей: наличие собственной котельной с несколькими котлоагрегатами; большая доля тепловой нагрузки на вентиляцию (калориферная установка); значительные суточные колебания тепловой нагрузки с амплитудой, сопоставимой с номинальной производительностью котла НТКС малой мощности (до 6-7 МДж) [1], что обусловлено технологическими особенностями предприятия и необходимостью соблюдения требований ПБ. Данную специфику необходимо принимать в расчет при реконструкции и проектировании системы теплоснабжения, а использование группы котлоагрегатов НТКС в качестве источника теплоты

позволит учесть все технологические особенности шахтных абонентов.

Современные исследования в области повышения эффективности теплоснабжения преимущественно раскрывают вопросы улучшения структуры сетей централизованного теплоснабжения, конструктивных особенностей тепловых пунктов жилых домов, управления распределением теплоносителя между абонентами, тогда как тема энергоэффективности систем теплоснабжения горных предприятий практически не раскрыта. Публикации, посвященные исследованию работы котлоагрегатов НТКС большей частью касаются теоретических вопросов усовершенствования самой технологии. Разработка критериев и методики повышения эффективности группы котлов НТКС, работающих на тепловую сеть шахты имеет большой научный и практический интерес и представляет предмет исследований авторов.

Таким образом, целью данного исследования является научное обоснование и разработка методики по повышению эффективности работы группы котлоагрегатов НТКС за счет снижения себестоимости производимой тепловой энергии. При этом должны решаться следующие задачи:

- выбор и обоснование критериев рациональной работы группы котлоагрегатов НТКС;
- разработка методики расчета рациональной производительности и состава котлов в соответствии с прогнозируемым тепловым спросом абонентов шахты, учитывая технологические особенности и текущее состояние котлоагрегатов НТКС.

На рис. 1 представлен объект исследований – технологическая схема шахтной котельной установки с группой котлоагрегатов НТКС, где: 1 – котел; 2 – топочное пространство; 3 – погружные поверхности нагрева (ППН); 4 – экраны поверхности нагрева (ЭПН); 5 – конвективные поверхности нагрева (КПН); 6 – воздухораспределительная решетка; 7 – золоудаляющее устройство; 8 – бункер твердого топлива; 9 – забрасыватель; 10 – растопочное устройство на жидкое топливо; 11 – дутьевой вентилятор; 12 – вентилятор возврата уноса; 13 – эжектор; 14 – циклон прямоточный; 15 – экономайзер; 16 – циклоны первой и второй степени газоочистки; 17 – двойные пылевые затворы; 18 – воздухоподогреватель; 19 – дымосос; 20 – дымовая труба; 21 – воздуховод; 22 – исполнительные механизмы; 23–26 – регуляторы температуры слоя; расхода дутьевого воздуха; высоты слоя и разрежения над слоем соответственно.

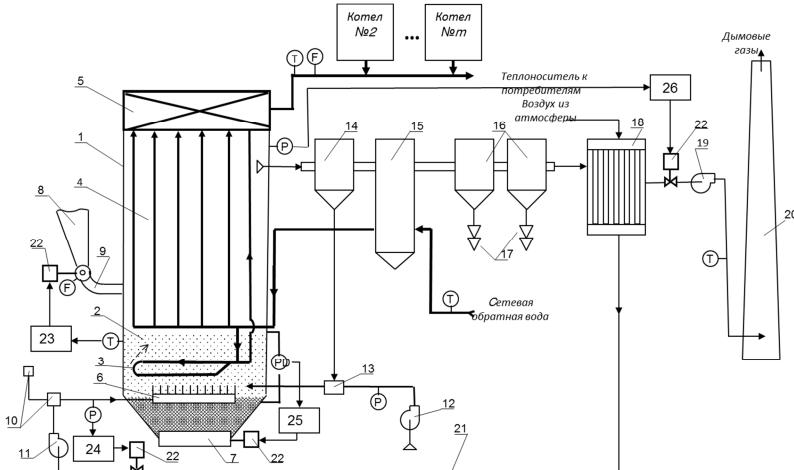


Рис. 1. Технологическая схема шахтной котельной установки с котлоагрегатами НТКС

Специфической особенностью котлов НТКС является наличие ППН, которые могут быть как полностью, так и частично погружены в слой, что учитывается коэффициентом  $k_{ks}$ , [%] который показывает, какой процент площади ППН (0-100%) погружен в слой.

С точки зрения управления производительностью котла НТКС имеют значение следующие технологические особенности: зависимость КПД котла НТКС от производительности нелинейна [20], для каждого котлоагрегата уникальна и меняется в процессе эксплуатации установки; технология НТКС позволяет регулировать производительность котельных агрегатов по трем параметрам – расходу твердого топлива, расходу дутьевого воздуха, степени введения погружных поверхностей нагрева (ППН) в слой, или комбинируя эти способы; топка НТКС может находиться в трех состояниях – в работе, остановлен и «горячий» резерв. Целесообразность использования в качестве источника тепла в системе теплоснабжения шахты группы котлоагрегатов НТКС обуславливается с одной стороны значительными суточными колебаниями потребительского спроса шахтных абонентов, а с другой стороны возможностью оперативно удовлетворять данный спрос различным числом работающих топок НТКС. Средневзвешенный КПД топок по котельной при этом будет меняться в зависимости от состава и числа работающих котлоагрегатов [1,2].

Схема теплоснабжения шахты включает в себя: тепловую сеть,  $m$  источников тепла - котлоагрегатов НТКС, работающих на один коллектор,  $n$  тепловых абонентов. Источники тепла и абоненты подсоединенны к тепловой сети параллельно. Выработанное тепло расходуется на отопление  $Q_{ot}$ , вентиляцию  $Q_{vent}$ , горячее водоснабжение  $Q_{g.vsn}$ , приветривание горных выработок  $Q_{kal}$ , а также компенсацию потерь тепла в трубопроводной сети  $Q_{pot.tr}$ . Тогда задание по суммарной производительности группы котлоагрегатов НТКС шахтной котельной установки с учетом КПД каждого котла  $\eta_{k.a.i}$  определяется как:

$$Q_{zad} = \sum_{i=1}^m (\bar{Q}_{k.a.i} \cdot \eta_{k.a.i}) = \sum_{j=1}^n (Q_{ot.j} + Q_{vent.j}) + Q_{kal} + Q_{g.vsn} + \sum_{j=1}^n Q_{pot.tr.j} \quad (1)$$

где  $\bar{Q}_{k.a.i}$  – производительность каждого котла НТКС, МВт.

В соответствии с [3] поиск рационального состава котлоагрегатов и производительности каждого  $i$ -го котла выполняется по критерию максимального средневзвешенного КПД котельной установки шахты при выполнении условия:

$$\eta(\{\bar{Q}_{k.a.i}\}) = \frac{\sum_{i=1}^m \eta_{k.a.i} \cdot \bar{Q}_{k.a.i}}{\sum_{i=1}^m \bar{Q}_{k.a.i}} \rightarrow \max; \quad (2)$$

где  $\{\bar{Q}_{k.a.i}\} = \{\bar{Q}_{k.a.1}, \bar{Q}_{k.a.2}, \dots, \bar{Q}_{k.a.m}\}$  – вектор производительности всех  $m$  агрегатов, [МВт] при наложенных ограничениях по удовлетворению прогнозного теплового спроса (3) и по диапазону рабочей производительности каждого котла (4):

$$\sum_{i=1}^m (\bar{Q}_{k.a.i} \cdot \eta_{k.a.i}) \geq Q_{zad}; \quad (3)$$

$$Q_{k.a.i}^{\min} \leq \bar{Q}_{k.a.i} \leq Q_{k.a.i}^{\max}, i = 1 \dots m. \quad (4)$$

Также должна учитываться целесообразность изменения числа работающих котлов НТКС путем разжига, останова или «горячего» резерва по критерию минимума расхода топлива:

$$B_i^{usl}(\{\bar{Q}_{k.a.i}\}) = \sum_{i=1}^m B_i^{usl}(\bar{Q}_{k.a.i}) = \sum_{i=1}^m E \cdot B_i(\bar{Q}_{k.a.i}) \rightarrow \min \quad (5)$$

где  $B_i^{usl}(\bar{Q}_{k.a.i})$  - расход условного топлива, необходимый для выхода на требуемую производительность  $i$ -го котлоагрегата, [кг/с];  $B_i(\bar{Q}_{k.a.i})$  –

расход натурального топлива (жидкого на розжиг и твердого топлива), [кг/с];  $E$  – топливный эквивалент.

В соответствии с [4] исходными данными для расчета являются зависимости КПД каждой котельной установки от ее производительности при различных комбинациях значений управляющих параметров. По результатам моделирования методами регрессионного анализа устанавливаются их функциональные зависимости от текущей производительности котлоагрегатов в виде регрессионных полиномов третьей степени. Средствами MatLab реализуется математическая модель котлоагрегата НТКС в соответствии с математически описанием, приведенным в [5]. При этом в модели учтены следующие параметры: вид, марка, физические и химические характеристики сжиженного топлива; показатели, определяемые при тепловом расчете котлоагрегатов; нормативные характеристики, определяемые при режимно-наладочных испытаниях; корректирующие величины, меняющиеся в процессе эксплуатации при текущем режиме работы.

Обобщенный алгоритм поиска рационального состава котлоагрегатов по критерию (2) приведен на рис.2. В соответствии с ним сначала формируется  $m$  векторов значений исходных данных  $\{X\}_i^d$ ,  $i=1\dots m$  по каждому котлу в группе, в том числе и о его состоянии – в работе (1), отключен (0), в «горячем» резерве (2). Размерность вектора  $d$  определяется структурой применяемой матмодели.

Далее происходит перебор всех возможных вариантов (текущий вектор  $\{x\}$ ) комбинаций технологических параметров для каждой из возможных комбинаций котлоагрегатов с учетом их состояния. Всего таких комбинаций  $m^3$ . Затем проверяется, может ли текущий вариант обеспечить выполнение рассчитанной суммарной производительности:

$$\sum_{i=1}^k Q_{k.a.i}^{\min} \leq \sum_{i=1}^k Q_{k.a.i} \leq \sum_{i=1}^k Q_{k.a.i}^{\max} \quad (6)$$

где  $k$  – количество работающих котлов в данной комбинации. При выполнении условия (6) для данной комбинации осуществляется подпрограмма поиска рационального режима работы группы котлов по критериям (2) и (5).

Исходными данными поиска является максимизируемая функция  $\eta$  (средневзвешенный КПД котельной) и минимизируемая  $B$  (расход условного топлива) от  $k \cdot d$  переменных. При этом необходимо учитывать диапазоны варьирования переменных и технологические ограничения по работе котла НТКС.

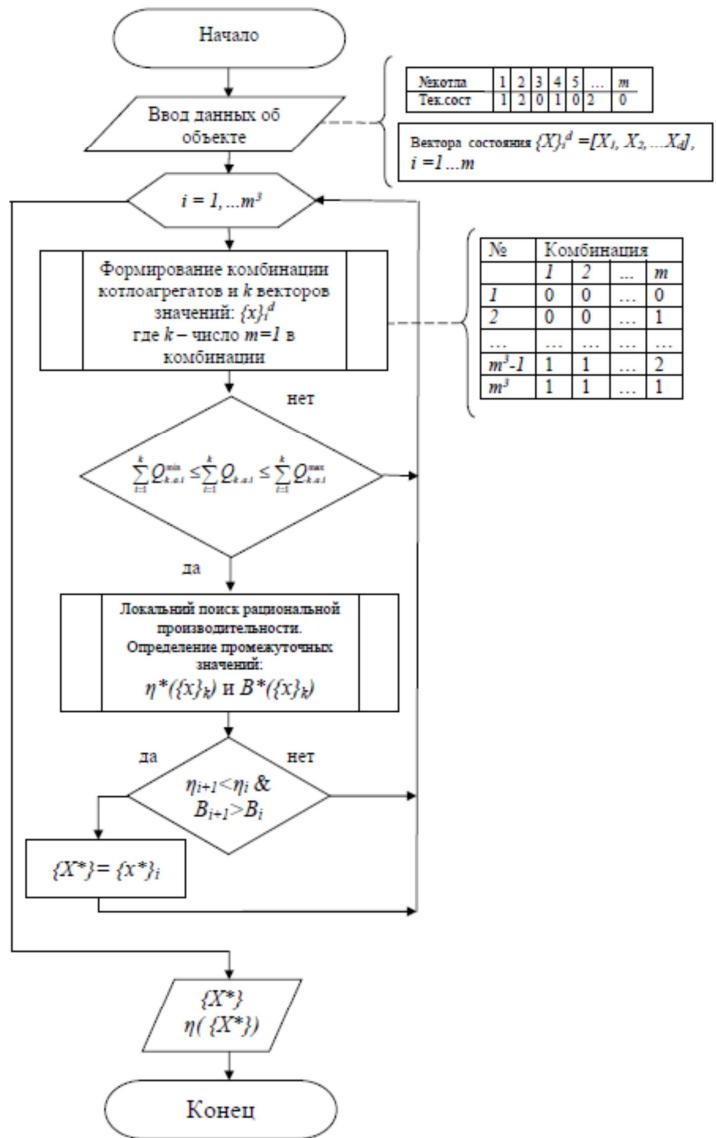


Рис. 2. Обобщенный алгоритм поиска рационального состава и производительности группы котлоагрегатов НТКС

Далее осуществляется поиск рационального состава и производительности котлоагрегатов НТКС, основанный на применении численного метода «прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска» [4]. В течение поиска вектору искомых значений параметров присваиваются промежуточные значения при соблюдении условий  $\eta_{i+1} > \eta_i$  и  $B_{i+1} < B_i$ . Результатами вычислений являются значения максимально возможного средневзвешенного КПД группы котлоагрегатов и минимально возможного расхода условного топлива для достижения задания по производительности, а также вектор соответствующих технологических параметров каждого котла НТКС.

Таким образом, в данной работе исследована группа котлоагрегатов НТКС как источник тепла в системе теплоснабжения шахты. Сформулированы и обоснованы критерии ее эффективной работы, позволяющие комплексно учесть как экономические показатели работы, так и теплотехнические характеристики каждого котельного агрегата.

Представлена разработанная авторами методика расчета состава и производительностей группы котлов НТКС в соответствии с прогнозным спросом, на основе численного метода «прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска». Данная методика позволяет повышать средневзвешенный КПД котельной установки в среднем на 3-5 % и таким образом экономить твердое топливо.

### **Библиографический список**

1. Сжигание угля в кипящем слое и утилизация его отходов / Ж. В. Вискин, В.И. Шелудченко, В.В. Кравцов и др. Донецк: Новый мир, 1997. 284 с.
2. Сидельковский Л.Н., Юреченев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1998. 528 с.
3. Ткаченко А.Е. Повышение эффективности работы шахтного комплекса теплоснабжения при совместной работе котельных агрегатов НТКС на тепловую сеть // Вестник Донецкого национального технического университета. 2016. № 5. С. 3-9.
4. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2004, 397 с.
5. Ткаченко А.Е. Математическое моделирование энергообмена в шахтном комплексе теплоснабжения с топками низкотемпературного кипящего слоя // Инженерные системы и техногенная безопасность. 2016. № 5 (121). С. 42-49.

# **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УЩЕРБА ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТЕХНОГЕННОГО, ПРИРОДНОГО И ТЕРРОРИСТИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА НА ПЛАВУЧИХ АТОМНЫХ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ**

канд. техн. наук, доц. **Туманов А.Ю.**

д-р техн. наук, проф. **Гуменюк В.И.**

ст. науч. сотр. **Туманова М.М.**

*Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

**Аннотация.** Предложена оригинальная прикладная методика формирования интегрального показателя обобщенного риска чрезвычайной ситуации, вызванный негативным событием с учетом вероятности его наступления из-за различных внутренних и внешних причин. Предложены схемы оценки полного ущерба и уязвимости объекта. В основе методики лежит уравнение множественной регрессии (аддитивная свертка многих факторов), описывающее влияние случайных неблагоприятных событий на уровень риска чрезвычайной ситуации. Помимо указанных объектов энергетики морского базирования методика может быть распространена на другие типы сложных технических систем.

**Ключевые слова:** модель, оценка, риск, потенциально-опасный объект, энергетика, уязвимость, предотвращенный ущерб.

## **1. Введение**

Вопросам теории безопасности в чрезвычайных ситуациях и исследованиям количественной оценки риска посвящены исследования многих ведущих отечественных и зарубежных ученых, однако, как показывает анализ выполненных исследований и практики в области обеспечения безопасности, научные основы оценки риска разработаны недостаточно полно. Так, остаются мало разработанными модели оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на потенциально-опасных объектах энергетики.

В случае потенциально опасных объектов энергетики морского базирования (в дальнейшем – ПООЭМБ) имеется одновременно усложненная система факторов риска (ФР) чрезвычайных ситуаций (ЧС), т.к. на проблемы обеспечения безопасности ПООЭМБ накладываются совокупность проблем обеспечения безопасности на морском транспорте и проблемы ядерной и радиационной безопасности, например в случае плавучих атомных теплоэлектростанций (в даль-

нейшем – ПАТЭС) и плавучих энергетических блоков (в дальнейшем – ПЭБ).

Таким образом, объектом исследования являются плавучие атомные теплоэлектростанции как потенциально опасные объекты энергетики морского базирования.

Цель исследования — разработка математической модели оценки ущерба при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера на потенциально-опасном объекте энергетики морского базирования.

Достижение поставленной цели требует:

- глубокого исследования для выявления основных ФР и их вероятностей проявления, влияющих на результирующий показатель;
- определение параметров модели оценки ущерба;
- подбора вида регрессии (математической модели), который наилучшим образом отражал связь интегрального показателя с набором факторов и их вероятностей [1].

В исследованиях по предупреждению и смягчению последствий чрезвычайных ситуаций в природной и техногенной сфере акцент необходимо делать на прогнозе и предупреждении бедствий и катастроф, поскольку прогноз и предупреждение, с экономической точки зрения, обходятся в десятки, а иногда и в сотни раз дешевле, чем ликвидация последствий уже прошедших бед. Однако масштаб этих работ в стране, на наш взгляд, пока не соответствует их значению. Здесь нужен широкий междисциплинарный подход и гораздо более активное участие Академии наук [2]. Поэтому в работе [3] особое внимание уделяется методологии технико-экономической оценки прямых и косвенных последствий чрезвычайных ситуаций, которые ранее либо целенаправленно игнорировались, либо учитывались частично. При этом масштаб потенциальных ущербов тесно связан с двумя типами технической системы представленными в [4], в которой рассматриваются преимущественно техногенные опасности и риски, связанные с техническими системами второго рода. Интересно отметить, что имеющиеся данные по фактической частоте крупных аварий на технических объектах второго рода существенно превышают аналогичные расчетные величины, получаемые методами теории безопасности технических систем.

Исследуемый авторами ПООЭМБ — ПАТЭС, включающая в себя ПЭБ «Михаил Ломоносов» и комплекс гидротехнических сооружений, относится к сложным техническим системам второго рода.

ПАТЭС — суперэнергонасыщенный объект, находящийся в морской акватории, стоимостью более  $20 \cdot 10^9$  руб.

## **2. Методы определения возможного потенциального ущерба**

В настоящее время для определения возможного потенциального ущерба, используются различные методы. Среди них можно выделить следующие [5]:

- натурный эксперимент;
- методы математического моделирования;
- экспертные методы.

Экспертные методы, применяемые в теории безопасности в ЧС, могут быть разбиты на два направления [5]:

«методы первого направления преследуют цель создания базы данных путем экспертного опроса специалистов по оценке риска ЧС ПООЭМБ. Методы второго направления связаны с использованием материалов баз данных для формирования баз знаний экспертных систем.»

Как правило, экспертные методы используются в качестве основы для методов математического моделирования».

## **3. Разработка предварительной модели**

Необходимым этапом предваряющим создание математической модели является описание свойств и характеристик объекта-оригинала на некотором естественном языке [5]. Построим предварительную модель оценки ущерба при ЧС, которая включает в себя:

- общую концептуальную модель ЧС, наглядно показывающую основные процессы и понятия ЧС на ПООЭ;
- модель распределения затрат и предотвращенных ущербов в жизненном цикле ЧС;
- классификацию внутренних и внешних причин ЧС на ПООЭ.

Кроме того модель необходимо уточнить введением и учетом жизненного цикла объекта ПООЭ, жизненного цикла ЧС (ЖЦЧС) [6].

Разработка модели распределения затрат и предотвращенных ущербов в жизненном цикле ЧС является важным этапом создания предмодели оценки риска.

Наличие качественной предмодели является исходной предпосылкой разработки адекватной математической модели. Ниже представлен ход исследования по формированию основных параметров математической модели оценки риска ЧС с учетом проведенного анализа существующих моделей оценки риска.

#### **4. Учет уязвимости в математической модели оценки риска**

В работе [7] предложена формула, в которой для оценки риска кроме вероятности реализации негативного события и возможных последствий учтена степень уязвимости объекта. По мнению Ф. Рагозина, модель оценки риска опасных процессов, основана на предположении, что за определенный промежуток времени средний риск, вызванный негативным событием  $A$ , можно определить по выражению

$$R(A) = P(A)W(A), \quad (1)$$

где  $R(A)$  – риск, вызванный негативным событием  $A$ ;  $P(A)$  – вероятность (частота) события  $A$ ;  $W(A)$  – возможный единовременный ущерб, вызванный событием  $A$ .

Размеры ущерба, или стоимостного риска, в каждом конкретном случае зависят, с одной стороны, от интенсивности негативного события (объем и скорость перемещения масс пород, снега, воды, площадей зоны поражения и т.п.), а с другой - от уязвимости объекта .

Под уязвимостью объекта понимают уровень возможных потерь объекта или отдельных его элементов (люди, здания, дороги, земли и т.д.), обусловленных воздействием на него поражающих факторов определенной интенсивности. Как показатель этого свойства объекта предлагается применять степень уязвимости, является отношением пораженных (разрушенных) объектов (элементов) к их общему количеству в зоне поражения, которое зафиксировано для события определенной интенсивности. Степень уязвимости одного и того же объекта может существенно различаться по событиям различного энергетического класса.

Анализируя структуру ПООЭ, объекты, подлежащие защите, а также классифицированные источники угроз, уязвимости системы и собственно угрозы, можно определить потенциальные угрозы для конкретного объекта. В общем случае на основе анализа можно выделить виды уязвимостей сложных социо-технических систем [8]:

#### **6. Степень уязвимости в оценке ущерба**

Степень уязвимости удобно выражать в долях единицы от возможных полных потерь в зоне поражения. Ущерб в формулах риска связан со степенью уязвимости соотношением

$$W(A) = C_y(A)W_{\text{п}}(A), \quad (2)$$

где  $C_y(A)$  – степень уязвимости в результате реализации события  $A$ ;  $W_{\text{п}}(A)$  - условный полный ущерб в результате реализации события  $A$ ,

равным числу людей или стоимости всех объектов (элементов) в зоне поражения. Степень уязвимости определяют отдельно для каждого опасного природного процесса или техногенного объекта с помощью эмпирических зависимостей убытков в социальной, экономической или экологической сферах от интенсивности этих процессов, полученных по результатам статистической обработки фактических данных или по данным математического моделирования негативных событий.

Для потенциально опасных объектов упрощенный детерминированный анализ риска природно-техногенных чрезвычайных ситуаций выполняется с введением следующего основного допущения [18]: исчерпание проектного допускаемого ресурса  $\tau_{\text{пд}}$  объекта, определяющего степень накопленного повреждения  $D$  или уязвимости  $C_y$ , с течением времени  $\tau$  происходит по линейному закону:

$$D = K_D \frac{\tau}{\tau_{\text{пд}}},$$

где  $K_D$  – коэффициент тяжести заданной степени повреждения.

При этом допускаемый проектный ресурс  $\tau_{\text{пд}}$  определяется через время  $\tau_{\text{оп}}$  достижения опасного (предельного) состояния и запас по ресурсу  $n_\tau$

$$\tau_{\text{пд}} = \frac{\tau_{\text{оп}}}{n_\tau},$$

Величина запаса  $n_\tau$  принимается в пределах 2…10, минимальные значения  $n_\tau = 2…3$  выбираются для потенциально опасных объектов, для которых большое значение имеет снижение их веса (объекты ракетной и авиационной техники), а максимальные значения  $n_\tau$  – для объектов с высоким риском (например, объектов ядерной энергетики, оборонного назначения, уникальных гидротехнических сооружений).

На каждом временном отрезке  $\tau$ , измеряемом в годах, условная вероятность достижения предельного состояния будет равна

$$P_y = \frac{\tau}{\tau_{\text{пд}} n_\tau},$$

где знаменатель определяет приращение условий вероятности достижения опасного состояния в год. Ущербы  $U$  для наиболее тяжелых аварий и катастроф могут также считаться линейно зависящими от степени исчерпания ресурса. Тогда для времени  $\tau$

$$U = \frac{\tau \cdot K_U \cdot Z_i}{\tau_{\text{пд}} n_{\tau}},$$

где  $Z_i$  – суммарные затраты на создание анализируемого объекта (первоначальная инвестиция), руб.;  $K_U$  – коэффициент, учитывающий тяжесть последствий аварии или катастрофы ( $1 \leq K_U \leq 20$ ), чем больше его значение, тем тяжелее последствия. Величину  $K_U$  в первом приближении можно выбирать исходя из потенциальной опасности объектов. Для объектов инфраструктуры  $K_U = 2\dots 6$ .

С учетом степени уязвимости объекта формула (2) для оценки риска приобретает вид

$$R(A) = P(A)C_y(A)W_{\text{п}}(A), \quad (3)$$

где  $R(A)$  – риск, вызванный негативным событием  $A$ ;  $P(A)$  – вероятность события  $A$ ;  $C_y(A)$  – степень уязвимости в результате реализации события  $A$ ;  $W_{\text{п}}(A)$  – условный полный ущерб в результате реализации события  $A$ .

Формула (3) является общей для всех типов риска. Однако для ее практического использования в каждом конкретном случае может возникнуть необходимость внесения соответствующих уточнений. Так произведем замену  $W_{\text{п}}(A)$  на  $U$  и запишем формулу (3) в модифицированном виде:

$$R(A) = P(A) \cdot C_y(A) \cdot \frac{\tau \cdot K_U \cdot Z}{\tau_{\text{пд}} n_{\tau}},$$

или

$$R(A) = P(A) \cdot C_y(A) \cdot P_y \cdot K_U \cdot Z, \quad (4)$$

где  $R(A)$  – риск, вызванный негативным событием  $A$ ;  $P(A)$  – вероятность события  $A$ ;  $C_y(A)$  – степень уязвимости в результате реализации события  $A$ ;  $P_y$  – условная вероятность достижения предельного состояния системы;  $Z$  – суммарные затраты на создание анализируемого объекта;  $K_U$  – коэффициент, учитывающий тяжесть последствий аварии или катастрофы ( $1 \leq K_U \leq 20$ ).

Связав таким образом вероятность неблагоприятного события с первоначальными суммарными затратами на создание анализируемого объекта и временем  $\tau_{\text{оп}}$  достижения опасного (предельного) состояния

и запасом по ресурсу  $n_r$  была получена аналитическая формула оценки риска.

### 7. Матрица уязвимости

Параметры для подстановки в формулу (4) заносят в матрицу уязвимости, компоненты которой представляют собой вероятности реализации возможных поврежденных состояний объекта при условии оказания на объект, различных экстремальных воздействий.

В табл. 1 представлены элементы матрицы уязвимости.

Таблица 1

Элементы матрицы уязвимости

Сценарий ЧС \ Конечное состояние	$C_1$	$C_2$	$C_i$
1	$P_{v11}$	$P_{v12}$	$P_{v1i}$
2	$P_{v21}$	$P_{v22}$	$P_{v2i}$
$j$	$P_{vj1}$	$P_{vj2}$	$P_{vji}$

В современной практике для формализации риска  $R$  широко используют модель, которая связывает между собой вероятность возникновения негативных событий  $P_i$  (аварий, катастроф), вероятность возможных убытков  $W_i$ , величину самих убытков  $W_i$  в результате этих событий:

$$R = \sum_i^n P_i \cdot P(W_i) \cdot W_i. \quad (5)$$

Оценка риска должна предусматривать развитие неблагоприятных событий по разным сценариям, что требует обобщения формулы (5):

$$R = \sum_{ij}^n P_{ij} \cdot P(W_{ij}) \cdot W_{ij} \quad (5)$$

где индекс  $i$  касается события, индекс  $j$  – соответствующего сценария.

### 8. Метод арбитражного ценообразования

Известный исследователь финансового риска Стивен Росс предложил метод, получивший название теории арбитражного ценообразования (ТАЦ). Метод арбитражного ценообразования предполагает, что зависимость между риском и ущербом является многофакторной и в

в этом главное теоретическое преимущество этого метода. Также в методе ТАЦ применяется математическая модель, в основе которой лежит уравнение множественной линейной регрессии[14].

#### **9. Факторы риска чрезвычайных ситуаций**

Для восполнения этого пробела воспользуемся классификацией и перечнем факторов риска предложенной для ПООЭ – плавучих атомных теплоэлектростанций ( в дальнейшем – ПАТЭС) в [12].

Внутренние опасности для объектов ПАТЭС инициируются опасными процессами, влияние которых определяется следующим:

- массой и составом химических и радиационных опасных веществ, находящихся на объекте (хранимых или транспортируемых);
- количеством энергии, обращающейся на объекте;
- уровнем подготовки персонала к выполнению задач по предотвращению и ликвидации ЧС.

#### **10. Описание предлагаемой модели**

Используя теоретическое уравнение линейной регрессии, для потенциально опасных объектов можно преобразовать формулу С. Росса к следующему виду:

$$R(A) = \beta_0 r_0 + \beta_1 r_1 + \beta_2 r_2 + \varepsilon \quad (7)$$

где:  $r_1$  – поправка на риск с учетом внутренних факторов риска;  $r_2$  – поправка на риск с учетом внешних факторов риска;  $\varepsilon$  – случайная ошибка измерения.

С учетом формул (4, 5, 6) запишем  $r_1$  и  $r_2$  в виде:

$$\begin{aligned} r_1 &= \sum_{f=1}^N P(A)P(F_f)P(W_f)C_y(A)W_n(F_f) \\ r_2 &= \sum_{l=1}^K P(A)P(F_l)P(W_l)C_y(A)W_n(F_l) \end{aligned}$$

Подставим в (7)  $r_1$  и  $r_2$  получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} R(A) &= r_0 + \sum_{f=1}^N P(A) \cdot P(F_f) \cdot P(W_f) \cdot C_y(A) \cdot W_n(F_f) \\ &\quad + \sum_{l=1}^K P(A) \cdot P(F_l) \cdot P(W_l) \cdot C_y(A) \cdot W_n(F_l) + \varepsilon \quad (8) \end{aligned}$$

где:  $R(A)$  – интегральный показатель обобщенного риска ЧС, вызванный негативным событием  $A$  с учетом внутренних и внешних причин, полного ущерба и уязвимости объекта;  $C_y(A)$  – степень уязвимости объекта или его составных частей в результате реализации события  $A$ ;  $r_0$  – ожидаемый первоначальный риск ПООЭ, если даже будут проведены все мероприятия безопасности;  $P(A)$  – априорная вероятность наступления неблагоприятного события  $A$  (например аварии на ПООЭ);  $P(F_f)$  – вероятность того, что неблагоприятное событие (отказ, инцидент, авария) произойдет из-за конкретной причины (внутреннего фактора)  $F_f$ , где  $f$  количество факторов от 1 до  $N$ . В дальнейшем – вероятность внутреннего фактора риска;  $P(F_l)$  – вероятность того, что неблагоприятное событие (отказ, инцидент, авария) произойдет из-за конкретной причины (внешнего фактора риска)  $F_l$ , где  $l$  количество факторов от 1 до  $K$ . В дальнейшем – вероятность внутреннего фактора риска;  $P(W_f)$  – вероятность наступления ущерба от  $f$  того внутреннего фактора риска;  $P(W_l)$  – вероятность наступления ущерба от  $l$  того внешнего фактора риска;  $\varepsilon$  – случайная ошибка оценки риска;  $W_{\Pi}(F_f)$  – ущерб от  $f$  того внутреннего фактора риска;  $W_{\Pi}(F_l)$  – ущерб от  $l$  того внутреннего фактора риска.

Обозначим  $W_{\Pi}(A)$  – условный полный ущерб в результате реализации события  $A$ , руб. Воспользовавшись классификацией риска ПООЭ можно увидеть, что он равен сумме полных условных ущербов от внутренних и внешних причин:

$$W_{\Pi}(A) = \sum_f^N W_{\Pi}(F_f) + \sum_l^K W_{\Pi}(F_l)$$

Ущерб, который мы оцениваем, может быть фактический и прогнозируемый. Фактический ущерб определяется, когда событие  $A$  уже произошло. Более интересно с точки зрения предотвращения чрезвычайных ситуаций уметь оценивать прогнозируемый ущерб, который в результате проведенных мероприятий может быть представлен как предотвращенный ущерб. В качестве допущения примем, что эффект от проводимых заблаговременно мероприятий по снижению риска ЧС равен величине предотвращенного этими мероприятиями ущерба. Запишем  $\mathcal{E}_m = W_{\Pi}(A) = U_p$ . Создание объекта, его эксплуатация проходит за определенное время, которое может исчисляться годами. Без определенных преобразований нельзя сравнивать вложения в объект, затраты на обеспечение безопасности и ущерб от аварий. Для корректно-

го сопоставления элементов инвестиционных и текущих затрат с эффектами от мероприятий по предотвращению ЧС применяются математические методы дисконтирования денежных потоков в рамках теории временной стоимости денег. Оценить чистый предотвращенный ущерб (*NPU*) можно в виде разности между затратами на предотвращение ЧС и суммой эффектов от фактически проведенных мероприятий по предотвращению ЧС по формулам с учетом дисконтирования денежных потоков, представленным в [13]. Авторами работы выдвигается гипотеза о существовании зависимости между капитальными (инвестиционными)  $Z_k$  и текущими затратами  $Z_t$  на обеспечение безопасности ПООЭ и предотвращенным ущербом.

$$NPU = -Z_i + \sum_t^T \frac{(U_p - Z_t)}{(1+k)^t}.$$

## 11. Верификация модели

Для подтверждения правильности выдвигаемых гипотез по существующим закономерностям необходима проверка предлагаемой математической модели оценки риска ЧС на ПООЭ на адекватность. Проверка может быть произведена ретроспективным способом на основе сравнительной оценки фактического и прогнозного предотвращенного ущерба произошедшей аварии на Саяно-Шушенской ГЭС.

## 12. Заключение

Таким образом, в ходе исследования получен научный результат — разработана многофакторная стохастическая регрессионная математическая модель оценки обобщенного риска ЧС ПООЭМБ,  $R(A)$ , вызванного негативным событием А с учетом вероятностей, внутренних и внешних причин возникновения чрезвычайных ситуаций, прогнозного полного ущерба и степени уязвимости объекта риска, первоначальных затрат на создание объекта.

**Работа выполнена в рамках государственного задания (проект 13.8874.2017/8.9)**

## Библиографический список

1. Туманов А.Ю. Обоснование адекватности математической модели оценки риска социо-технических систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. № 56. С. 66-75.
2. Малинецкий Г.Г. Управление риском и редкие катастрофические события // Математическое моделирование. 2002. Т. 14. № 8 С. 107–112.

3. Оценка последствий чрезвычайных ситуаций / Г.Л. Кофф, А.А. Гусев, Ю.Л. Воробьев, С.Н. Козьменко. - М.: Издательско-полиграфический комплекс РЭФИА, 1997. 364 с.
4. Источники техногенных рисков [Электронный ресурс] / Охрана труда: Информационный ресурс. URL: [http://ohrana-bgd.ru/risk/risk2\\_48.html](http://ohrana-bgd.ru/risk/risk2_48.html) (доступ 15.10.2017).
5. **Воронин Ю.А., Чудинский Р.М.** Моделирование в технологическом образовании. Воронеж: ВГПУ, 2001. 226 с.
6. **Гуменюк В.И., Туманов А.Ю.** Совершенствование методологии оценки риска ЧС природного и техногенного характера на потенциально опасных объектах энергетики. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2017 г. № 1. С. 85–97.
7. **Рагозин Ф.** Оценка и картографирование опасности и риска от природных и техногенных процессов (теория и методология) // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, № 5. М.: ВИНТИ, 1993. С.16–41.
8. **Махутов Н.А., Резников Д.О., Петров В.П.** Оценка риска аварий на КВО с учетом возможности реализации экстремальных ущербов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. № 5. С. 57–73.
9. **Гуменюк В.И., Кармишин А.М., Киреев В.А.** О количественных показателях опасности техногенных аварий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013 г. № 2 (171). С. 281–288.
10. Общие интегральные представления показателей опасности техногенных аварий / В.И. Гуменюк, А.М. Кармишин, Киреев и др. // Безопасность в техно сфере. 2013. № 6 (ноябрь–декабрь). С. 38-45
11. Построение модели арбитражного ценообразования С. Росса [Электронный ресурс] / Школа Финансового Анализа. URL: <http://www.beintrend.ru/2010-09-06-06-39-10> (доступ 15.10.2017).
12. **Гуменюк В.И., Туманов А.Ю.** Совершенствование методологии оценки риска ЧС природного и техногенного характера на потенциально опасных объектах энергетики // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2017. № 1. С. 85–97.
13. **Туманов А. Ю.** Модели и методы оценки экономической эффективности интегрированных систем безопасности: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 104 с.

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В ПРОЦЕССАХ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ УГЛОВЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЛУЧА ПРОЦЕССА

канд. техн. наук, доц. **Феоктистов А.Ю.**

канд. техн. наук, доц. **Феоктистов Ю.А.**

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** При проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха помещений различного назначения одной из важнейших задач является определение параметров изменения состояния влажного воздуха. Существующие общепринятые графо-аналитические методы расчета параметров тепловлажностных процессов во влажном воздухе основаны на применении Id-диаграммы влажного воздуха, что приводит к усложнению циклических расчетов и значительной погрешности. Существующие аналитические методы расчета изменения тепловлажностного состояния воздуха основаны на линейной аппроксимации связей между энталпийей, влагосодержанием и температурой, что не всегда позволяет добиться требуемой точности расчетов. В статье предлагается метод аналитического описания тепловлажностных процессов во влажном воздухе, основанный на аналитическом определении взаимосвязи энталпии и влагосодержания с температурой и влажностью воздуха. Предложены методы нахождения параметров влажного воздуха в процессах, определяемых угловым коэффициентом луча процесса и ограниченные допустимыми диапазонами температур и влажностей воздуха в обслуживаемом помещении.

При проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха помещений различного назначения одной из важнейших задач является определение параметров изменения состояния влажного воздуха [1].

Определение параметров влажного воздуха в политропных процессах тепло- и влагообмена общепринято производится с помощью Id-диаграммы на основании углового коэффициента луча процесса, являющегося соотношением теплопоступлений (теплопотерь) и влагопоступлений (влагоудаления) [2].

Графический способ определения параметров влажного воздуха в политропных процессах изменения тепловлажностного состояния описанный, например, в [2], основан на применении Id-диаграммы влажного воздуха, что приводит к усложнению циклических расчетов и значительной погрешности вычислений. Существующие аналитиче-

ские методы расчета изменения тепловлажностного состояния воздуха основаны на линейной аппроксимации связей между энталпийей, влагосодержанием и температурой [2, 3], что не всегда позволяет добиться требуемой точности расчетов.

**Целью работы** является выработка методологии аналитического отделения граничных параметров в процессах изменения тепловлажностного состояния воздуха, определяемых метеорологическими параметрами воздуха – температурой и относительной влажностью.

Величина углового коэффициента луча процесса  $\varepsilon$  определяется по формуле [2]:

$$\varepsilon = 1000 \cdot Q/W, \quad (1)$$

где  $Q$  – поток полной теплоты, обмененной в процессе изменения состояния воздуха, кВт;  $W$  – расход влаги, обмененной в процессе изменения состояния воздуха, г/с.

С другой стороны, в процессе изменения тепловлажностного состояния воздуха изменяется его энталпия на  $\Delta I$  кДж/кг и влагосодержание на  $\Delta d$  г/кг, отношение которых является угловым коэффициентом отрезка отображающего процесс изменения состояния воздуха, что приводит к следующему соотношению для определения  $\varepsilon$  [2]:

$$\varepsilon = 1000 \cdot \Delta I / \Delta d. \quad (2)$$

Исходными данными для определения параметров влажного воздуха, чаще всего, являются: начальные параметры воздуха – температура  $t_1$ , °С и относительная влажность  $\varphi_1$ , %; а процессов их изменения – теплопоступления  $Q$ , кВт и влагопоступления  $W$ , г/с. Теплопоступления и влагопоступления в помещениях являются определяющими факторами для установления воздухообменов в помещениях [6,7], и, как следствие, энергопотребления систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

Нанесем на Id диаграмму точку 1 – начальные параметры воздуха (рис. 1), определим величину углового коэффициента луча процесса по формуле (2) и проведем из точки 1 луч в направлении развития тепловлажностного процесса (рис. 1).

Для ограничения изменения параметров воздуха в политропном процессе в практике вентиляции и кондиционирования воздуха задаются допустимым значением температуры воздуха или его влажности

(например, согласно [3, 4]). В точке пересечения луча процесса  $\varepsilon$  с линией  $t = \text{const}$  или кривой  $\varphi = \text{const}$ , определяющих верхнюю границу параметров микроклимата в помещении, мы получаем точку 2, определяющую конечные параметры воздуха. В технических приложениях (например, при обработке воздуха в кондиционерах) может ограничиваться влагосодержание  $d$  или энталпия воздуха  $I$ . При использовании графического способа определения состояния воздуха в полиграничном процессе значения параметров воздуха определяются координатой точки 2.

На основании заданных теплопоступлений  $Q$ , кВт и влагопоступлений  $W$ , г/с по формуле (1) найдем угловой коэффициент луча процесса. По заданным начальным параметрам воздуха – температуре  $t_1$ , °С и относительной влажности  $\varphi_1$ , % найдем энталпию и влагосодержание воздуха в точке 1 по формулам [8].

Для расчета термодинамических параметров воздуха находим давление насыщенных водяных паров  $P_n$ , Па [8]:

$$P_{n1} = \begin{cases} 652,16e^{0,0621t_1}, & \text{если } t_1 \geq 0 \\ 676,64e^{0,0975t_1}, & \text{если } t_1 < 0, \end{cases} \quad (3)$$

и парциальное давление водяных паров  $P_p$ , Па [8]:

$$P_{p1} = \frac{P_{n1}\varphi_1}{100}. \quad (4)$$

По формуле [9] найдем влагосодержание воздуха:

$$d_1 = 1000 \frac{R_{d.a.}}{R_p} \frac{P_{p1}}{P_{atm} - P_{p1}}, \quad (5)$$

где  $R_{d.a.}$  – удельная газовая постоянная сухого воздуха, кДж(кг·К);  $R_p$  – удельная газовая постоянная водяного пара, кДж(кг·К);  $P_{atm}$  – атмосферное давление, Па.

Тогда энталпия внутреннего воздуха  $I_1$ , кДж/кг будет определяться соотношением [8]:

$$I_1 = c_{c.e.}t_1 + (r_n + c_n t_1) \frac{d_1}{1000}, \quad (6)$$

где  $c_{c.b}$  – удельная теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг·°C);  $c_n$  – удельная теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·°C);  $r_n$  – удельная теплота парообразования для воды, кДж/кг.

Рассмотрим определение параметров воздуха в политропном процессе при ограничении конечной энталпии воздуха  $I_2$  (рис. 2).

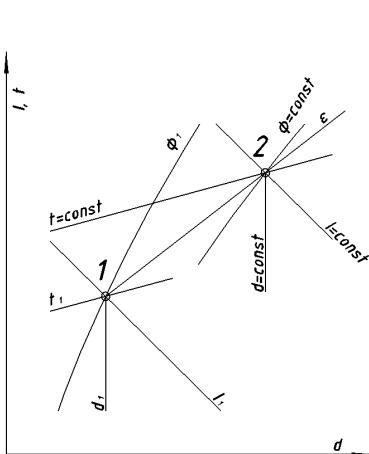


Рис. 1. Изображение политропного процесса на Id диаграмме

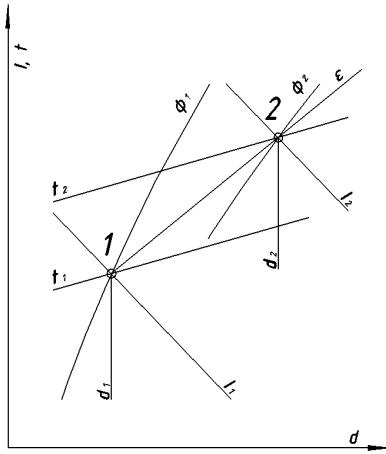


Рис. 2. Изменение состояния воздуха в политропном процессе

Зная граничное значение энталпии  $I_2$ , получим допустимое приращение энталпии  $\Delta I = I_2 - I_1$ , из формулы (2) найдем приращение влагосодержание  $\Delta d = 1000 \cdot \Delta I / \varepsilon$  и влагосодержание воздуха в точке 2  $d_2 = d_1 + \Delta d$ . По известным энталпии  $I_2$  и влагосодержанию  $d_2$  определим температуру  $t_2$  и относительную влажность воздуха  $\varphi_2$  по формулам [9]:

$$t_2 = \frac{I_2 - r_n \frac{d_2}{1000}}{c_{c.b} + c_n \frac{d_2}{1000}} \quad (7)$$

$$\varphi_2 = 100 \frac{P_{am} d_2}{P_{n2} (622 + d_2)} \quad (8)$$

При ограничении влагосодержания воздуха  $d_2$  (рис. 2) получим допустимое приращение влагосодержания  $\Delta d = d_2 - d_1$ , из формулы (2) найдем приращение энталпии  $\Delta I = \frac{\varepsilon \cdot \Delta d}{1000}$  и энталпию воздуха в точке 2  $I_2 = I_1 + \Delta I$ . По формулам (7) и (8) найдем метеорологические параметры воздуха.

При ограничении температуры воздуха  $t_2$  введем величины приращения температуры  $\Delta t = t_2 - t_1$  и влагосодержания  $\Delta d = d_2 - d_1$  и найдем приращение энталпии в процессе изменения состояния воздуха:

$$\Delta I = I_2 - I_1 = c_{c.e.} t_2 + (r_n + c_n t_2) \frac{d_2}{1000} - c_{c.e.} t_1 - (r_n + c_n t_1) \frac{d_1}{1000}. \quad (9)$$

После преобразования получим:

$$\Delta I = \Delta t \left( c_{c.e.} + c_n \frac{d_1 + \Delta d}{1000} \right) + \frac{\Delta d}{1000} (r_n + c_n t_1). \quad (10)$$

Тогда энталпия и влагосодержание воздуха, ассимилировавшего теплопоступления  $Q$ , кВт и влагопоступления  $W$ , г/с определяются:

$$I_2 = I_1 + \Delta I, \quad (11)$$

$$d_2 = d_1 + \Delta d. \quad (12)$$

Зная температуру  $t_2$ , по формуле (3) найдем давление насыщенных водяных паров  $P_{n2}$ , и определим влажность воздуха в точке (2).

$$\varphi_2 = 100 \frac{P_{atm} d_2}{P_n (622 + d_2)}. \quad (13)$$

Полученное соотношение приращений температуры воздуха и его энталпии позволяет аналитически разрешить задачу определения параметров воздуха при ограничении его температуры в процессах изменения его тепловлажностного состояния и прогнозировать параметры воздуха при изменяющихся тепло- и влагопоступлениях в обслуживающих помещениях.

Температура и скорость приточного воздуха при истечении из приточных отверстий должны обеспечивать нормируемые параметры

микроклимата в рабочей (обслуживаемой) зоне (см. приложения Г и Д к [10]).

При расположении приточных устройств на значительном расстоянии от рабочей (обслуживаемой) зоны начальную скорость  $U_s$  и температуру  $T_s$  ( $\Delta T_s = T_s - T_\infty$ ) в струе следует определять по формулам [8]:

$$U_s = \frac{U_z z}{m \sqrt{F_0}}, \quad (14)$$

где  $U_z$  – нормируемое значение скорости воздуха в рабочей зоне, м/с;  $z$  – расстояние между сечением истечения и рабочей зоной по оси распространения струи, м;  $m$  – аэродинамическая характеристика приточной струи;  $F_0$  – площадь приточного отверстия,  $\text{м}^2$ .

$$\Delta T_s = \frac{\Delta T_z z}{n \sqrt{F_0}}, \quad (15)$$

где  $\Delta T_z$  – допустимая избыточная температура воздуха в рабочей зоне;  $\Delta T_z = T_z - T_\infty$ , К ( $T_z$  – температура в приточной струе на входе в рабочую зону,  $T_\infty$  – средняя температура воздуха в помещении);  $n$  – тепловая характеристика приточной струи.

Значения характеристик приточной струи  $m$  и  $n$  зависят от вида приточного устройства и формы приточной струи.

**Выводы.** Предлагаемая методика расчета параметров воздуха в помещениях с тепло- и влагоизбыtkами позволяет аналитически определять состояние воздуха в процессе ассимиляции тепло- и влагоизбыtkов. Аналитическое определение параметров воздуха и величин воздухообмена позволяет проводить циклические расчеты состояния воздуха в помещениях с целью нахождения рациональных величин воздухообменов при различных климатических условиях и тепловых и влажностных нагрузках в обслуживаемых помещениях. Прогнозирование тепловлажностного режима обслуживаемых помещений дает возможность оперативного регулирования режима работы оборудования подготовки воздуха систем вентиляции, кондиционирования воздуха и воздушного отопления. При необходимости проводится серия расчетов системы, например, для различных погодных условий, воз-

можно построение графиков требуемой тепло- и холодопроизводительности. Анализ полученных результатов может быть использован при построении алгоритмов функционирования систем автоматизированного управления оборудованием СКВ. Своевременное изменение режимов работы тепломассообменного оборудования приточных установок позволяет поддерживать оптимальные параметры микроклимата в обслуживаемых помещениях при условии минимизации затрат тепловой и электрической энергии.

### **Библиографический список**

1. Logachev I.N., Logachev K.I. Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions. Boca Raton: CRCPress, 2014. 417 p.
2. Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: Учебник для ВУЗов; под ред. В.Н. Богословского. М.: Стройиздат, 1985. 367 с.
3. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха, 3-е изд. перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1971. 458 с.
4. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
5. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
6. Methods of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems. Part 1. Derivation of Hydrodynamic Equations of Air Ejection by a Stream of Free-Flowing Material in a Perforated Trough with Bypass Chamber / I.N. Logachev, K.I. Logachev, O.A. Averkova, I.V. Kryukov // Refractories and Industrial Ceramics. 2014. Volume 55, Issue 1. P. 70-76.
7. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. Methods of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems. Part 2. Determining the Efficiency of Recirculating Flows // Refractories and Industrial Ceramics. 2014. Volume 55, Issue 2. P. 164-168.
8. Ильина Т.Н., Феоктистов А.Ю., Овсянников и Ю.Г. Аналитическое описание процессов обработки воздуха в центральных кондиционерах // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. №1. С. 136–139.
9. Ильина Т.Н., Феоктистов А.Ю., Дегтев В.М. Прогнозирование и регулирование состояния микроклимата в замкнутом объеме со значительными тепло- и влагоизбыtkами // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 4. С. 121–123.
10. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М.: ГУП ЦПП, 2004. 55 с.

# **СТАБИЛИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ МАЛЫХ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

магистрант **Хафизова А.Ш.**  
канд. техн. наук, доц. **Гусячkin А.М.**

Казанский государственный  
энергетический университет, г. Казань

***Аннотация.** Неравномерное водопотребление в системах горячего водоснабжения зданий, работа местных автоматических регуляторов расхода теплоты абонентов приводят к нарушению гидравлического режима тепловых сетей и к возможным негативным последствием. В статье предложен способ и оборудование для стабилизации гидравлического режима в тепловых сетях малых теплогенерирующих предприятий.*

Нагрузка горячего водоснабжения жилых и общественных зданий может резко меняться по часам и в течение суток и по дням недели, что приводит к изменению характеристик сопротивления отдельных абонентов и к нарушению стабильности гидравлического режима тепловых сетей – режима расхода сетевой воды и давления в тепловых сетях. Наличие местных автоматических регуляторов количественного регулирования тепловой нагрузки также отрицательно влияет на стабильность гидравлического режима тепловых сетей [1]. Особенно это заметно в тепловых сетях малых теплогенерирующих предприятий, сетевые насосы которых, как правило, работают с постоянной частотой вращения. Изменение расхода сетевой воды и связанное с ним изменение давления приводит к нарушению как гидравлического, так и теплового режимов не только абонентов, но и источника теплоты.

Гидравлические режимы тепловых сетей рассчитываются на максимальный расход сетевой воды при максимальном теплопотреблении абонентами. Любое снижение тепловой нагрузки в процессе эксплуатации приводит к увеличению гидравлического сопротивления отдельных участков тепловой сети вследствие уменьшения пропускной способности клапанов автоматических регуляторов.

При параллельном присоединении абонентов к тупиковым сетям общий расход теплоносителя в сети равен сумме расходов на ответвлениях, а гидравлическая проводимость сети равна сумме гидравлических проводимостей отдельных ее участков [2]:

$$\frac{1}{S_c} = \frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_c}} \dots \frac{1}{\sqrt{S_n}}$$

где  $S_c, S_1, S_2 \dots S_n$  – характеристики сопротивления тепловой сети и отдельных участков.

Стабилизировать гидравлический режим такой сети при переменной тепловой нагрузке абонентов можно путем подключения параллельно абонентам дополнительного участка с регулируемой характеристикой сопротивления, то есть проводимости, так чтобы выдерживались условия:

$$\frac{1}{\sqrt{S_c}} = \sum \frac{1}{\sqrt{S_a}} + \frac{1}{\sqrt{S_p}}; \quad \frac{V_c^2}{\Delta P_c} = \sum \frac{V_a^2}{\Delta P_a} + \frac{V_p}{\Delta P_p}$$

где  $\frac{1}{\sqrt{S_c}}, \sum \frac{1}{\sqrt{S_a}}, \frac{1}{\sqrt{S_p}}$  – соответственно проводимости тепловой сети, суммарная отдельных участков тепловой сети с абонентами, дополнительного устройства.  $V_c, \Delta P_c, V_a, \Delta P_a, V_p, \Delta P_p$  – соответственно расход сетевой воды и потери давления в тепловой сети, суммарная на ответвлениях, в устройстве с регулируемой проводимостью.

На рис. 1 приведена динамика давления в подающем трубопроводе районной тепловой сети после выполнения мероприятий по стабилизации давления (на подающем трубопроводе установлено устройство для слива части воды в питательный бак при повышении давления сверх установленного). Так как давление в тепловых сетях изменяется интенсивно, то характеристика сопротивления дополнительного участка должна изменяться автоматически в соответствии с давлением в тепловой сети и уравнением 2.

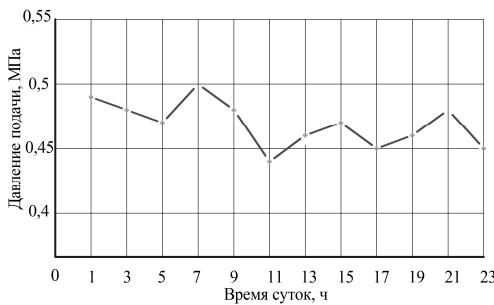


Рис. 1. Давление в подающем трубопроводе районной тепловой сети

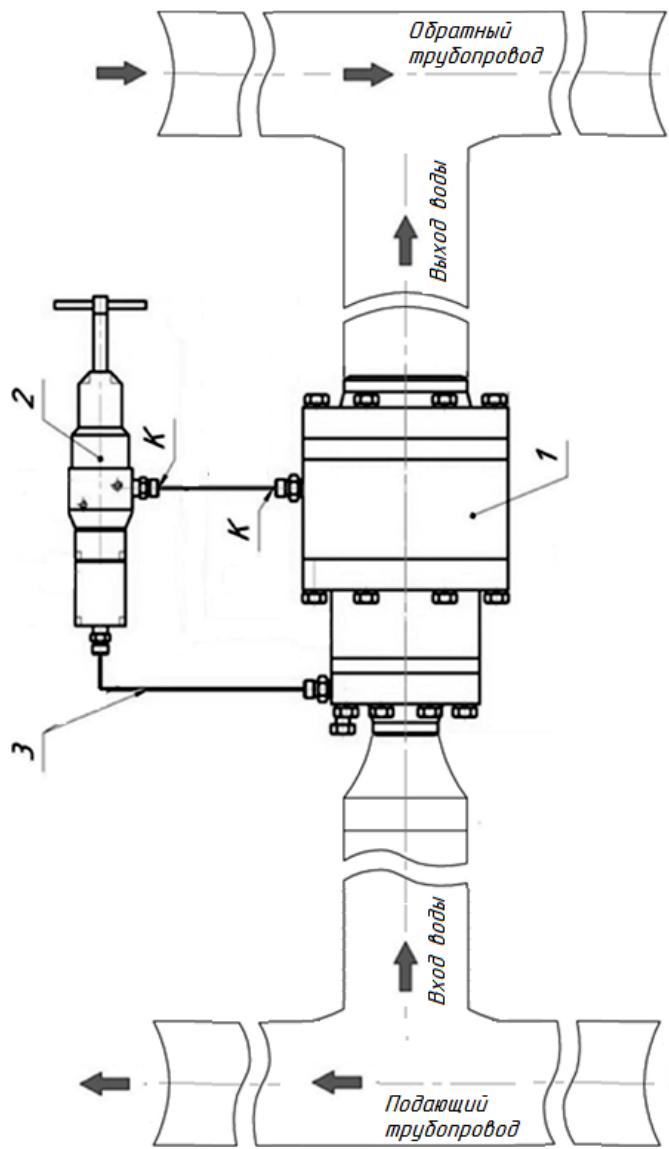


Рис. 2. Узел стабилизации давления:  
 1 – устройство исполнительное; 2 – устройство командного; 3 – трубопроводы импульсной обвязки;  
 К – командное давление

В качестве дополнительного участка с регулируемой характеристикой сопротивления нами предлагается использовать узел стабилизации давления (рис.2), представляющий собой перемычку между подающим и обратным трубопроводами тепловой сети с регулятором давления. Для удобства обслуживания узел стабилизации давления предлагается расположить у источника теплоты.

Нами предлагается в узле стабилизации использовать регулятор давления «после себя» поршневого типа, разработанный ООО НПП «Агрегат» (г. Казань), после его небольшой конструктивной доработки для работы в режиме регулятор давления «до себя» [3].

Регулятор давления (РД) состоит из двух основных конструктивных элементов – исполнительного механизма 1, врезанного в трубопровод, и регулирующего органа 2. В исходном состоянии регулятор давления закрыт. Редуцирование воды в исполнительном устройстве 1 происходит за счет дросселирования. Благодаря этому характеристика сопротивления регулятора может измениться в широких пределах. Устройство командное 2 устанавливает необходимое командное давление, которое передается в полость К устройства исполнительного. Для питания командного устройства используется давление сетевой воды в подающем трубопроводе. Под действием командного давления клапан устройства исполнительного открывается, образуя необходимый зазор и обеспечивая необходимую характеристику сопротивления дополнительного участка и всей тепловой сети, а следовательно, и стабильность гидравлического режима тепловой сети.

Проведенная экспериментальная проверка узла стабилизации давления на стенде показала хорошую его работоспособность, стабильность давления в подающей магистрали при разных расходах теплоносителя в сети. Максимальные отклонения давления в подающем трубопроводе от установленного значения составили  $+0,153 - 0,017 \text{ кг}/\text{см}^2$  ( $+15,3, - 1,7 \text{ кПа}$ ), что вполне допустимо для районных тепловых сетей.

### **Библиографический список**

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов; 8-е изд., стереот. /. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 472 с.
2. Теплоснабжение: Учебное пособие для студентов вузов/ В.Е. Козин, Т.А. Левина, А.П. Марков и др. М.: Высш. школа, 1980. 408 с.
3. Назмеев Э.Р. Проверка регуляторов давления на работоспособность и их настройка на испытательном стенде // Материалы докладов XII Международной молодежной научно-технической конференции «Тинчуринские чтения». Казань, 2017. С. 219.

---

## **2. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

---

### **ВЛИЯНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ИРАКА**

Аспирант Абдулваххаб Мухаммед Валид  
Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород  
Преподаватель Университета Диляты, Республика Ирак.

**Аннотация.** Рассмотрена проблема электромагнитной совместимости в высоковольтных распределительных сетях, связанная с потреблением реактивной мощности на основной частоте и искажением формы тока в питающих сетях. Получены оценочные показатели расчета потерь мощности при несинусоидальности питающего напряжения в высоковольтной распределительной сети Ирака для насоса ПНС мощностью 50 МВт. Приведены методы снижения несинусоидальности напряжения.

Мощные динамические нагнетатели мегаваттного класса являются основой газо-нефтеперекачивающих станций магистральных трубопроводов. От энергетических характеристик динамических нагнетателей во многом зависит энергоэффективность, надежность и экологичность труботранспортных систем Ирака. В настоящее время имеется устойчивая тенденция на использование высоковольтных преобразователей частоты регулируемых электроприводов динамических нагнетателей. Являясь нелинейной нагрузкой для высоковольтной распределительной сети, преобразователи частоты искажают форму тока в питающей линии и тем самым вызывают искажение питающего напряжения, что неблагоприятно сказывается на других электроприемниках.

Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) в высоковольтных распределительных сетях Ирака связана с потреблением реактивной мощности на основной частоте и искажением формы тока в питающих сетях. При этом генерирующие высшие гармоники тока вызывают дополнительные потери электроэнергии, нагрев изоляции и другие негативные воздействия.

Перекачка нефти по магистральным трубопроводам Ирака осуществляется в соответствии технологической цепочки (рис. 1).

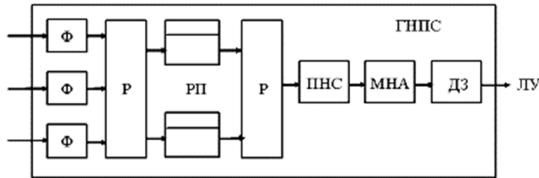


Рис. 1. Технологический процесс перекачки нефти по магистральному трубопроводу: Ф – приемные фильтры; Р – распределитель; РП – резервуарный парк; ПНС – подпорная насосная станция; МНА – магистральный насосный аппарат; ДЗ – дросселирующий затвор; ЛУ – линейный участок магистрального трубопровода

В настоящий момент в основном используются центробежные насосы с приводными высоковольтными асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Установленная мощность одного двигателя лежит в пределах от 3000 кВт до 10000 кВт. Для регулирования давления и подачи нефти используются два способа: управлением заслонкой на выходе насосов и изменением скорости вращения ротора насоса. Второй способ наиболее энергоэффективный и может использоваться не только для регулирования скорости вращения ротора насоса, но и для осуществления плавного пуска двигателя, особенно в тех случаях, когда насос работает в длительном номинальном режиме.

На рис. 2 представлен фрагмент схемы электроснабжения насосных агрегатов с регулируемыми электроприводами на базе преобразователь частоты – асинхронный двигатель. Как следует из рис. 2, каждый насос может работать при прямом подключении двигателя к высоковольтной сети или через тиристорный высоковольтный преобразователь частоты, осуществляющий плавный пуск или регулировании скорости вращения ротора одного из насосов.

Высшие гармонические составляющие напряжений и токов в системах электроснабжения Ирака вызывают дополнительные потери электрической энергии в питающих линиях, трансформаторах [1, 2].

Расчет потерь мощности в ЛЭП производится по формуле [3]:

$$\Delta P_{\Sigma n} = 3 \sum_{n=2}^p I_n^2 \cdot R_l \cdot k_m ,$$

где  $n$  – номер гармоники;  $p$  – число учитываемых гармоник;  $I_n$  – ток  $n$ -й гармоники;  $R_l$  – активное сопротивление линии на основной частоте;  $k_m$  – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта.

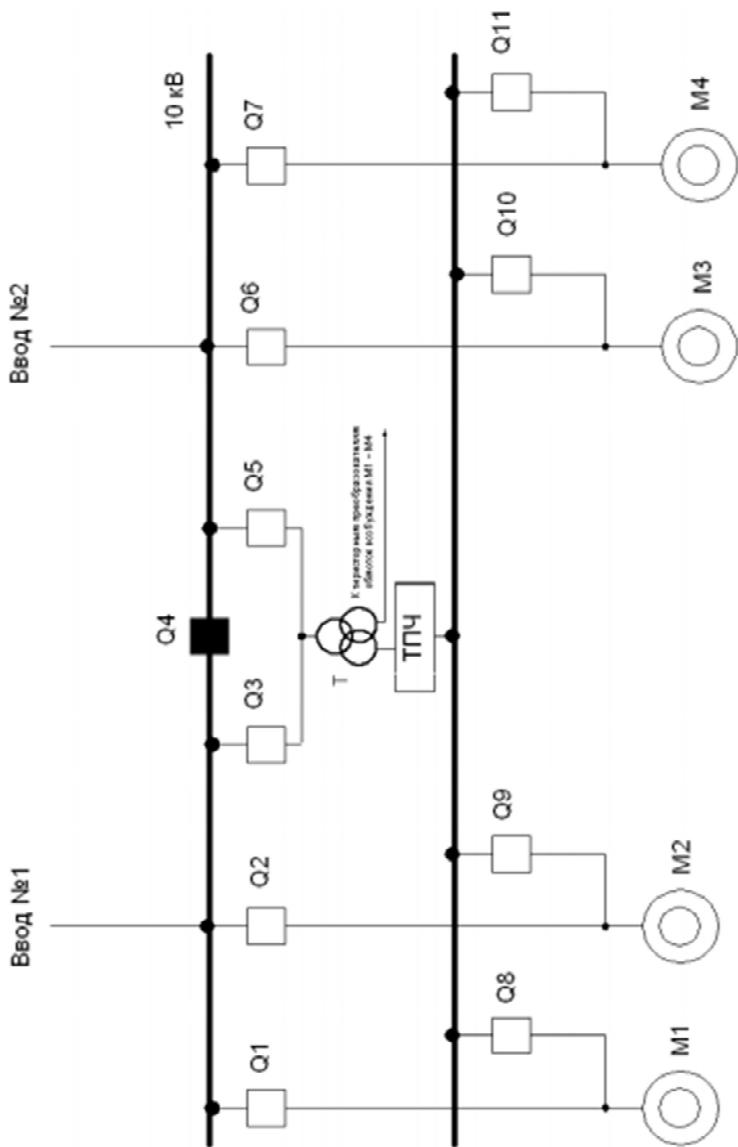


Рис. 2. Схема электроснабжения насосных агрегатов ПНС

Расчет потерь мощности в трансформаторе производится по формуле [3]:

$$\Delta P_{\Sigma n} = 3 \sum_{n=2}^p I_n^2 \cdot R_{k1} \cdot k_{nm},$$

где  $R_{k1}$  – сопротивление короткого замыкания трансформатора на основной частоте;  $k_m$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления короткого замыкания для высших гармоник вследствие влияния поверхностного эффекта и эффекта близости.

Проведенные предварительные расчеты для фрагмента схемы электроснабжения Ирака, показывают значительное влияние высших гармоник на потери электроэнергии в распределительных сетях. Результаты расчета потерь мощности и электроэнергии [4] примерно за восемь часов работы одного насоса мощностью 5000 кВт представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оценочные показатели расчета потерь мощности при несинусоидальности питающего напряжения в высоковольтной распределительной сети Ирака  $\Delta P$ , Вт, для насоса ПНС, мощность двигателя 50 МВт

Потери в ЛЭП	1500	1100	1020	1350	1080	980	1320	1150
Потери в трансформаторе	6700	6000	5900	6300	6150	5500	6200	6050
Общие потери	8200	7100	6920	7650	7230	6480	7520	7200
Суммарные общие потери электроэнергии $\Delta W_{\Sigma общ}$ , кВт·ч								466,4

Суммарные дополнительные потери мощности в элементах системы электроснабжения от несинусоидальности составили  $\Delta P_{\Sigma n_{общ}} = 58,3$  кВт, а суммарные дополнительные потери электроэнергии за восемь часов составили

$$\Delta W_{\Sigma общ} = 466,4 \text{ кВт·ч.}$$

Снизить несинусоидальность напряжения возможно следующими методами, которые подразделяются на три группы:

- схемный метод: нелинейные нагрузки выделяются на отдельную систему шин; расположение подобного вида нагрузок по различным узлам в системе электроснабжения; группировка преобразователей по

схеме умножения фаз; подключение нагрузки к системе с мощностью, большей чем у линейной:

- использование узкополосных резонансных фильтров, включая их параллельно нагрузке, а также включение фильтрокомпенсирующих, фильтросимметрирующих устройств, и активных фильтров продольного и поперечного включения;
- применение оборудования, имеющие улучшенные энергетические показателями: «не насыщающихся» трансформаторов, многофазных преобразователей.

Стоит заметить, что способы компенсации не универсальны: выбор метода зависит от ряда факторов [5]:

- уровень генерируемых гармоник, определяемые видом источника высших гармоник(дуговая печь, сварочные установки);
- положение источника в схеме и потоки мощности в точке подключения и его влияние на другие электроприемники, установленные в электрической близости;
- наличие в схеме средств компенсации
- частотные характеристики электроснабжения, а также вероятность появления резонанса на генерируемых частотах источником гармоник.

### **Библиографический список**

1. Аль Зухари Али Мухаммед, Виноградов А. А. Состояние вопроса об использовании (SMART GRID) [Электронный ресурс] // APRIORI. Серия: естественные и технические науки. 2014. № 3. URL: <http://www.apriori-journal.ru/journal-estesvennie-nauki/id/260>
2. Авербух М.А., Прасол Д.А., Хворостенко С.В. Экспериментальная оценка параметров режимов в высоковольтных рудничных сетях с мощными нелинейными электроприемниками // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. № 2 (Т. 21). С. 75-84.
3. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах системы электроснабжения / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаревич, В.Н. Горюнов и др. // Омский научный вестник. 2013. № 2. С. 178-183.
4. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов; Под ред. Ю. В. Шарова. 3-е изд. перераб и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 347 с.
5. Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в электроустановках промышленных предприятий / М.А. Авербух, В.А. Кузнецов, Д.Н. Коржов и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 5. С. 203-207.

## К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

канд. техн. наук, доц. **Андраниов Д.П.**

д-р техн. наук, проф. **Бадалян Н.П.**

Владимирский государственный  
университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир

**Аннотация.** Предлагается использовать методы математического программирования для обоснования оптимальных параметров электрических цепей, описываемых с помощью дифференциальных уравнений. В качестве целевой функции берется значение заброса силы тока/напряжения во время переходного процесса.

Известно, что при несбалансированном выборе параметров динамических систем во время переходных процессов, связанных с включением/отключением элементов, могут происходить скачкообразные изменения характеристик процессов, оказывающие существенное влияние на поведение всей системы. Для электрических цепей указанные явления выражаются в забросах силы тока/напряжения, что ведет к перегрузке, снижению долговечности, перегреву изоляции проводов. Выбор параметров электрической цепи, обеспечивающих наиболее благоприятный характер переходного процесса, может быть представлен как реализация оптимизационной задачи с привлечением методов математического программирования [1].

Цель работы: повышение эффективности электроснабжения предприятий за счет выбора оптимальных параметров, обеспечивающих заданные свойства объекта.

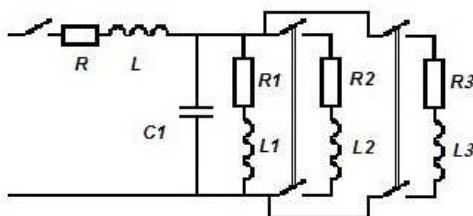


Рис. 1. Схема замещения исследуемой цепи

Электрическая цепь (рис. 1) рассматривается, как динамическая система, описываемая дифференциальными уравнениями в форме Коши:

$$\begin{vmatrix} \frac{di(t)}{dx} \\ \frac{di_1(t)}{dx} \\ \frac{di_2(t)}{dx} \\ \frac{di_3(t)}{dx} \\ \frac{du_C(t)}{dx} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 & A_{15} \\ 0 & A_{21} & 0 & 0 & A_{25} \\ 0 & 0 & A_{31} & 0 & A_{35} \\ 0 & 0 & 0 & A_{41} & A_{45} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i(t) \\ i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \\ u_C(t) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{u_{\text{bx}}(t)}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (1)$$

где  $i(t)$ ,  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  – сила тока в соответствующих ветвях;  $u(t)$  – напряжение на ёмкости С1;  $A_{ij}$  – коэффициенты при составляющих дифференциальных уравнений.

Результатом численного решения системы дифференциальный уравнений (1) является таблица значений, описывающая график поведения параметра. Решение проводилось численным методом Рунге-Кutta 4-го порядка в математическом пакете MathCad.

Отличительной особенностью современных математических пакетов (MathCad, Matlab и др.) является наличие встроенных оптимизационных процедур, тем самым исследователь освобождается от программирования уже известных вычислительных алгоритмов. Для оптимизационных расчетов использовалась процедура MathCad поиска минимума целевой функции.

В качестве критерия оптимальности принят показатель максимальной величины заброса напряжения за время переходного процесса.

Целевая функция, как математическая запись критерия оптимальности имеет вид

$$Z(C, R) \rightarrow \min \quad (2)$$

где  $C$  и  $R$  – искомые переменные, значения которых определяются в процессе решения задачи, сочетание этих параметров должно обеспечивать стремление заброса напряжения к минимуму.

Для каждого конкретного сочетания параметров С и R из диапазона их возможных изменений значение целевой функции определяется как результат поиска максимума из таблицы значений решения дифференциальных уравнений для данных параметров.

Следует отметить, что решаемая задача сводится к условной оптимизации.

При задании стартовых точек для параметров оптимизации, характер изменения параметров, как правило, не является оптимальным (рис. 2 – изменение силы тока в питающей ветви; рис. 3 – изменение напряжения на конденсаторе).

Проведение оптимизации по полям двух параметров (сопротивление питающей ветви  $R$  и ёмкость конденсатора  $C1$  гасителя реактивной мощности) с целевой функцией, учитывающей забросы напряжения на конденсаторе  $C1$  дает некоторое снижение забросов напряжения (рис. 4).

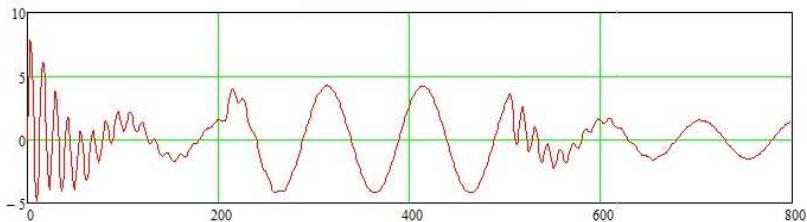


Рис. 2. Изменение силы тока в ветви  $R-L$

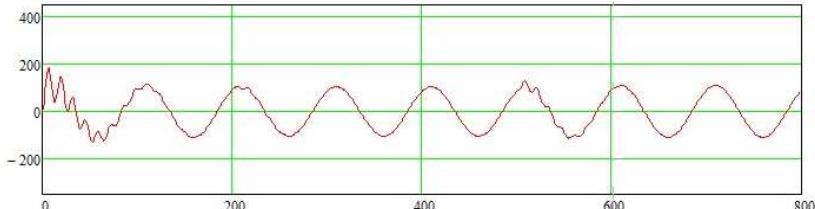


Рис. 3. Изменение напряжения на конденсаторе  $C1$

На рис. 5 показано сравнение оптимизированного и неоптимизированного вариантов переходного процесса силы тока в питающей ветви. Следует обратить внимание на то, что оптимизация велась относительно забросов напряжения на конденсаторе. Дело в том, что действующее значение силы тока в питающей ветви определяется нагрузкой и является величиной переменной, относительно которой поиск забросов тока требует преодоления дополнительных вычислительных сложностей. Проведенный численный эксперимент показал,

что, оптимизируя забросы напряжения, можно получить оптимальный характер изменения силы тока.

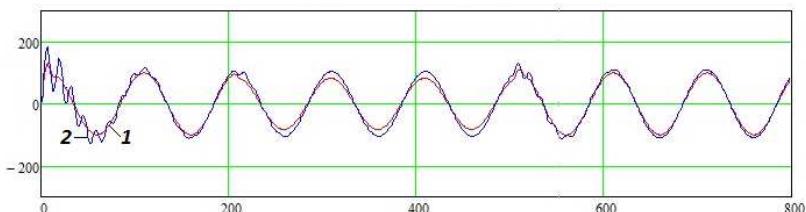


Рис. 4. Сравнение вариантов оптимального (1) и неоптимального (2) изменения напряжения на конденсаторе  $C_1$ .

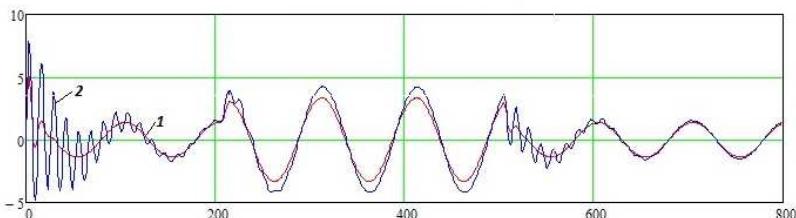


Рис. 5. Сравнение вариантов оптимального (1) и неоптимального (2) изменения силы тока в ветви  $R-L$ .

Применение методов математического программирования позволяет оптимизировать параметры динамических систем, не прибегая к аналитическому решению уравнений, описывающих поведение объектов. Привязка к целевой функции желаемого характера поведения и оптимизационный поиск сочетания параметров способствует повышению энергоэффективности всей системы.

#### Библиографический список

1. Костин В.И. Оптимизационные задачи электроэнергетики. Пб: СЗТУ, 2003. 120 с.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВИСАНИЯ ПРОВОДА ЛЭП С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

канд. техн. наук, доц. **Андранинов Д.П.**

д-р техн. наук, проф. **Бадалян Н.П.**

*Владимирский государственный  
университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир*

**Аннотация.** Моделирование провисания провода ЛЭП проводилось с использованием метода конечных элементов в пакете SolidWorks. Оценивалось влияние параметров провода (размеры, материал) и климатических условий (температура окружающей среды и толщина ледяной корки, покрывающей провод) на величину провисания и максимальных напряжений в опасных сечениях.

В настоящее время при расчетах механического состояния проводных элементов ЛЭП применяется методика, основанная на использовании фундаментальных зависимостей сопротивления материалов в сосредоточенных параметрах [1]. Такой подход подразумевает возможность появления ощутимых погрешностей, связанных с неточным представлением конструктивных особенностей, широким диапазоном изменения расчетных параметров, влиянием окружающей среды.

Развитие вычислительной техники и программных средств позволяет более детально моделировать процессы и аргументированно обосновывать параметры проектируемых объектов за счет их представления в распределенных параметрах [2].

Цель работы - оценка состояния проводной системы ЛЭП на стадии проектирования с учетом влияния температуры окружающей среды и возможности оледенения в зимний период года.

Провод (трос) линии электропередачи рассматривается в конечно-элементной постановке, при этом граничными условиями расчетной модели являются сечения провода в местах его подвеса на опорах ЛЭП.

Моделирование проводилось в программном комплексе SolidWorks, базируясь на исходном представлении объекта в виде 3D-модели.

Расчетная модель (рис. 1) учитывает жесткое закрепление троса по краям, вес троса и температуру на его наружной поверхности. Закрепление троса предусматривает выделение на его концах коротких цилиндрических участков, на которые накладываются жесткие связи.

В качестве материала троса принималась Сталь холоднотянутая 1045 с пределом текучести  $5,3 \cdot 10^8$  Па.

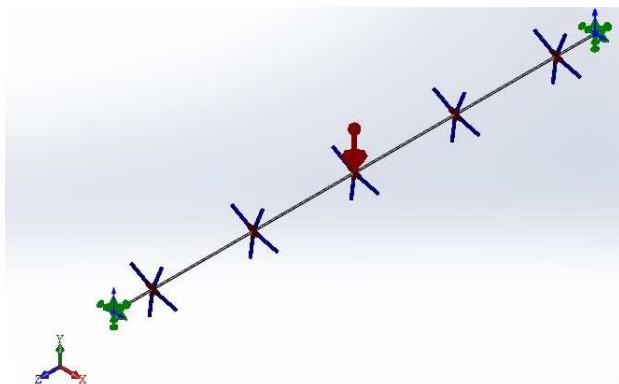


Рис. 1. Расчетная схема троса ЛЭП

Конфигурация, топология связей и размеры конечных элементов предварительно назначаются решателем вычислительного комплекса исходя из 3D-модели исследуемого объекта. В случае невозможности соблюдения сходимости итерационного процесса решатель программы останавливает вычисления и предлагает принять меры к обеспечению решаемости принятого варианта. Не меняя 3D-модель и граничные условия можно изменить плотность сетки конечных элементов для всего объекта или для его локальной части, где возникают вычислительные проблемы. Конфигурация и соотношения размеров тросов ЛЭП таковы (например, диаметр троса – 40 мм при длине 40 метров), что, как правило, решатель программы не в состоянии изначально корректно задать размеры и количество конечных элементов расчетной сетки. Следует также отметить, что не смотря на решение упруго-пластической задачи, решатель использует алгоритм вычислений, ориентированный на большие перемещения, о чем запрашивается у проектировщика в процессе диалога.

Пример разбиения на конечные элементы конца троса, покрытого льдом (наружный слой конечных элементов) приведен на рис. 2. Здесь же показано схематичное наложение жестких связей на поверхность конца троса.

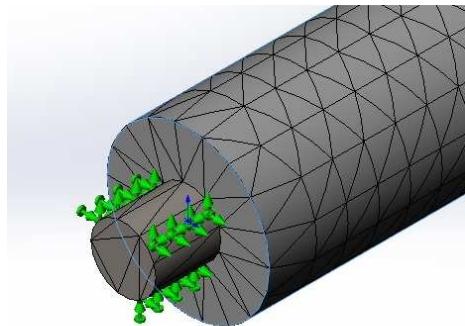


Рис. 2. Сетка конечных элементов троса, покрытого слоем льда

Влияние температуры на величину максимальных напряжений в опасном сечении троса (рис. 3) и на величину провисания троса в середине промежутка между опорами ЛЭП (рис.4) оценивалось для трех значений температуры: +20, 0, -20 ° С. Расчеты показывают, что снижение температуры троса на 20 ° С вызывает уменьшение провисания середины троса в среднем на 15 %.

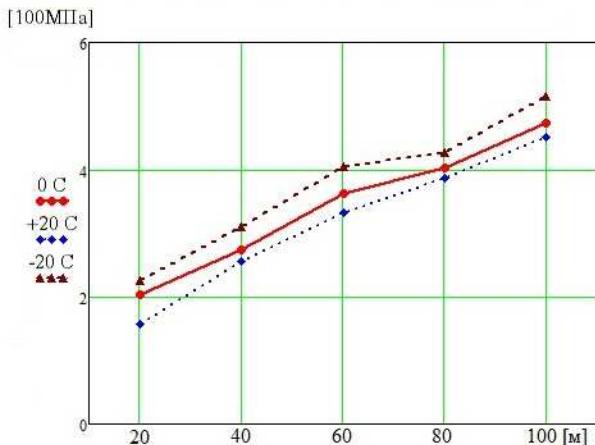


Рис. 3. Напряжения в опасных сечениях троса

Существенным фактором, определяющим надежность проводной системы ЛЭП, является возможность образования на проводах ледяной корки.

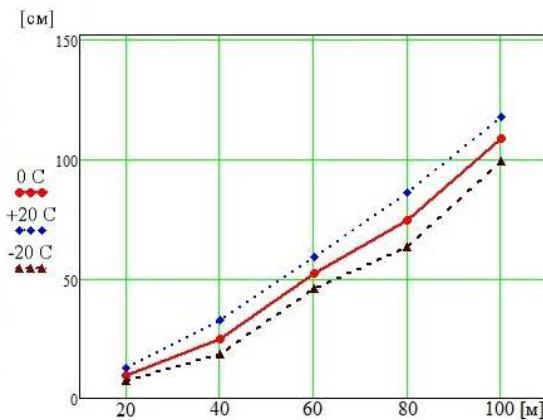


Рис. 4. Провисание троса в зависимости от длины пролета и температуры

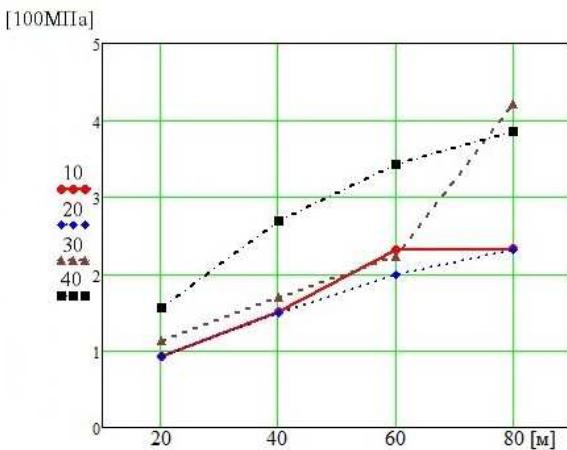


Рис. 5. Напряжения в опасных сечениях троса, покрытого коркой льда

В расчетных схемах подразумевается, что лед покрывает трос по всей наружной поверхности с постоянной толщиной. Температура

внешней среды задается на поверхности льда ( $0^{\circ}\text{C}$ ). Ледяная корка учитывается как жесткая упругая часть троса с механическими характеристиками льда (удельная плотность  $900 \text{ кг}/\text{м}^3$ , коэффициент Пуассона 0,32, модуль Юнга  $4,23 \cdot 10^9 \text{ Па}$ , предел прочности на растяжение 1 МПа, удельная теплоемкость  $4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  и т.д.).

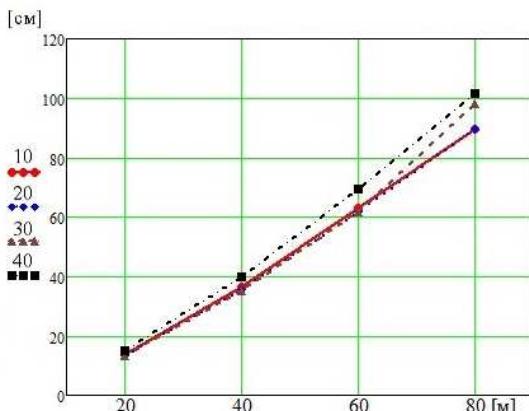


Рис. 6. Провисание троса в зависимости от толщины корки льда

Влияние толщины стенки льда на величину максимальных напряжений в опасном сечении троса (рис. 5) и на величину провисания троса в середине промежутка между опорами ЛЭП (рис.6) оценивалось для четырех значений толщины льда: 10, 20, 30, 40 мм.

Использование метода конечных элементов в сочетании с объемным представлением проводной системы ЛЭП на этапе проектирования дает возможность учитывать влияние климатических факторов на надежность электроснабжения, что, в свою очередь, способствует повышению энергоэффективности всей системы электроснабжения.

### Библиографический список

- 1. Лебедева Ю.В.** Анализ ожидаемых механических нагрузок на провода для различных концепций развития воздушных линий электропередачи // Известия Волгоградского ТГУ. 2011. № 8 (11). С. 93-97.
- 2. Андрианов Д.П.** Моделирование провисания провода ЛЭП методом конечных элементов // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах: тезисы докладов 2-ой Международной конференции. Тамбов: изд-во Першина Р.В., 2015. С. 35-36.

# **УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ В ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРОВ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА**

д-р техн. наук, проф. Артюхов И.И.

аспирант Бочкарев Д.А.

Саратовский государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

**Аннотация.** Современные средства силовой электроники позволяют преобразовывать параметры электрической энергии с минимальными потерями. Благодаря этому возникает возможность создания систем электроснабжения с использованием электрических машин, которые работают с изменяемой скоростью вращения вала. В статье рассматриваются вопросы построения и применения таких систем, предлагается вариант структурной схемы, обеспечивающей заданное управление потоками энергии между компонентами системы электроснабжения.

Для построения систем электроснабжения (СЭС) наиболее часто применяют синхронные электрические машины (ЭМ), которые работают с фиксированной скоростью вращения вала для обеспечения стабильности частоты выходного напряжения. Однако работа ЭМ в таком режиме не всегда возможна, например, когда источником механической энергии является ветровая турбина. В других случаях, стабилизация скорости вращения вала приводного двигателя снижает энергетическую эффективность системы генерации. В частности, при использовании дизеля в качестве первичного двигателя фактический расход топлива при работе такой системы на переменную нагрузку оказывается значительно выше заявленной величины.

С развитием силовой электроники появились новые возможности совершенствования систем генерирования электроэнергии. Основным моментом является работа ЭМ с переменной частотой вращения, причем могут быть применены как синхронные [1], так и асинхронные машины [2]. При этом частота вращения вала ЭМ может устанавливаться принудительно, в соответствии с заданными настройками регулятора подачи топлива в дизель-генераторных установках или определяться внешними условиями работы системы генерирования электроэнергии, например, при регулировании производительности ГПА за счет изменения частоты вращения вала [3]. Функции обеспечения па-

раметров вырабатываемой электроэнергии (действующего значения, частоты и формы кривой генерируемого напряжения) в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» при переменных, в общем случае, скорости вращения вала ЭМ, а так же величине и характере нагрузки переносятся на преобразовательные устройства.

Вариант построения локальной СЭС на базе ЭМ с изменяемой скоростью вращения вала показан на рис. 1. Источником электрической энергии с параметрами  $U_1$ ,  $f_1$  является синхронный генератор (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов, к выходу которого через сетевой дроссель  $L$  подключен неуправляемый выпрямитель НВ. Выпрямленное напряжение  $U_B$  через фильтр поступает на вход автономного инвертора напряжения АИН, на выходе которого установлен синусоидальный фильтр.

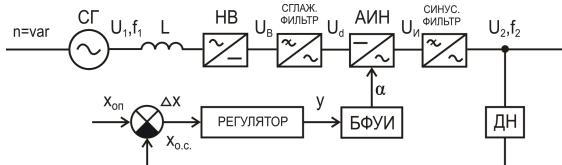


Рис. 1. СЭС на основе СГ с постоянными магнитами

Сетевой дроссель  $L$  уменьшает негативное влияние НВ на СГ за счет снижения уровня высших гармоник в токе якоря. Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации напряжения  $U_d$  на входе АИН, синусоидальный фильтр преобразует ступенчатое напряжение  $U_i$  на выходе АИН в напряжение квазисинусоидальной формы.

С точки зрения теории автоматического управления задающим воздействием в рассматриваемой системе является опорный сигнал  $X_{\text{оп}}$ , который пропорционален требуемому значению напряжения  $U_2$ . Возмущающими воздействиями являются скорость вращения  $n$  приводного вала СГ и ток нагрузки СЭС. Управляющее воздействие – параметр  $\alpha$ , от которого зависит процесс формирования широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Информация о фактической величине напряжения  $U_2$  от датчика напряжения ДН в виде сигнала обратной связи  $X_{\text{ос}}$  сравнивается с величиной опорного сигнала  $X_{\text{оп}}$ . На основании разности сигналов  $\Delta X = X_{\text{оп}} - X_{\text{ос}}$  регулятор формирует управляющий сигнал, от которо-

го зависит параметр  $\alpha$ . Блок формирования управляющих импульсов БФУИ задает частоту  $f_2$  выходного напряжения АИН, а также его величину  $U_2$  за счет ШИМ.

Предположим, что скорость  $n$  вращения вала имела номинальную величину. При этом система находилась в равновесии, при котором выходное напряжение  $U_2$  также было равно номинальному значению. Затем произошло уменьшение скорости вращения вала на величину  $\Delta n$ . В результате величина напряжения  $U_1$  и его частота  $f_1$  уменьшились соответствующим образом.

В результате уменьшения величины напряжения  $U_1$  уменьшаются напряжения  $U_B$  и  $U_d$  на выходах выпрямителя и сглаживающего фильтра соответственно. На рассматриваемый момент параметр  $\alpha$  имел какое-то значение, сформированное регулятором. Поэтому вследствие уменьшения напряжения  $U_d$ , которое является входным напряжением для АИН, амплитуда напряжения на выходе последнего вначале также уменьшается, что приводит к уменьшению действующего значения напряжения  $U_2$  и сигнала обратной связи  $X_{O.C.}$ .

Разность сигналов  $\Delta X = X_{\text{оп}} - X_{O.C.}$ , получившая положительное приращение, воздействует на регулятор, который за счет соответствующего изменения сигнала управления увеличивает значение параметра  $\alpha$ . Вследствие этого возрастает величина напряжения  $U_2$  до заданного значения.

Процесс стабилизации напряжения осуществим до тех пор, пока параметр  $\alpha$  не достигнет некоторого предельного значения. После этого уменьшение скорости  $n$  вращения вала будет сопровождаться соответствующим уменьшением выходного напряжения СЭС. При увеличении скорости  $n$  вращения вала система будет отрабатывать соответствующие увеличения напряжений  $U_1$ ,  $U_B$ ,  $U_d$  за счет уменьшения параметра  $\alpha$ , сохраняя величину напряжения  $U_2$  на заданном уровне.

Каждый из силовых элементов схемы на рис. 1 обладает сопротивлением, которое зависит от частоты протекающего через него тока. На этих элементах создаются падения напряжений, в результате чего увеличивается зависимость выходного напряжения  $U_2$ ,  $f_2$  от тока нагрузки.

В [4] на примере СГ мощностью 250 кВт показано, что при фиксированных значениях параметра ШИМ  $\alpha = 1$  изменение нагрузки от нуля до номинального значения при  $\cos \varphi = 0,8$  приводит к уменьшению напряжения на 6,7 – 10,7% от напряжения холостого хода в зависимости от значения частоты вращения вала. Поэтому для поддержа-

ния выходного напряжения локальной СЭС в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 схема на рис. 1 должны быть дополнена устройствами, обеспечивающими повышение напряжения  $U_2$  до заданного уровня в ситуации, когда скорость вращения вала СГ имеет минимальное значение при максимальной нагрузке СЭС. Возможные варианты решения этой задачи подразумевают установку повышающего трансформатора либо после СГ, либо на выходе СЭС. Кроме того, после НВ можно установить преобразователь, повышающий напряжение  $U_d$  на входе АИН.

Используя изложенные выше принципы можно построить локальную СЭС на основе группы СГ с переменной скоростью вращения вала, использующих различные источники механической энергии, в частности, ветряных колес [5], двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин. При этом кроме задачи стабилизации напряжения  $U_2$ , необходимо решить задачу суммирования потоков энергии всех генераторов СЭС и заданного распределения нагрузки между ними. Один из вариантов решения этой задачи, основанный на импульсно-фазовом управлении выпрямителей, предложен в [5].

Суммировать потоки энергии можно как на шинах переменного, так и постоянного тока. Для локальных СЭС, нагрузкой которых является технологическое оборудование, использующее частотно-регулируемый электропривод, более целесообразной является схема с суммированием энергии на шине постоянного тока.

В качестве примера на рис. 2 приведена схема локальной СЭС газокомпрессорного цеха, которая образована на базе генераторов собственных нужд (ГСН) нескольких газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Турбины ГПА вращаются с различными скоростями  $n_k$ , вследствие чего их генераторы собственных нужд вырабатывают электроэнергию с частотой  $f_k$  и действующим значением напряжения  $U_k$ . Потоки электроэнергии переменного тока с указанными параметрами с помощью выпрямителей  $B_k$ , регуляторов постоянного напряжения РПН <sub>$k$</sub>  и сглаживающих фильтров СФ <sub>$k$</sub>  преобразуются в электроэнергию постоянного тока, потоки которой суммируются на шине постоянного тока. Далее инверторы  $I_k$  и выходные фильтры ВФ <sub>$k$</sub>  каждого ГПА обеспечивают получение электроэнергии переменного тока промышленной частоты, необходимой для питания электроприемников ЭП <sub>$k$</sub>  данного ГПА. При этом показатели качества электрической энергии должны соответствовать ГОСТ 32144-2013 в заданном диапазоне изменения параметров нагрузки.

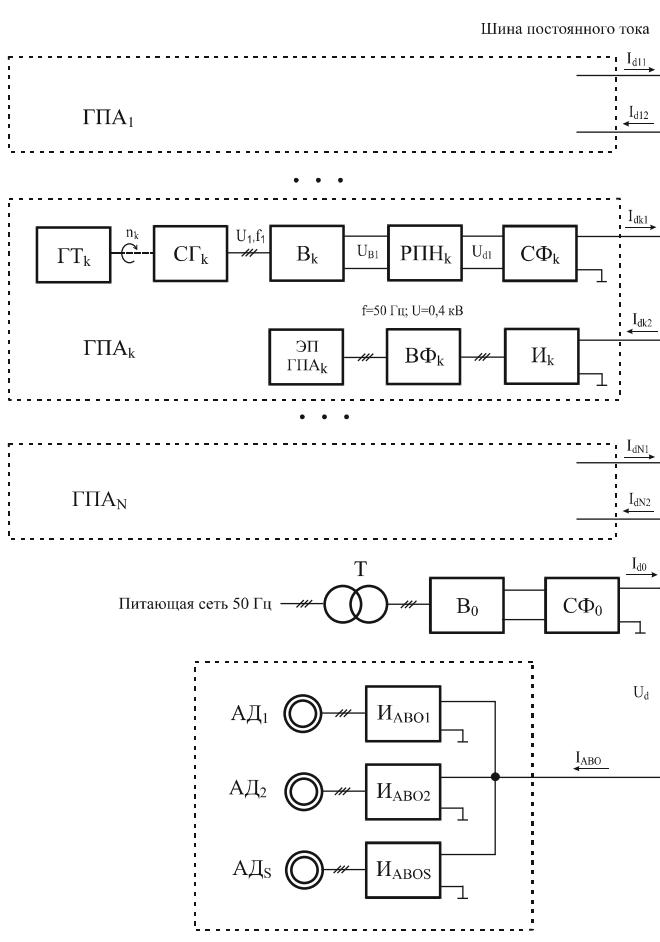


Рис. 2. Локальная СЭС компрессорного цеха на основе группы СГ

Для первоначального запуска ГПА в работу предназначен дополнительный источник энергии постоянного тока, который включает в себя сетевой трансформатор  $T$ , выпрямитель  $B_0$  и сглаживающий фильтр  $C\Phi_0$ . Созданное этим источником напряжение  $U_d$  подается на инверторы  $I_k$ , которые через выходные фильтры  $B\Phi_k$  запитывают электроприемники  $\text{ЭП}_k$  соответствующих ГПА.

После запуска и выхода ГПА на номинальный режим ЭСН может отдать в сеть мощность  $\Delta P_k$ . Если в работе находится  $N$  агрегатов, то суммарная избыточная мощность составляет  $N\Delta P_k$ . При определенном числе  $N$  этой мощности может оказаться вполне достаточным для обеспечения работы аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа. Избыток мощности на шине постоянного тока с помощью инверторов  $I_{AVO}$  преобразуется в электроэнергию переменного тока, частота и действующее значение которой необходимы для питания электродвигателей АВО газа. Дефицит электроэнергии для питания электродвигателей АВО газа восполняется из питающей сети с помощью трансформатора Т и выпрямителя  $B_0$ .

Уравнение баланса мощностей на шине постоянного тока (без учета потерь мощности в преобразовательных устройствах) имеет вид

$$P_T + \sum_{k=1}^N P_{Tk} = \sum_{k=1}^N P_{EPk} + P_{AVO}, \quad (1)$$

где  $P_T$  – мощность, забираемая из питающей сети 50 Гц через трансформатор;  $P_{Tk}$  – мощность, отдаваемые ГСН соответствующего ГПА;  $P_{EPk}$  – мощности, потребляемые электроприемниками ЭПк соответствующего ГПА;  $P_{AVO}$  – мощность, потребляемая электродвигателями вентиляторов АВО газа.

На основании (1) следует, что мощность, потребляемая рассматриваемым электротехническим комплексом из питающей сети 50 Гц, может быть определена по формуле

$$P_T = \sum_{k=1}^N P_{EPk} + P_{AVO} - \sum_{k=1}^N P_{Tk}. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что для уменьшения затрат на приобретение электроэнергии у сетевой организации необходимо, чтобы ГСН всех ГПА работали в номинальном режиме.

Так как суммирование и распределение потоков энергии происходит на общей шине постоянного тока с напряжением  $U_d$ , то формулу (2) можно записать следующим образом

$$I_{d0} = \sum_{k=1}^N (I_{dk2} - I_{dk1}) + I_{AVO}, \quad (3)$$

где  $I_{d0}$  – выходной ток выпрямителя  $B_0$ ;  $I_{dk1}$ ,  $I_{dk2}$  – токи  $k$ -го ГПА после сглаживающего фильтра  $C\Phi_k$  и на входе инвертора  $I_k$ ;  $I_{AVO}$  – суммарный ток, потребляемый АВО газа от шины постоянного тока.

Из формулы (3) следует, что выходной ток  $I_{d0}$  выпрямителя В<sub>0</sub> имеет минимальное значение, если в заданном диапазоне изменения токов  $I_{dk2}$  и  $I_{ABO}$  токи  $I_{dk1}$  равны номинальным значениям. Этого можно добиться за счет соответствующего закона управления регуляторами постоянного напряжения РПН <sub>$k$</sub> .

Представленная схема локальной СЭС имеет ряд преимуществ по сравнению с типовыми решениями.

ГПА получают возможность работать с регулируемой производительностью для оптимизации режима транспорта газа, благодаря чему снижается расход топливного газа.

Повышается энергонезависимость объекта транспорта газа (компрессорной станции) от неблагоприятных воздействий, возникающих в системе внешнего электроснабжения.

Появляется возможность передавать избыток электроэнергии,рабатываемой генератором собственных нужд ГПА, другим электро-приемникам компрессорного цеха, что снижает затраты на покупку и передачу электроэнергии.

### **Библиографический список**

1. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. URL: [www.science-education.ru/108-8615](http://www.science-education.ru/108-8615).
2. Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарасов И.М. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2010. Вып. 2. С. 53–56.
3. Артюхов И.И., Бочкирев Д.А., Степанов С.Ф. Совершенствование системы электроснабжения газоперекачивающих агрегатов с генераторами собственных нужд // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. № 1 (80). Т.3. С. 176–181.
4. Артюхов И.И., Бочкирев Д.А. Автономная система электроснабжения на основе генератора с изменяемой частотой вращения вала // Научное обозрение. 2014. № 3. С. 178–183.
5. Степанов С.Ф., Павленко И.М., Ербаев Е.Т. Обеспечение эффективной работы мультимодульной ветроэлектростанции при изменении скорости ветра и нагрузки [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: [www.science-education.ru/113-11407](http://www.science-education.ru/113-11407).
6. Коваленко П.В., Коваленко В.В., Степанов С.Ф. Система обеспечения параллельной работы генераторов различной мощности на общую шину постоянного тока // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. № 2 (66). Т.2. С. 77–81.

# **СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ЗВЕНОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

д-р техн. наук, проф. Артюхов И.И.

магистрант Краснова Н.Д.

магистрант Русяева М.Ю.

Саратовский государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

**Аннотация.** Основными потребителями энергии на промышленных предприятиях до недавнего времени являлись трехфазные асинхронные двигатели, представляющие практически линейную активно-индуктивную нагрузку. Однако в настоящее время для регулирования производительности этих двигателей все чаще применяют преобразователи частоты, которые являются источником высших гармоник. Происходит ухудшение качества электроэнергии в сети промышленного предприятия, появляются дополнительные потери в кабельных линиях и трансформаторах. В этих условиях определенные преимущества может дать переход на электроснабжение цехов предприятия с использованием постоянного тока. Аспекты этого решения рассматриваются в статье.

Трехфазный асинхронный двигатель (АД) занимает доминирующее место среди устройств преобразования электрической энергии в механическую, в современном технологическом оборудовании. Однако на современных предприятиях все реже можно встретить электродвигатель, работающий непосредственно от трёхфазной сети 0,38 кВ, 50 Гц. Вместо этого электродвигатель подключается к сети через преобразователь частоты (ПЧ), что позволяет упростить и удешевить кинематическую схему без снижения эксплуатационных характеристик оборудования, а также существенно расширить его возможности.

Вместе с тем, интенсивный процесс внедрения частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП) обозначил такую проблему, как ухудшение качества электроэнергии в сети [1]. Это объясняется тем, что входное звено ПЧ выполняется в виде выпрямителя, который потребляет из сети ток несинусоидальной формы. При определенном количестве работающих ЧРП показатели качества электроэнергии, характеризующие несинусоидальность напряжения, перестают соответствовать требованиям ГОСТ 32144-2013. Из-за высших гармоник токов и напряжений возрастают потери в кабельных линиях и трансформаторах, нарушается работа конденсаторных компенсирующих

установок, устройств автоматики и защиты. Характерным примером является ситуация, когда на предприятиях магистрального транспорта газа начали активно внедрять ЧРП на установках охлаждения газа [2].

В этих условиях становится очевидным, что внутрицеховая система распределения энергии на переменном токе является неэффективной. Определенные преимущества может дать переход на электроснабжение цехов предприятия с использованием постоянного тока [3]. В связи с этим актуальным является комплекс задач по разработке структуры системы электроснабжения с промежуточным звеном постоянного тока, обоснованию целесообразности ее построения, моделированию и расчету основных элементов [4].

Необходимо также отметить, что благодаря достижениям силовой электроники постепенно сдают позиции и трёхфазные АД. Им на смену приходят вентильные бесколлекторные электродвигатели постоянного тока. Схема управления, как правило, интегрированная в двигатель, позволяет изменять скорость вращения и момент на валу, обеспечивать режим эффективного торможения – с рекуперацией, то есть возвращением электроэнергии в сеть, или без неё, причём надёжность таких электродвигателей и неприхотливость в обслуживании уравнивают их с АД в плане практической применимости.

Идеи по созданию систем электроснабжения промышленных предприятий с промежуточным звеном постоянного тока начали выдвигаться более 10 лет назад. Они оказались плодотворными для тех объектов, где имеется большое количество технологического оборудования с ЧРП [5]. Надо отметить, что работы по развитию данного направления в электроэнергетике активно ведутся в Европе. По данным журнала SW&W в Германии запущен проект по созданию высокоэффективных системных решений с электроприводами на основе сетей постоянного тока, в реализации которого принимают участие 21 промышленная компания, 4 научно-исследовательских института и центральный Союз электротехнической и электронной промышленности [6]. Проект финансируется в течение трёх лет концерном BMW в сумме 10 млн. евро.

Возможны различные варианты перевода сетей внутреннего электроснабжения предприятий с переменного на постоянный ток. Так как трехфазному АД для работы необходим переменный ток, каждый электродвигатель необходимо обеспечивать автономным инвертором. Схемотехника таких устройств хорошо отработана. Для цеха или участка цеха, уже оснащённого современным оборудованием, в кото-

ром используются асинхронные электродвигатели с ЧРП или современные вентильные безколлекторные электродвигатели постоянного тока, такой перевод практически означает отказ от большого количества индивидуальных маломощных выпрямителей. Им на смену приходят мощные высокоеффективные устройства, преобразующие входящий переменный ток в постоянный, который затем будет распределяться по конечным потребителям.

Выбор топологии сети постоянного тока представляет собой важную задачу. Очевидно, что он должен осуществляться на основании технико-экономических расчетов с учетом специфики запитываемого оборудования. Исследователями МГТУ «Станкин» в качестве стандарта для внутрицеховых электросетей предлагается трехпроводная сеть постоянного тока +220, 0, – 220 Вольт [3]. Такое решение имеет определенные преимущества по сравнению с двухпроводной сетью, в частности, за счет возможности получения двух разнополярных напряжений от одной линии. Это позволяет применять более простые схемы инверторов с меньшим числом силовых активных элементов. Кроме того, в трехпроводной сети постоянного тока в силу симметрии обеспечивается нулевое электростатическое поле, а при симметрии нагрузки – нулевое магнитное поле вокруг питающего кабеля.

При создании систем электроснабжения с промежуточным звеном постоянного тока должна быть решена задача обеспечения электромагнитной совместимости трансформаторно-выпрямительных подстанций с источниками питания. Одним из решений этой задачи является увеличение фазности применяемых схем выпрямления.

На рис. 1 показана схема электроснабжения группы ЧРП, в которой трансформатор Т подстанции выполнен с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена по схеме «звезда», другая – по схеме «треугольник» [7].

Выпрямитель состоит из двух секций  $B_\lambda$  и  $B_\Delta$ , входы которых соединены с соответствующими обмотками трансформатора, а к выходам через уравнительный дроссель  $L_d$  и сглаживающие фильтры  $C\Phi_1...C\Phi_N$  подключены инверторы  $I_1...I_N$ , управляющие электродвигателями  $M_1...M_N$ . Уравнительный дроссель  $L_d$  в схеме рис. 1 служит для устранения уравнительных токов, возникающих вследствие того, что пульсации выходных напряжений выпрямителей  $B_\lambda$  и  $B_\Delta$  смещены относительно друг друга на 30 эл. град. Так как напряжения вторичных обмоток трансформатора смещены по фазе относительно друг друга на угол, равный 30 эл., град., то при равенстве токов

вторичных обмоток будет происходить компенсация 5-й и 7-й гармоник магнитного потока. В результате в токе первичной обмотки трансформатора указанные гармоники также будут скомпенсированы.

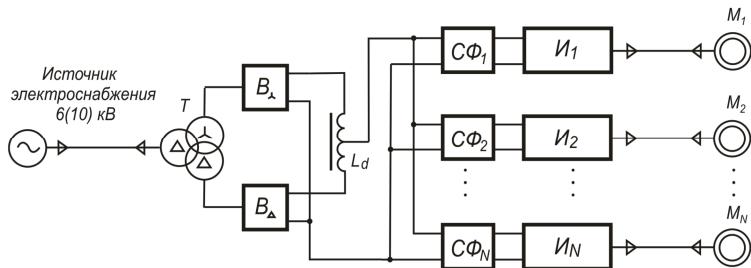


Рис. 1. Схема электроснабжения группы ЧРП

На рис. 2 показана виртуальная осциллограмма входного тока трансформаторно-выпрямительной подстанции, полученной в результате моделирования рассмотренной схемы в пакете MATLAB с пакетом расширения Simulink.

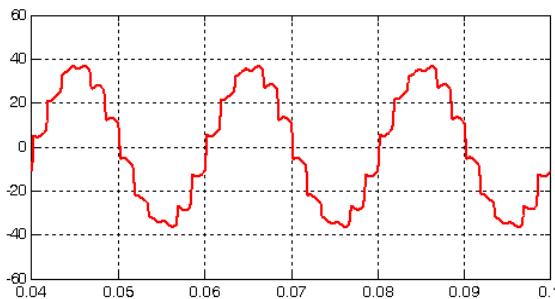


Рис. 2. Виртуальная осциллограмма входного тока трансформаторно-выпрямительной подстанции (по оси абсцисс – время, мс; по оси ординат – ток, А)

При моделировании полагалось, что в работе одновременно находятся 12 единиц ЧРП мощностью 37 кВт каждый. Питание на уровне 10 кВ осуществлялось от трансформатора 110/ 10 кВ мощностью 10 МВА. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока не

превышает 11 %, вследствие чего показатели качества электроэнергии на шинах 10 кВ, характеризующие несинусоидальность напряжения, имеют допустимые значения.

Реализация внутрицехового электроснабжения на постоянном токе позволяет уменьшить потери электроэнергии, повысить надежность электроснабжения, снизить остроту проблемы электромагнитной совместимости. Система электроснабжения на постоянном токе отличается хорошей интегрируемостью с накопителями энергии, входящими в состав энергоустановок, использующих возобновляемые источники энергии. Так же современные системы освещения (включая светодиодные) и обогрева, компьютерная техника, средства управления, которые либо уже получают питание на постоянном токе через встроенный выпрямитель, либо могут быть переведены на питание на постоянном токе без существенной модернизации схем электроснабжения.

### **Библиографический список**

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2004. 358 с.
2. Артюхов И.И., Бочкарева И.И., Тримбач А.А. Качество электроэнергии в системе электроснабжения газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 4. № 2 (60). С. 165–170.
3. Змиева К.А., Кулагин О.А. Разработка энергоэффективной концепции построения распределительных сетей промышленного предприятия // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 3. С. 22–28.
4. Змиева К.А., Углева Е.М., Кузнецов Е.В. Моделирование сети электроснабжения промышленного предприятия с использованием постоянного тока // Вестник МГТУ Станкин. 2014. № 1(28). С. 112–117.
5. Перестраиваемая по структуре автономная система электроснабжения технологического комплекса с многодвигательным электроприводом / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, А.В. Коротков и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 1 (10). Т.1. С. 20–28.
6. Forschungsprojekt: Gleichspannung für die industrielle Energieversorgung [Сайт] URL: <http://www.sonnewindwaerme.de/panorama/forschungsprojekt-gleichspannung-fuer-industrielle-energieversorgung/>.

# ИСКЛЮЧЕНИЕ АПЕРИОДИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ЦИФРОВЫХ ЗАЩИТАХ

д-р техн. наук, проф. наук **Бурянина Н.С.**<sup>1</sup>  
канд техн. наук, проф. **Королюк Ю.Ф.**<sup>1</sup>

канд техн. наук, доц. **Лесных Е.В.**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Восточно-Сибирский федеральный университет  
им. М.К. Аммосова, г. Якутск*

<sup>2</sup>*Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск*

**Аннотация.** В работе предложен алгоритм определения вторичных токов исключающий практически апериодическую составляющую при коротком замыкании. Алгоритм реализуется тремя измерениями через равные интервалы дискретизации, двумя вычитаниями и одним умножением, что позволяет применять его при коротких замыканиях, сопровождаемых насыщением магнитопроводов трансформаторов тока.

**Введение.** Релейную защиту (РЗ) можно рассматривать как управляющую систему, которая получает информацию о токах, напряжениях и состоянии коммутационных аппаратов управляемых объектов. Сложность реализации релейных цифровых защит определяется ограниченным временем, выделенным для анализа режима управляемого объекта. Особенно это существенно для мощных электрических систем, где измеряемые токи в защищаемых объектах кроме периодической составляющей содержат апериодическую.

**Цели работы.** Сложность управления объектом усугубляется тем, что в мощных электрических системах токи коротких замыканий могут насыщать магнитопроводы трансформаторов тока, и информация, поступающая в аналитический блок РЗ, искажена настолько, что приводит либо к отказу РЗ, либо к ложной ее работы. Примером может служить осциллограмма вторичного тока, приведенная на рис. 1. Целью работы является разработка алгоритма вычисления вторичных токов, свободных от апериодических составляющих и пропорциональных первичным в любой момент времени.

**Содержательный текст.** Одним из выходов из сложившейся ситуации является задержка срабатывания РЗ, что тоже нежелательно, так как увеличивается объем повреждения.

Современные цифровые защиты определяют текущее значение измеряемого параметра как полусумму двух измерений на каждом ин-

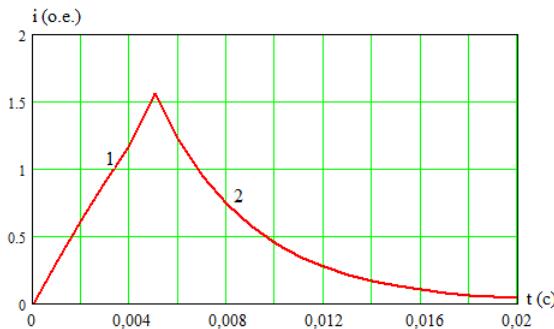


Рис.1. Форма кривой вторичного тока при насыщении магнитопроводов трансформаторов тока (1 – вторичный ток пропорционален первичному; 2 – искаженный вторичный ток)

тервале дискретизации, что не исключает в токах, поступающих в аналитический блок РЗ апериодическую составляющую.

Для резкого уменьшения апериодической составляющей во вторичном токе предлагается алгоритм определения текущего значения тока из трех измерений разделенных двумя интервалами дискретизации. Текущее значение тока определяется как [1]:

$$i(t) = \frac{2i(t) - i(t + \Delta t) - i(t - \Delta t)}{(4 \sin(\omega \cdot \Delta t / 4))^2} \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – интервал дискретизации;  $\omega$  – угловая частота;  $i(t)$  – текущее значение тока в момент времени  $t$ .

Уравнение (1) позволяет уменьшить в вычисленном текущем значении тока апериодическую составляющую. Объясняется это тем, что в уравнении в числителе вычисляются разности однополярных величин. На рис. 2 приведены величины апериодических составляющих в вычисленных параметрах при частоте сканирования в 1600 Гц, где 2а – величина апериодической составляющей в относительных единицах в первичных токах, 2б – рассчитанные по уравнению (1), начиная с момента времени, равного 0,01 с. Наибольшее значение вычисленной апериодической составляющей содержит ток при постоянной времени сети в 0,005 с. При постоянных времени сети, равных 0,05 и 0,1 с. остаточные апериодические составляющие не превышают 0,06% от

величин апериодических составляющих измеряемых параметров. В момент времени, равном времени первого измерения, остаточная апериодическая составляющая в рассчитанном токе равна 0,1% и 0,4% при постоянных времени сети в 0,1 с. и 0,05 с. Следует предположить, что при постоянных времени равных и меньше 0,005 с. насыщения магнитопроводов трансформаторов тока не возникнет. Поэтому следует предусмотреть на основании анализа конфигурации сети возможность насыщения магнитопроводов трансформаторов тока.

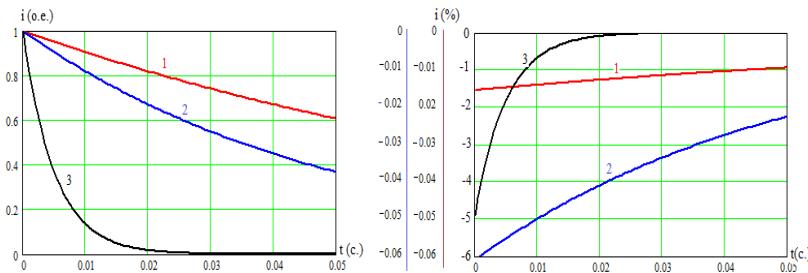


Рис. 2. Апериодические слагающие тока: измеряемых и рассчитанных:  
1 – постоянная времени  $T = 0,1$  с.; 2 –  $0,05$  с.; 3 –  $0,005$  с.;  
а) – измеряемый ток, б) – рассчитанный по уравнению (1).

В литературе [2–4] рекомендуется применять частоту съема аналоговой информации 1200 – 1600 Гц. Не рекомендуется снимать информацию с частотой более 2000 Гц. Объясняется это тем, что остается очень мало времени на обработку снятой информации. В современных алгоритмах цифровых релейных защитах используются для выделения синусоидальной составляющей уравнения Фурье, требующих, во-первых, наблюдения не менее половины периода, во-вторых, необходимо выполнить многочисленные вычисления, требующие большого интервала времени. Предложенный выше алгоритм ограничивается тремя измерениями, двумя операциями типа сложения и одного умножения. Поэтому для выделения периодической составляющей из измеряемого параметра можно снимать сигналы с большей частотой. Тем не менее, ограничимся частотой сканирования в 2000 Гц. При этой частоте вторичные токи содержат примерно такую же погрешность, что и при частоте сканирования, равной 1600 Гц.

Производную тока можно определить как:

$$i'(t) = \sin(\omega \cdot t + n \cdot \omega \cdot \Delta t) \cdot k \quad (2)$$

где  $n$  – число интервалов дискретизации, соответствующему четверти периода;  $k$  – отношение вычисленного текущего значения параметра к синусу угла, соответствующего Время работы РЗ при использования уравнений (2) увеличивается на 5 мс. при частоте 50 Гц.

Уменьшить время наблюдения для определения производной параметра до двух интервалов дискретизации можно двумя способами:

- создать таблицу синусов за период с интервалом с достаточной точностью, определения текущего значения параметра (0,5 – 1 градус) и определить  $\sin(\omega \cdot t + n \cdot \omega \cdot \Delta t)$ ;
- определить косинус угла, соответствующего интервалу  $\omega t$ .

Рассмотрим как определить максимальное значение тока генератора при трехфазном КЗ на его выводах. Угол между ЭДС генератора и током короткого замыкания можно определить через сопротивление генератора. Потеря мощности генератора равна:

$$\Delta P = P_H \cdot \frac{100 - \mu(\%)}{100}. \quad (3)$$

Тогда

$$R_F = \frac{\Delta P}{I_H^2 \cdot 3}, \quad X_F = X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_F}, \quad \varphi = \arg(R_F + jX_F).$$

Введем ток, по амплитуде равный единице:  $i_1(t) = \sin(\omega \cdot t - \varphi)$ .

Этот ток отстает от ЭДС генератора на угол  $\varphi$  равный углу между током КЗ и напряжением предшествующего режима. В этом случае текущее значение тока и его производная будут равны:

$$i_1(t) = \sin(\arcsin(\sin(\omega \cdot t_i) + t \cdot \omega)) \cdot \frac{i(t)}{il(t)} \quad (4)$$

$$i_1(t) = \sin(\arcsin(\sin(\omega \cdot t_i) + t \cdot \omega + \frac{\pi}{2})) \cdot \frac{i(t)}{il(t)} \quad (4a)$$

где  $t_i$  – время фиксации достоверного  $i$ -го измерения тока.

Угол фиксации достоверного  $i$ -го измерения тока определяется на оси времени от смены знака кривой тока, после которого фиксируются

измерения до использования  $i$ -го измерения в уравнении (4). Используя уравнения (4) и (4а) можно определить текущие значения токов и их производные в любой момент времени, в том числе и в моменты времени, когда насыщены трансформаторы тока. Производную тока, вычисленную согласно (4а) можно определять таблично, заложив таблицу синусов в память вычислительной машины. Это позволит уменьшить время обработки результатов измерений. Уравнения (4) и (4а) позволяют определить параметры вторичных токов в «будущем» времени. Это актуально для выработки решений действий автоматики.

Положив  $t$ , равным четверти периода, получим максимальные значения текущего значения и его производной, что достаточно для определения уставки максимальной защиты.

На рис. 3 приведена зависимость погрешности в определении текущего значения тока в зависимости от постоянной времени защищаемого объекта. Наибольшая погрешность в районе 5% соответствует постоянной времени сети, равной 0,005 – 0,006.



Рис. 3. Зависимость погрешности в вычислении текущего значения тока от постоянной времени сети (интервал дискретизации – 0,625 мс.)

Этот ток отстает от ЭДС генератора на угол  $\phi$  равный углу между током КЗ и напряжением предшествующего режима. Тогда текущее значение тока и его производная будут равны:

$$i_1(t) = \sin(\arcsin(\sin(\omega \cdot t_i) + t \cdot \omega)) \cdot \frac{i(t)}{i_1(t)} \quad (5)$$

$$i_i(t) = \sin(\arcsin(\sin(\omega \cdot t_i) + t \cdot \omega + \frac{\pi}{2})) \cdot \frac{i(t)}{i_i(t)} \quad (5a)$$

где  $t_i$  – время фиксации достоверного  $i$ -го измерения тока.

Угол фиксации достоверного  $i$ -го измерения тока определяется на оси времени от смены знака кривой тока, после которого фиксируются измерения до использования  $i$ -го измерения в уравнении (5). Используя уравнения (5) и (5a) можно определить текущие значения токов и их производные в любой момент времени, в том числе и в моменты времени, когда насыщаются трансформаторы тока. Производную тока, вычисленную согласно (5a) можно определять таблично, заложив таблицу синусов в память вычислительной машины. Это позволит уменьшить время обработки результатов измерений. Уравнения (5) и (5a) позволяют определить параметры вторичных токов в «будущем» времени. Это актуально для выработки решений действий автоматики.

Положив  $t$ , равным четверти периода, получим максимальные значения текущего значения и его производной, что достаточно для определения уставки максимальной защиты.

Дифференциальную защиту генератора, на наш взгляд, целесообразно выполнять измеряя действующую величину суммы токов начала и конца обмоток генератора. Причем, у мощных генераторов, где постоянные времени обмоток более 0,02 с., можно выполнять измерения, начиная с момента возникновения КЗ, а у генераторов с постоянными временем обмоток менее 0,02 с. – через половину периода.

Комплексное значение дифференциального тока в любой момент времени равно:

$$I(t) = \sum_{n=1}^j i_n(t) + j \cdot \sum_{n=1}^j \dot{i}_n(t) \quad (6)$$

где  $n$  – соответствует началу и концу обмотки. Текущие значения токов согласно и определяются согласно (5).

## Выводы

- При насыщении магнитопроводов трансформаторов тока вторичные токи «не повторяют» первичные. Причиной насыщения магнитопроводов, как правило, является появление апериодических составляющих в токе короткого замыкания. Время существования апериодической составляющей в токе короткого замыкания зависит от постоян-

ной времени участка электрической сети от места короткого замыкания до генераторов. Чем больше постоянная времени, тем дольше сохраняется несоответствие между первичными и вторичными токами трансформаторов тока

2. Сама по себе апериодическая составляющая искажает вторичную периодическую, что может привести к отказам релейной защиты, выражаяющихся либо к ложной работе (при коротком замыкании не на защищаемом объекте), либо к не реагированию защиты при коротком замыкании на защищаемом объекте.

3. В работе предложен алгоритм вычисления текущих значений вторичных токов, резко снижающих величину апериодических составляющих до долей процентов. Тем самым к релейной защите подводятся практически только периодические составляющие.

4. Алгоритм предлагается применять с момента возникновения короткого замыкания для защиты объектов электрической сети с постоянными временем более 0,01 – 0,02 с. и с задержкой на половину периода при меньших постоянных времени.

5. Предложен алгоритм определения текущих значений токов и их производных в «будущие» моменты времени, когда происходит насыщение магнитопроводов трансформаторов тока, а также требуется включать автоматику управления режимами.

### **Библиографический список**

1. Грешнов Е.Б., Королюк Ю.Ф. О выборе интервала дискретизации вводимых в ЭВМ аналоговых параметров для программируемых защит // Электронное моделирование. 1982. № 5.С. 71–74.
2. Шнеерсон Э.В. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с..
3. Техническое руководство по применению реле SEPAM-1000. Фирма Snaejder Electric. 2002.
4. Техническое руководство по применению реле ALSTOM. 2002.

# ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ «МАЛЫХ» ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ОТ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

д-р техн. наук, проф. **Бурянина Н.С.**

ассистент **Рожина М.А.**

*Северо-Восточный федеральный  
университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск*

**Аннотация.** Проблемы энергетики республики Саха (Якутии) обусловлены ее территорией и не заселенностью. Якутия разделается на 4 энергорайона – это Центральный энергорайона, Западный энергорайон, Южно-Якутский энергорайон и Северный энергорайон. В этих четырех энергорайонах проживает более 900 тысяч человек. Северный энергорайон, который занимает 2/3 территории всей республики (2,2 млн. км<sup>2</sup>). Общая установленная мощность – 184,9 МВт (электроэнергия) и 92,4 Гкал/ч (теплоэнергия). Основными источниками являются дизельные электростанции. Из-за большого количества ДЭС (120) остро стоит проблема завоза топлива, и соответственно высока себестоимость электроэнергии.

Сложная инфраструктура и транспортная схема завоза топлива; большая протяженность и загруженность линий электропередач, резко-континентальный климат с перепадами температур от –50 до +45°C, все эти факторы негативно сказываются на качестве электроэнергии. Высока вероятность аварий из-за ненадежности работы электрических сетей.

Энергорайоны к настоящему времени не связаны между собой электрическими сетями. Сейчас ведется строительство крупных межсистемных ЛЭП: ВЛ-220 кВ «Чернышевский–Мирный–Ленск–Пеледуй» и ВЛ-220 кВ «Нижний Куранах–Томмот–Мая», которые позволят соединить энергорайоны в единую энергосистему. В перспективе следует учитывать также и связь Якутских электрических сетей с Магаданскими.

В связи с выше изложенным можно сказать, что из-за слабой заселенностью территории Республики. Линии электропередачи 110–220 кВ прокладываются вдоль дорог, на которых имеются населенные пункты из нескольких домов, геологические партии, сельскохозяйственные угодья и лесоперерабатывающие станции. Строить подстанции с трансформаторами с учетом их эксплуатации экономически не целесообразно. Поэтому такие населенные пункты снабжаются электроэнергией от малых дизельных генераторов. Квалифицированного обслуживания, как правило, нет. поэтому часты отключения. Альтернативным решением проблемы электроснабжения без строительства мощ-

ных трансформаторных подстанций и использования дизельных генераторов является емкостной отбор мощности от линии электропередачи.

Классическая схема емкостного отбора изображена на рис. 1. Расчетная схема замещения емкостного отбора приведена на рис. 2.

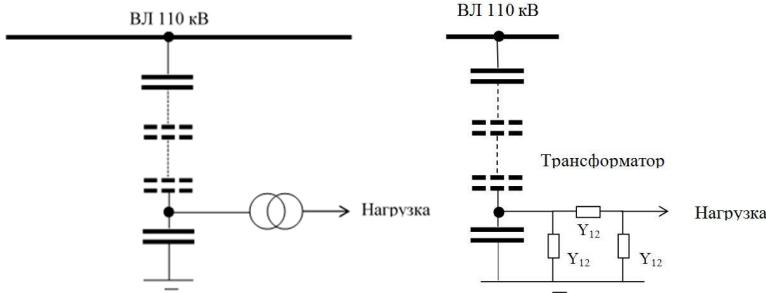


Рис. 1. Классическая схема емкостного отбора мощности

Рис.2. Расчетная схема емкостного отбора мощности от последнего трансформатора

Проводимости П-образной схемы замещения трансформатора:

$$Y_1 = \frac{1 - k_t}{Z_t} + Y_{xx}; \quad Y_2 = \frac{k_t^2 - 1}{Z_t}; \quad Y_{12} = \frac{k_t}{Z_t},$$

где  $k_t$  – коэффициент трансформации трансформатора как отношение высокого напряжения к низкому напряжению;  $Z_t$  – сопротивление трансформатора, приведенное к высокому напряжению;  $Y_{xx}$  – проводимость, обусловленная током холостого хода (обозначения общепринятые):

$$Y_{xx} = \frac{\Delta P_{xx}}{U_B^2} - j \sqrt{\left(\frac{I_{xx}\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{ном}}}{U_B^2}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{xx}}{U_B^2}\right)^2}.$$

Номинальное низшее напряжение  $U_H$  на проводимости  $Y_2$  составляет 0,38 кВ. На рис. 3а приведены две зависимости напряжения от величины нагрузки  $S$  (в относительных единицах) с коэффициентом мощности, равным 0,8. Кривая 1 (рис. 3а) отображает зависимость напряжения на нагрузке при линейном изменении мощности дополнительных конденсаторов для поддержания уровней напряжения в заданных пределах (от 0,95 до 1,05  $U_{\text{ном}}$ ). Требуемая мощность в 1,3 раза больше реактивной мощности нагрузки (зависимость 1 на

рис. 3б). Для линейного изменения мощности дополнительных конденсаторов характерно повышение напряжения в диапазоне минимальных нагрузок, и чем больше мощность конденсаторов относительно реактивной мощности нагрузки, тем выше уровень напряжения. В рассмотренном примере напряжение при малых нагрузках достигает  $1,07 U_H$ , а напряжение при полной нагрузке снижается до  $0,95 U_H$ . При большей мощности конденсаторов увеличиваются оба напряжения, и, если при полной нагрузке напряжение будет равным номинальному, при малых нагрузках оно превысит  $1,1 U_H$ . Поэтому такой способ регулирования напряжения следует признать нецелесообразным.

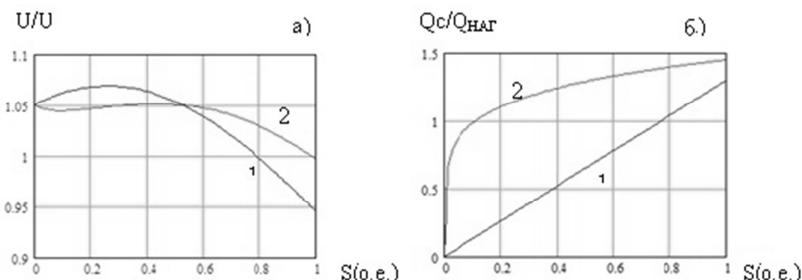


Рис. 3. Зависимость напряжения на нагрузке: а) от мощности конденсаторов, включаемых для поддержания уровней напряжения; б) соответствующие мощности конденсаторов

Поэтому следует обратить внимание на регулирование напряжение нелинейным изменением мощности конденсаторов в зависимости от изменения нагрузки. На рис. 3а приведена зависимость напряжения на нагрузке (кривая 2) от нелинейно изменяемой мощности конденсаторов (рис. 3б, кривая 2). От режима холостого хода до максимальной нагрузки напряжение изменяется от  $1,05 U_H$  до номинального. Приведенная зависимость напряжения позволяет сделать вывод, что достаточно контролировать уровень напряжения и поддерживать его в заданных пределах изменением мощности конденсаторов не придерживаясь какого-либо конкретного закона регулирования.

Серьезная проблема, которая требует решения, является отключение емкостного отбора от линии. Устанавливать выключатель дорого. Поэтому рассмотрим отключение отбора разъединителем. На напряжении 110 кВ при расстоянии между полюсами 3,5 м согласно Правил устройств электроустановок можно отключать зарядные токи линии 5 А. Зарядные токи линии, как и токи емкостного отбора, емкостные,

поэтому вышеуказанное правило распространяется и на отключение тока отбора в холостом режиме. Гарантировано можно отключать ток холостого хода при мощности трехфазного отбора 150 кВА. При этом ток отключения составит 3 А. Предварительно необходимо отключить нагрузку, что можно выполнить выключателем нагрузки.

Разработана схема емкостного отбора мощности от линии электропередачи, содержащая подключенные поперечно к каждой фазе линии, последовательно включенные конденсаторы и трансформатор, отличающийся тем, что между последним конденсатором от точки подключения к фазе линии и землей включен одной обмоткой трансформатор, ко второй обмотке которого включена дополнительная емкость, состоящая из конденсаторов, и нагрузка.

Данное устройство позволит осуществлять электроснабжение удаленных объектов без строительства мощных трансформаторных подстанций. А значит, спрос электроэнергии с каждым годом будет, увеличивается.

### **Библиографический список**

1. **Баркан Я.Д.** Автоматизация режимов по напряжению и реактивной мощности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
2. **Булашевич Д.Н., Юренков В.Д.** Емкостной отбор мощности от линии электропередачи. М. Госэнергоиздат, 1959. 136 с.
3. Промежуточный отбор мощности из полуволновой электропередачи / А.В. Кобылин, Г.И. Самородов, В.П. Кобылин и др. // Электричество. 2015. № 6. С. 4-11.
4. **Edris A.** FACTS Technology Development: An Update // IEEE power engineering review. 2000. № 3. Р. 4-15.
5. Формирование электрических сетей Республики Саха (Якутия) с учетом развития электроэнергетических центров Востока России / Н.И. Воропай, Г.И. Самородов, В.П. Кобылин и др. // Энергетическая политика. 2011. № 5. С. 49-59.
6. Пат. 2559805 Рос. Федерация, МПК H 02J 3/06. Устройство отбора мощности из магистральной линии электропередачи / А.В. Кобылин, В.П. Кобылин, М.П. Лебедев и др; заявитель и патентообладатель Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН (RU). №2014114749/07; заявл. 14.04.14; опубл. 10.08.15, Бюл. № 22. 5 с.
7. Пат. 2559024 Рос. Федерация, МПК H02J 3/04. Устройство отбора мощности из линии электропередачи / Ю.Ф. Королюк, Н.С. Бурянина и др; заявитель и патентообладатель Ин-т физ-тех проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (RU). №2014117828/07; заявл. 29.04.14; опубл. 10.08.15, Бюл. № 22. 5 с.
8. Пат. 2594890 Рос. Федерация, МПК H02J 3/04. Устройство емкостного отбора мощности от линии электропередачи / Ю.Ф. Королюк, Н.С. Бурянина, М.А. Рожина и др; заявитель и патентообладатель: Ю.Ф. Королюк, Н.С. Бурянина, Е.В. Лесных. № 2015110388/07; заявл. 23.03.15; опубл. 20.08.16, Бюл. № 23. 2 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО ИНВЕРТОРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОМПЛЕКСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ФИЛЬТРОВ

канд. техн. наук, доц. **Воскресенская С.Н.**

д-р техн. наук, проф. **Бекиров Э.А.**

студент **Насибов Г.Ф.**

*Крымский федеральный университет  
им. В.И. Вернадского, г. Симферополь*

**Аннотация.** В работе приводится исследование выходного сигнала однофазного мостового инвертора. Анализ осуществлялся как с помощью моделирования в специализированной программе *Tina-Ti*, так и при натурных испытаниях. При этом производилось изменение комплексных сопротивлений фильтров. Также изменялась и нагрузка путем увеличения емкости подключаемых конденсаторов.

**Введение.** На настоящий момент инверторы широко применяются при преобразовании энергии постоянного тока, вырабатываемой солнечными батареями на соответствующих электростанциях, в переменный ток. В этом случае могут использоваться как инверторы тока, так и напряжения. Оба эти вида имеют свои преимущества и недостатки. Например, для инверторов тока на не полностью управляемых вентилях необходимым условием работы является емкостной характер нагрузки, при котором ток опережает напряжение [1]. Для инверторов напряжения при резистивной нагрузке выходное напряжение будет иметь форму, близкую к синусоидальной. Однофазные инверторы напряжения бывают с чистым синусом на выходе и с модифицированной синусоидой, допускаемой для большинства современных приборов. К преимуществам инверторов напряжения относится то, что они не теряют работоспособность в режиме холостого хода в отличие от инверторов тока. Тем не менее, второй вид устройств было бы эффективнее использовать на солнечных электростанциях, хотя первый более распространен. Большинство авторов рассматривают возможности улучшения выходных характеристик именно инверторов напряжения [2]. Также предлагается добавление, например, индуктивно-емкостных преобразователей для регулирования выходного сигнала [3]. Таким образом, добавления или изменения, вносимые в схемы, по-разному будут влиять на результат преобразования.

**Целью** работы является анализ выходного сигнала однофазного мостового инвертора напряжения при изменении комплексного сопротивления фильтра и нагрузки. Одной из поставленных задач является моделирование режима работы инвертора при различных значениях напряжения, генерируемого солнечной батареей в условиях реальных климатических условий, с помощью программы Tina-Ti.

**Содержательная часть.** На рис. 1 представлена исследуемая схема. Она построена на базе n-канального полевого транзистора IRFZ44 и биполярного n-p-n транзистора TIP41C. На входе инвертора расположены два RC-фильтра (блок 1) для каждого биполярного транзистора T1 и T2 (блоки 2), которые являются управляющими элементами. Полевые транзисторы T3-T6 (блоки 3) работают как управляемые ключи. Напряжение возрастает за счет повышающего трансформатора (блок 4).

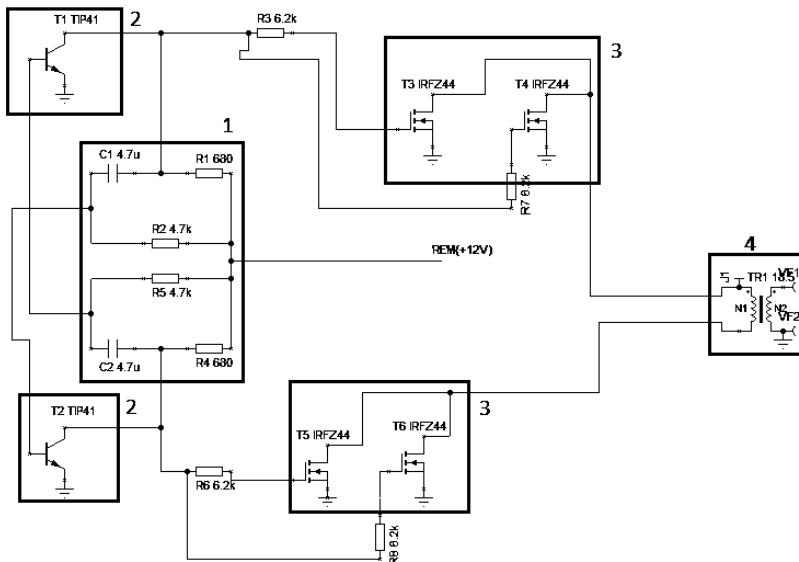


Рис. 1. Схема однофазного мостового инвертора

Недостатком схемы является отсутствие защиты, из-за чего полевые транзисторы могут перегреваться и выйти из строя. Данная проблема может быть решена путем правильного выбора источника пита-

ния. Например, если источником будет солнечная батарея, то она не сможет генерировать мощность, превышающую номинальное значение.

При реализации схемы резисторы R2 и R5 были заменены на регулируемые, обеспечивающие сопротивления до 10 кОм (рис. 2), вследствие чего комплексное сопротивление фильтров также увеличивается.

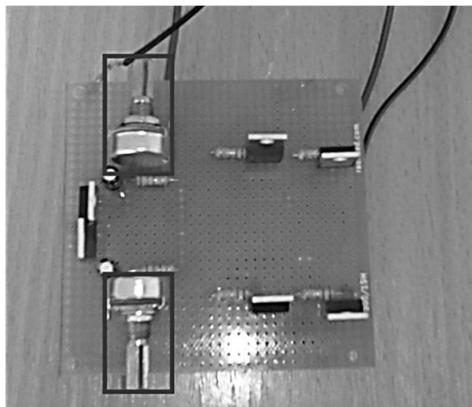


Рис. 2. Инвертор с регулируемыми сопротивлениями фильтра

Инвертор был подключен к блоку питания, обеспечивающему одну и ту же величину напряжения. От него сигнал поступал на силовой трансформатор DV-130-1 15/250 и далее на нагрузку (лампа накаливания 40 Вт), осциллограф для наблюдения за кривой выходного сигнала и металлопленочные конденсаторные батареи разной емкости, рассчитанные на напряжение до 250 В.

Пропорциональность выходного напряжения обеспечивается за счет задания относительной длительности управляющих импульсов, вследствие чего будет наблюдаться попеременное срабатывание групп ключей. В то же время форма выходного сигнала и его амплитуда будут зависеть от характера нагрузки. Поэтому для изолированных энергосистем, таких как системы солнечного электроснабжения индивидуальных потребителей, важно предусмотреть возможные изменения, так как циркуляция реактивной мощности будет нерегулируемой. Из табл. 1 видно, что при отсутствии емкостной нагрузки выходное

напряжение будет иметь максимальное значение. В то же время оценку нужно производить в комплексе с анализом формы выходного сигнала (рис. 3). На рис. 3, а, он показан для первого варианта из таблицы 1, а на рис. 3, б, - для третьего. С увеличением емкости форма сигнала постепенно выравнивается, что выражается в уменьшении импульсов спада. Так при отсутствии емкости его длина составляла порядка 9 мм, а при значении 0,7 мкФ – 3 мм.

Таблица 1

Результаты измерений при изменении емкости нагрузки

№ п/п	C, мкФ	U <sub>ВХ</sub> , В	U <sub>Вых</sub> , В
1	0	9,8	274
2	0,4	9,8	250
3	0,5	9,8	235
4	0,7	9,5	235

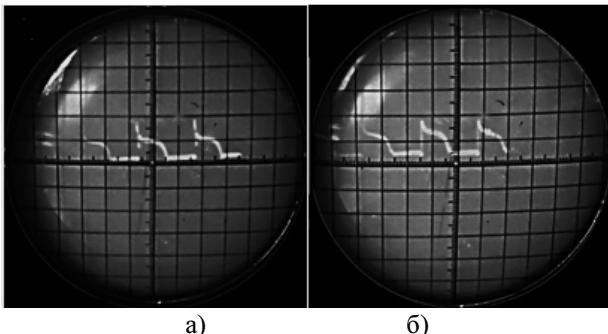


Рис. 3. Осцилограммы выходного напряжения

В инверторах напряжения с модифицированными синусоидальными сигналами входной фильтр способствует формированию выходного сигнала, приближенного по форме к синусоиде. Изменение его комплексного сопротивления приводит к искажениям, которые в некотором интервале могут быть приемлемы для дальнейшего преобразования. Результаты при уменьшении сопротивлений R2 и R5 до 2 кОм приведены в табл. 2 и на рис. 4, а и б. Рис. 4, а, и 4, б, соответственно характеризуют случаи с отсутствием емкостной нагрузкой и с величиной 0,7 мкФ.

Таблица 2

Результаты измерений при изменении комплексных сопротивлений фильтра

№ п/п	C, мкФ	Ubх, В	Увых, В
1	0	9,75	180
2	0,4	9,65	179
3	0,5	9,60	178
4	0,7	9,55	177

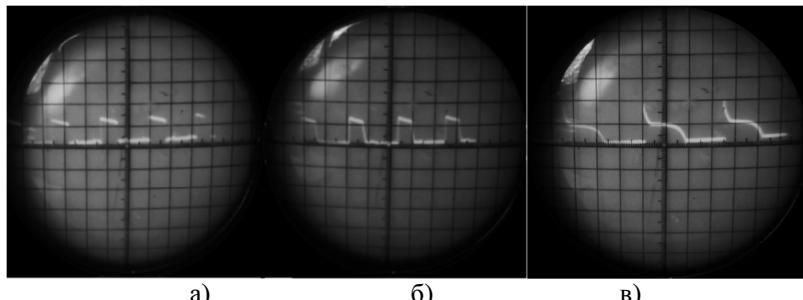


Рис. 4. Осциллографмы выходного напряжения при изменении комплексных сопротивлений фильтра

Выходной сигнал инвертора приобрел форму, близкую к прямоугольной, а само значение уменьшилось. В этом случае увеличение емкости конденсаторных батарей практически не влияет на изменение формы кривой.

Для сравнения рассмотрим также случай увеличения сопротивлений регулируемых резисторов R2 и R5 до 6 кОм. При отсутствии конденсаторных батарей входное напряжение инвертора составило 9,8 В, а выходное – 258 В. Сигнал, полученный с помощью осциллографа, показан на рисунке 4, в.

Для сравнения можно сопоставить вышеприведенные результаты с полученными путем моделирования в программе Tina-Ti, где использовалась специальная функция для получения осциллографмы (рис. 5).

Моделирование осуществлялось для случаев, отображающих изменение напряжения группы солнечных батарей, соединенных параллельно (номинальное напряжение по 12 В, мощность – по 100 Вт), под воздействием климатических условий.

Из рис. 5, а, видно, что форма сигнала аналогична полученной на практике. При подаче номинального напряжения на вход инвертора на выходе можно получить значение, приближенное к 220 В. При уменьшении напряжения вследствие изменения климатических условий в сторону меньших плотностей падающего солнечного излучения размер импульса спада, аналогичного приведенному на рис. 3, увеличивается (рис. 5, б).

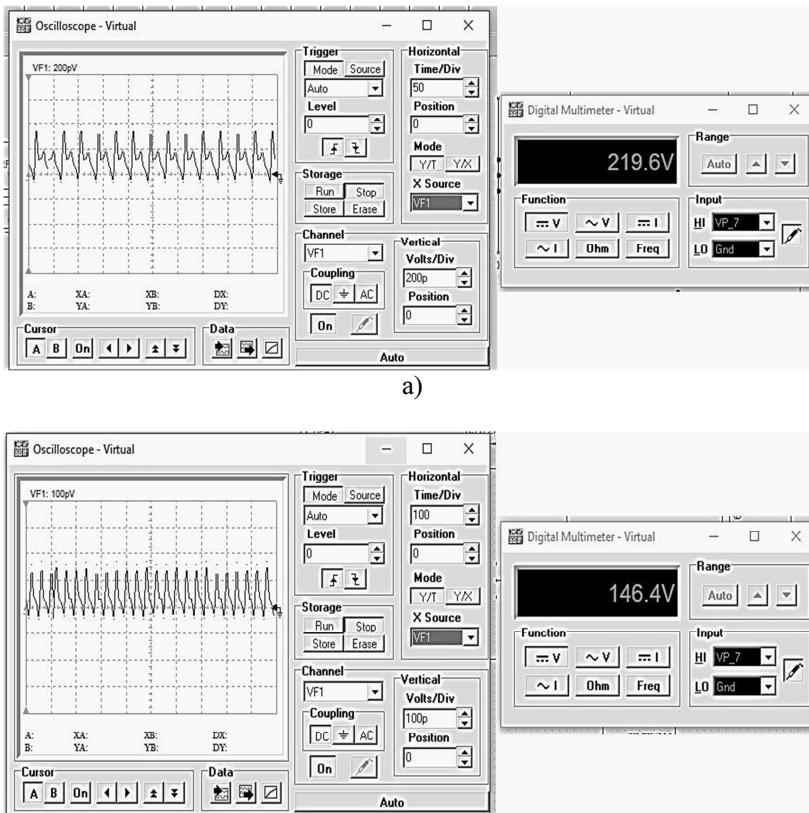


Рис. 5. Осциллограмма выходного напряжения при напряжении на входе:  
а) 12 В; б) 8 В

Для электроснабжения потребителей различного типа потребуется большая или меньшая мощность по сравнению с указанной при моделировании. Соответственно, схемы инверторов для каждого отдельно взятого случая будут отличаться [4]. При этом принципы формирования сигнала для инверторов одного типа отличаться не будут.

Расчет автономных систем электроснабжения с помощью солнечных батарей может осуществляться по методике, приведенной в источнике [5].

**Выводы.** Изменение комплексного сопротивления фильтров на входе инвертора способствует изменению формы и амплитуды выходного сигнала. При изготовлении инверторов с возможностью такого регулирования в зависимости от входного напряжения можно добиться, чтобы форма сигнала стала более приближенной к синусоидальной. При электроснабжении индивидуальных потребителей в качестве генерирующих устройств могут использоваться солнечные батареи. В этом случае форма выходного сигнала зависит от типа нагрузки. Если нагрузка носит резистивный характер, то кривая выходного напряжения может быть сильно искажена. Для стабилизации сигнала может использоваться конденсаторная батарея. Еще одним методом улучшения качества сигнала и уменьшения амплитуд нечетных гармоник является использование LC-фильтра низких частот, так как одного сглаживающего фильтра бывает недостаточно.

### **Библиографический список**

1. Толстов Ю.Г. Автономные инверторы тока. Москва: Энергия, 1978. 208 с.
2. Григораш О.В., Усков А.Е., Семенов Я.А. Инверторы солнечных электростанций с улучшенными техническими характеристиками // Научный журнал КубГАУ. 2014. №99 (05). С. 372 –382.
3. Регулирование выходного напряжения в инверторе в однофазной системе инвертор–индуктивно–емкостный преобразователь / В.Н. Губаревич, С.В. Подольный, В.М. Спирини др. // Праці Інституту Електродинаміки Національної Академії Наук України. 2010. №25. С. 114 –118.
4. Бекиров Э.А. Электроника и электронные приборы. Преобразовательные устройства в возобновляемых источниках энергии: учебник. Симферополь: ИТ "АРИАЛ", 2014. 472 с.
5. Бекиров Э.А. Автономные источники электропитания на базе солнечных батарей. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2011. 484 с.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

магистрант, начальник бюро АС **Гриценко С. В.**  
Технический университет УГМК г. Верхняя Пышма  
АО «Сибкабель», г. Томск

**Аннотация.** Расчет мощности и ступеней регулирования автоматической конденсаторной установки используя данные существующей автоматизированной информационно измерительной системы технического учета электроэнергии на предприятии. Этапы расчета автоматической конденсаторной установки. Моменты, на которые необходимо обратить внимание при проведении расчетов.

На многих производственных предприятиях в настоящее время устанавливаются автоматизированные информационно измерительные системы технического учета электроэнергии (АИС ТУЭ), необходимые для контроля расхода электроэнергии при производстве продукции, анализа потерь электроэнергии в сетях электроснабжения предприятий, на собственные нужды подстанций и для составления баланса. Использование АИС ТУЭ позволяет проводить энергетические обследования и разработку мероприятий для снижения потерь электроэнергии. Одной из таких задач по снижению потерь является компенсация реактивной мощности. АИС ТУЭ позволяет наглядно в табличном и графическом представлении (рис. 1) увидеть и проанализировать детальное потребление реактивной энергии по группам элементов электрической сети, выявить элементы с повышенным потреблением реактивной энергии, определить узлы для монтажа конденсаторных установок и рассчитать их оптимальные характеристики.

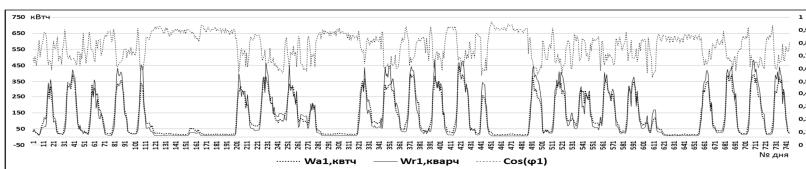


Рис. 1. График потребления активной, реактивной энергии и коэффициент мощности  $\cos(\phi_1)$

Если к узлу системы электроснабжения подключено большое количество электроприемников и потребление реактивной энергии не постоянно, то необходимо использовать групповую компенсацию реактивной мощности с подключением автоматической конденсаторной установки (АКУ) со ступенчатым регулированием для поддержания оптимального коэффициента мощности независимо от текущего потребления. Такая конденсаторная установка будет компенсировать реактивную энергию в соответствии с потребностью в режиме реального времени.

АИИС ТУЭ значительно облегчает задачи по выполнению расчетов. При наличии большого количества потребителей, с помощью АИИС ТУЭ можно проанализировать данные за разные периоды времени и выявить факторы, влияющие на потребление реактивной энергии в разных узлах системы электроснабжения, что поможет наиболее эффективно рассчитать параметры требуемого компенсационного оборудования.

Для проведения расчетов мощности, количества и шага ступеней автоматической конденсаторной установки можно воспользоваться накопленными статистическими данными из имеющейся АИИС ТУЭ. Обработку полученных статистических данных можно проводить в самой автоматизированной системе или воспользоваться программой MS Excel. Для увеличения точности последующих расчетов желательно охватить достаточно большой промежуток времени, в который будут входить факторы, влияющие на потребление, такие как сезонность, разнообразие и последовательность технологических процессов, влияние выходных, рабочих или праздничных дней и другие. Наиболее оптимальным периодом для анализа является один год, так как в большинстве случаев в него входят все выше перечисленные факторы.

В литературе и интернете представлено множество вариантов расчета параметров конденсаторных установок. Большинство из них сводится к трем этапам: 1) расчет реактивной мощности энергоприемников; 2) расчет емкости требуемой конденсаторной установки; 3) Расчет ступеней регулирования конденсаторной установки для оптимальной компенсации реактивной энергии.

Для проведения этих расчетов необходимо из существующей АИИС ТУЭ выгрузить в файл формата MS Excel данные потребления активной и реактивной энергии по часовым интервалам за выбранный период времени, например, за один год. На основе этих данных можно проводить все расчеты параметров конденсаторной установки. В итоге мы получим таблицу с данными, как показано на примере табл. 1. Для упрощения данные выводятся в часовых интервалах.

Таблица 1

## Вывод данных из АИИС ТУЭ

Дата/время	$Wa$ , кВт·ч	$Wr$ , квар·ч	$\cos(\varphi_1)$
01.03.2016 0:00	35,418	37,558	0,683
01.03.2016 1:00	41,28	48,376	0,646
01.03.2016 2:00	31,686	34,73	0,697
01.03.2016 3:00	21,202	27,41	0,625
01.03.2016 4:00	21,344	23,654	0,684

Столбец  $Wa$  содержит данные потребления активной энергии в кВт·ч,  $Wr$  потребления реактивной энергии в этот же часовой интервал времени в квар,  $\cos(\varphi_1)$  данные текущего коэффициента мощности, которые можно взять из системы или посчитать по формуле для каждого часового интервала и вставить в таблицу отдельным столбцом:

Всего таблица будет содержать около 8760 строк. Из полученной таблицы необходимо удалить строки с нулевыми значениями  $Wa$ , и  $Wr$ , так как в эти периоды оборудование не работало и потребления электроэнергии не было, соответственно проведение расчетов для этих временных интервалов не требуется.

Расчет реактивной мощности электроприемников проводить не нужно, так как мы получаем эти данные из АИИС ТУЭ в столбце  $Wr$  (табл. 1).

Для расчета емкости требуемой конденсаторной установки необходимо знать минимальные и максимальные значения потребления реактивной энергии в заданном узле. Эти данные можно получить из столбцов  $Wa$ ,  $Wr$ , как показано в примере табл. 2.

Таблица 2

## Максимальные и минимальные значения потребления электроэнергии

Параметр	Дата, время	$Wa$ , кВт·ч	$Wr$ , квар·ч	$\cos(\varphi_1)$
Макс $Wa$	15.12.2016 10:00	560,134	494,822	0,749
Макс $Wr$	17.01.2017 09:00	476,948	564,948	0,645
Мин $Wa$	13.06.2016 05:00	4,768	4,348	0,739
Мин $Wr$	09.07.2016 11:00	6,828	2,568	0,936

Из столбца  $Wr$  (табл. 2) выбираем максимальное и минимальное значение потребления реактивной энергии для которого будем проводить расчеты конденсаторной установки. При этом необходимо соблюдать условие  $\cos(\varphi_1) < \cos(\varphi_2)$ , где  $\cos(\varphi_2)$  целевое значение ко-

эффициента мощности, которого необходимо достичь при компенсации реактивной мощности, иначе компенсация не требуется.

Допустим, чтобы избежать перекомпенсации, необходимо с помощью АКУ достичь значения  $\cos(\varphi_2) = 0,98$ . Этому значению коэффициента мощности соответствует значение  $\operatorname{tg}(\varphi_2) = 0,203$ .

Расчет мощности АКУ можно провести с помощью формулы:

$$Q_{\text{АКУ}} = Q_{\text{макс}} - P \cdot \operatorname{tg}(\varphi_2)$$

где  $Q_{\text{АКУ}}$  – мощность требуемой конденсаторной установки, квр;  $Q_{\text{макс}}$  – максимальная реактивная мощность, квр;  $P$  – значение активной мощности в этот же момент времени, кВт.

Подставив в эту формулу выбранные значения из табл. 2 – максимальное значение 564,948 квр·ч, 476,948 кВт·ч и  $\operatorname{tg}(\varphi_2) = 0,203$ , получим итоговую мощность АКУ  $Q_{\text{АКУ}} = 468,128$  квр.

Для расчета мощности ступеней АКУ разделим диапазон потребления реактивной энергии, полученный из АИИС ТУЭ в столбце  $Wr$  табл. 2 в соответствии с мощностями выпускаемых конденсаторных батарей, например, по 5 и 25 квр в диапазоне до 100 квр и далее с шагом по 50 квр и определим количество часов потребления  $Wr$  в этих диапазонах (табл. 3).

Таблица 3  
Распределение потребления реактивной энергии по диапазонам

Диапазоны $Wr$ , квр	Время работы, ч	% времени работы от всего периода	Диапазоны $Wr$ , квр	Время работы, ч	% времени работы от всего периода
0-5	86	1,0	150-200	797	9,1
5-10	517	5,9	200-250	469	5,4
10-15	488	5,6	250-300	484	5,5
15-20	345	3,9	300-350	562	6,4
20-25	392	4,5	350-400	539	6,2
25-50	982	11,2	400-450	404	4,6
50-100	1595	18,2	450-500	140	1,6
100-150	904	10,3			

Если имеется предпочтение выбора конденсаторных батарей определенного производителя, необходимо заранее уточнить – конденсаторы какой емкости он выпускает и разбить потребление на диапазоны, соответствующие емкости конденсаторов, выпускаемых конкретным производителем.

На основании таблицы распределения энергии по диапазонам табл. 3 можно построить соответствующую диаграмму рис. 2, на которой видны основные рабочие диапазоны потребления реактивной энергии и сколько процентов времени от выбранного периода оборудования потребляет реактивную энергию в этом диапазоне.

Необходимо подобрать ступени конденсаторных батарей таким образом, чтобы суммарная мощность включенных конденсаторов соответствовала рабочим диапазонам потребления реактивной энергии с максимальным временем работы.

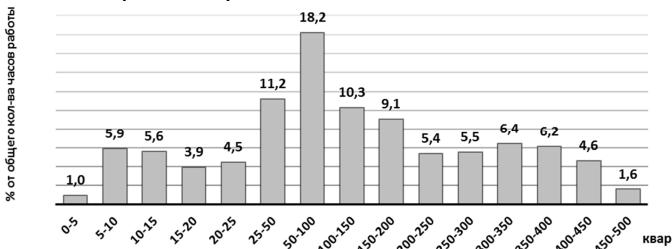


Рис. 2. Диаграмма диапазонов потребления реактивной энергии

Из рис. 2 видно, что около 20% времени идет потребление реактивной энергии в диапазоне от 5 до 25 квр. Основное время потребления реактивной энергии происходит в диапазоне от 25 до 200 квр. Около 30% времени идет потребление в диапазоне от 250 до 500 квр. Для работы АКУ в этих диапазонах потребуются конденсаторы мощностью 5, 10, 25 и 50 квр. В такой комплектации АКУ будет иметь минимальный шаг компенсации 5 квр, максимально охватывать все необходимые диапазоны компенсации от 5 до 500 квр и иметь максимальную стоимость, что значительно увеличивает срок окупаемости. Для уменьшения габаритов и стоимости АКУ можно увеличить шаг компенсации до 10 квр и не принимать во внимание диапазон от 450 до 500 квр из-за незначительного времени работы 1,6%. Это позволит уменьшить количество конденсаторов и коммутационного оборудования.

С помощью АИИС ТУЭ подобные расчеты необходимо провести для каждого узла системы электроснабжения, в которых необходима компенсация реактивной энергии и планируется монтаж автоматических конденсаторных установок.

Так же есть некоторые моменты, на которые следует обратить внимание при проведении расчетов параметров АКУ. Например, при выборе мощности АКУ необходимо закладывать резерв увеличения

мощности энергоприемников, который составляет от 10 до 20% от текущего значения на случай дальнейшего развития производства и введения дополнительных потребителей. Перед выбором оборудования АКУ, с помощью приборов контроля качества, необходимо провести анализ параметров качества электроэнергии в заданном узле системы электроснабжения на наличие скачков тока и напряжения и их гармонических составляющих с частотой записи в память прибора не менее 10 записей в секунду. Из практического опыта можно сказать, что при наличии 3, 5, 7 гармоник на стороне 0,4 кВ, превышающих допустимые максимальные значения, необходимо предусмотреть фильтры гармоник для защиты конденсаторов и уровень напряжения конденсаторов повысить с 420 до 440 и 480 В. Это ведет к удорожанию АКУ, но значительно продлит срок ее эксплуатации.

С помощью АИИС ТУЭ можно так же смоделировать работу АКУ по уже имеющимся данным и провести сравнение полученных показателей для энергетических и экономических расчетов (рис. 3).

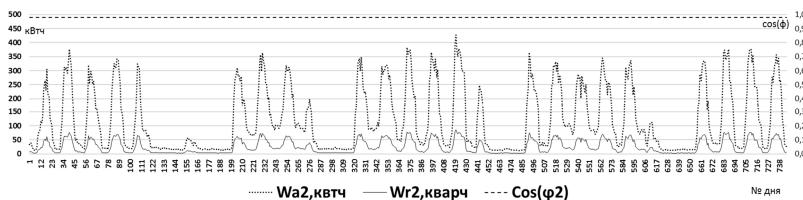


Рис. 3. График смоделированной работы АКУ. Потребление активной, реактивной энергии при коэффициенте мощности  $\cos(\phi_2)=0,98$

АИИС ТУЭ позволяет не только определить узлы системы электроснабжения, в которых необходима компенсация потребления реактивной энергии, но и упростить расчеты и повысить точность определения параметров при выборе АКУ и коммутационного оборудования, что позволит АКУ работать с максимальной производительностью, сократить сроки ее окупаемости и продлить сроки эксплуатации.

### Библиографический список

1. Климова Г.Н., Литвак В.В. Семь проблем и семь ключей энергосбережения: Монография. Томск: Красное знамя, 2013. 148 с.
2. Климова Г.Н., Кабышев А.В. Элементы энергосбережения в электроснабжении промышленных предприятий: Уч. пос. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 185 с.
3. Климова Г.Н., Энергосбережение на промышленных предприятиях: Уч. пос.; 2-е изд. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. 180 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УЧЕТОМ НАГРЕВА И ЖАРКОГО КЛИМАТА

ст. преп. **Дадабаев Ш.Т.**

Политехнический институт Таджикского технического университета  
им. академика М.С. Осими, г. Худжанд

**Аннотация.** Рассмотрены результаты анализа технологических процессов оросительной насосной станции первого подъема, где учтены негативные пусковые воздействия на синхронный электропривод. Проведено компьютерное моделирование пусковых режимов высоковольтных синхронных электродвигателей при прямом и плавном пуске. Обосновано внедрение полупроводниковых устройств плавного пуска для электропривода насосных агрегатов большой мощности. Разработана компьютерная модель для исследования нагрева синхронного электродвигателя при различных способах пуска.

В научной работе объектом исследования принят электропривод высоковольтных насосных агрегатов оросительной насосной станции первого подъема. Возмущающие воздействия на объект были приняты режимы пуска агрегатов, его нагрев и жаркий климат местности. С учетом всех факторов, исследования проводились на оросительной насосной станции АНС-1, расположенной в Аштском районе Согдийской области Республики Таджикистан. В данной станции установлены насосные агрегаты серии 1200B-6,3/100-A с номинальной мощностью электродвигателей 8 МВт [1, 2, 3]. Электроприводом насосных агрегатов в АНС-1 служит явнополюсные синхронные электродвигатели с вертикальным исполнением. Регулирование подачи насосов в АНС-1 выполняются путем включения или отключения агрегатов, т.е. с частыми пусками, что имеет ряд негативных последствий, как:

- увеличение гидравлических ударов;
- износ механических частей оборудования;
- скачки токов и моментов электродвигателя;
- отклонение напряжения;
- нагрев двигателя и потери;
- уменьшение технического ресурса агрегатов.

Поэтому исследование путей устранения или минимизация вышеуказанных негативных факторов действующих при пуске на электропривод насосных агрегатов, является весьма актуальным вопросом,

решение которой дает хорошие перспективы к увеличению технического ресурса насосных агрегатов и электрооборудования в целом [4, 5, 7].

В связи с развитием силовой электроники, стали доступны преобразователи разных типов с разными функциями и широкими возможностями. Устранение негативных факторов при пуске, возможно, добиться с применением устройств плавного пуска (УПП), так как они стоят дешевле, чем преобразователи частоты в два-три раза, и хорошо служат для поочередного плавного пуска нескольких электродвигателей [3, 4]. С этой целью в данной работе выполнен компьютерное моделирование для исследования переходных процессов синхронного двигателя (СД) при прямом и плавном пуске. Моделирование проводилось в программе MATLAB/Simulink. В результате было получено графики переходных процессов скорости и момента высоковольтного СД при прямом и плавном пуске (см. рис. 1 и 2).

Результаты моделирования (рис. 4 и 5) показывают, что использование УПП в качестве устройства для пуска дает достаточно благоприятные условия пусковых режимов.

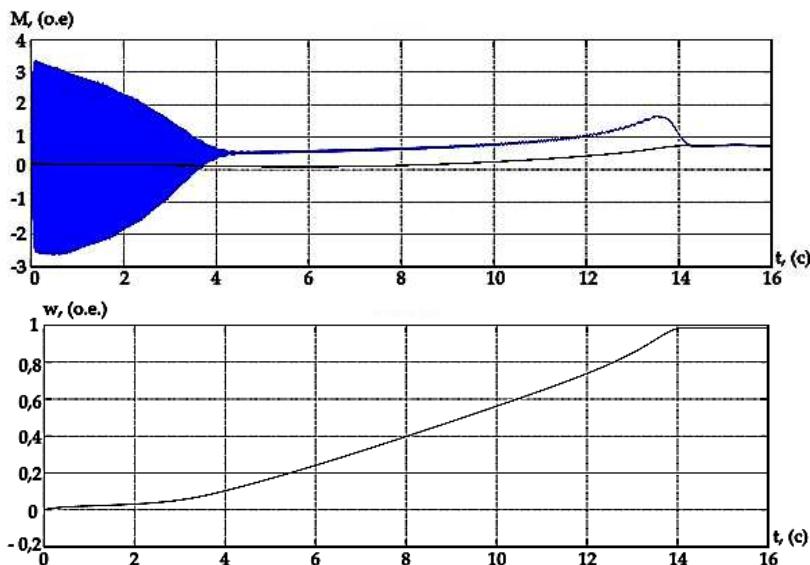


Рис. 1. Графики переходных процессов момента и скорости при прямом пуске СД серии ВДС2-325/69-16

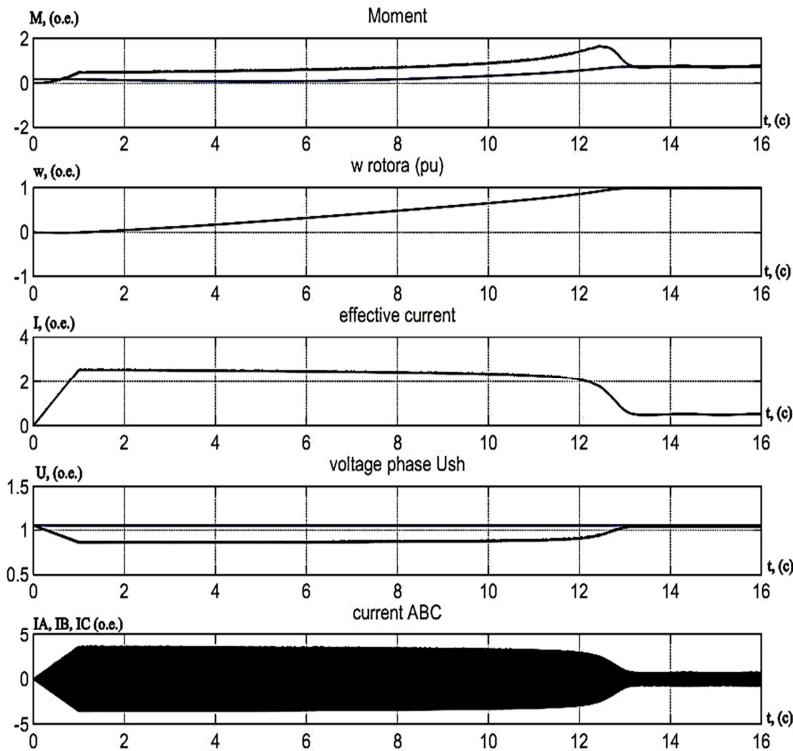


Рис. 2. Графики переходных процессов при плавном пуске СД серии ВДС2-325

При пуске с УПП, пусковой ток и электромагнитный момент СД уменьшилось, кроме этого современные УПП дают следующие преимущества [4]:

- уменьшает динамические нагрузки на подшипниках электродвигателя;
- улучшают условия эксплуатации электрооборудования;
- снижает ток, потери электроэнергии и отклонения напряжения в сети при пуске электродвигателя;
- увеличивает количества допустимых пусков и осуществление пуска электродвигателей от источников ограниченной мощности;
- повышает надежности и срока службы оборудования.

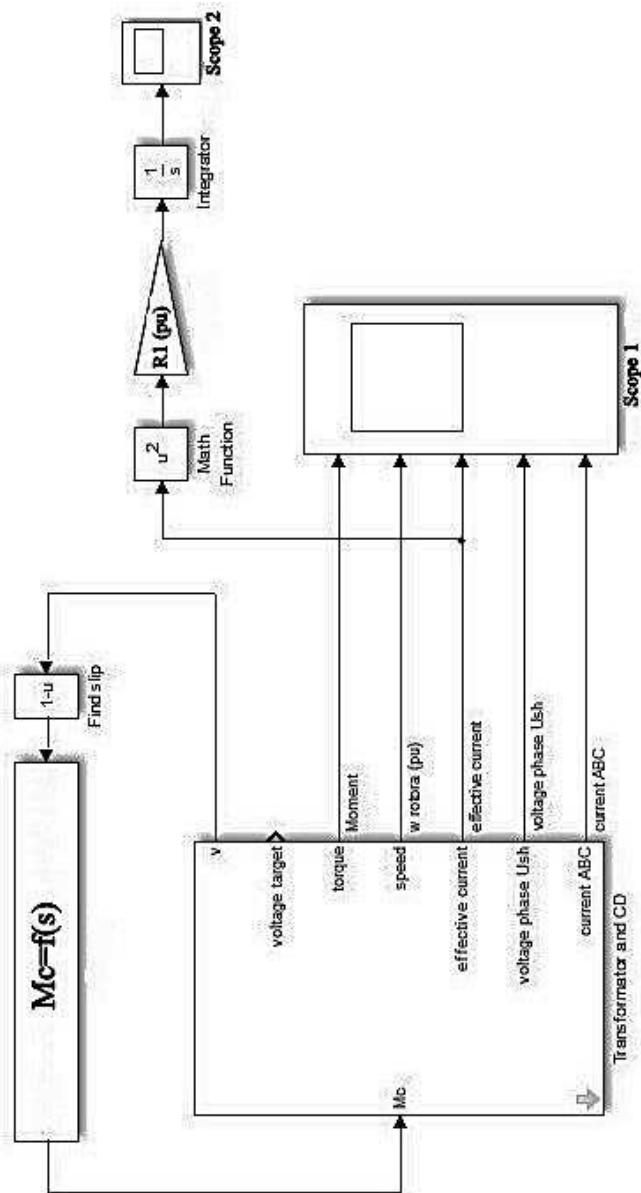


Рис. 3. Компьютерная модель для исследования нагрева СД

Для исследования нагрева СД и влияние жаркого климата было выполнено компьютерное моделирование. Разработанная компьютерная модель приведено на рис. 3. В основу моделирования входит закон Джоуля-Ленца, в соответствии которого тепловая энергия, выделяемая в проводнике пропорционально квадрату тока. Результаты моделирования нагрева СД показали, что при прямом пуске, выделяемая тепловая энергия имеет наибольшее значение 0,76 в о.е. При плавном пуске с использованием УПП, это значение уровнялось 0,66 в о.е (см. рис. 4). Как видно по графикам результата моделирования, при плавном пуске с УПП нагрев синхронного электродвигателя уменьшается, вследствие чего влияние жаркого климата тоже уменьшается.

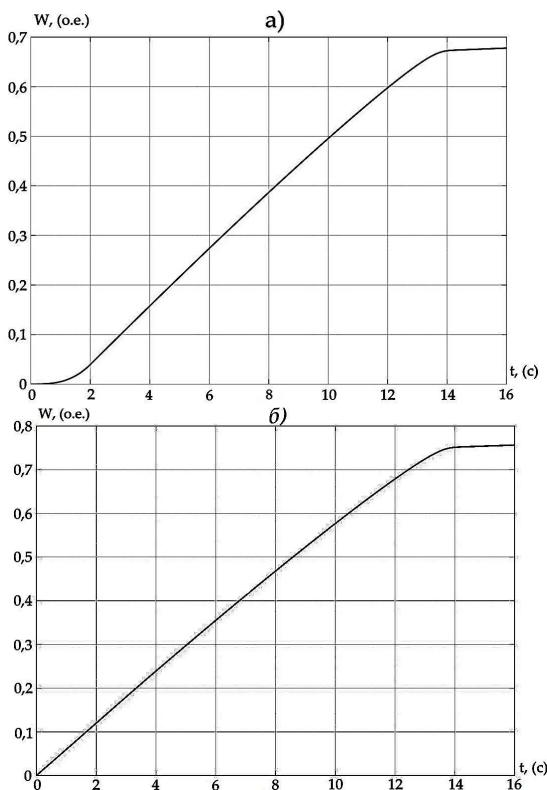


Рис. 4. Графики нагрева СД: а) при плавном пуске; б) при прямом пуске.

В дальнейшем необходимо исследовать пуск с помощью инверторов тока, в которых пуск может выполняться при весьма низких значениях пускового тока и тем самым добиться более весомого снижения нагрева высоковольтных СД.

## ВЫВОДЫ

В результате исследования технологических и переходных процессов электропривода насосных агрегатов оросительной насосной станции АНС-1 было показано, что использование регулируемого электропривода не целесообразны. Достаточно использование устройства плавного пуска, которые стоят дешевле и можно использовать для поочередного включения нескольких электродвигателей.

Результаты компьютерного моделирования показали, что негативные воздействия токов, моментов и жаркого климата можно уменьшить с помощью УПП. Пуск при помощи УПП показал, что переходные процессы проходят в достаточной мере благоприятно, но с учетом нагрева и жаркого климата для более высокого уменьшения нагрева необходимо исследовать пуск СД с помощью инвертора тока.

## Библиографический список

1. **Дадабаев Ш.Т.** Особенности механических характеристик электроприводов с вентиляторным характером нагрузки.// М.: Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. №11. С. 29-34.
2. **Дадабаев Ш.Т.** Перспективы внедрения регулируемых электроприводов в насосных агрегатах большой мощности. Энергетик №7, 2015. С. 31-33.
3. **Дадабаев Ш.Т., Ларионов В.Н.** Исследования применения энергоэффективных способов управления в электроприводах с вентиляторной нагрузкой. Вестник ТГУ №4, 2014. С. 56-59.
4. **Дадабаев Ш.Т., Рахматов Х.А., Абдумаликов Б.А.** Исследование технологических и переходных процессов электроприводов турбомеханизмов. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 4. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 256-263.
5. **Ларионов В. Н., Калинин А. Г.** Энергоэффективность и энергосбережение в электроприводах с вентиляторной нагрузкой. – Чебоксары: Изд-во. Чуваш. Ун-та, 2012. – 146 с.
6. **Лезнев Б. С.** Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуховодных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
7. **Нейман З.Б.** Крупные вертикальные электродвигатели переменного тока. М.: «Энергия», 1974. – 376 с.

# АНАЛИЗ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

канд. техн. наук, доц. Дмитриева О.С.  
мл. науч. сотр. Мадышев И.Н.  
Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, г. Казань

**Аннотация.** В настоящее время наблюдается заметный рост потребления электричества как промышленными предприятиями, так и бытовыми потребителями. Вследствие чего возрастают нагрузки на трансформаторы, большинство из которых работает на предельных нагрузках. Процедура замены трансформаторов в большом количестве является необычайно дорогим мероприятием. Возможным способом увеличения мощности работающего оборудования является организация более интенсивного отвода тепла. В связи с этим разработка компактных устройств для охлаждения трансформаторов с применением термоэлектрических преобразователей позволяет решать задачи, связанные с увеличением теплоотдачи при охлаждении силового оборудования.

Надежность и безопасность электроснабжения потребителей промышленного сектора во многом определяются работой таких электротехнических устройств, как трансформаторы, поэтому является актуальным вопрос поддержания их технического состояния на требуемом уровне. Имеющаяся тенденция старения парка трансформаторов является характерной не только для России, но и для большинства развитых стран. Большая часть трансформаторов имеет срок эксплуатации свыше 30 лет, предельный срок эксплуатации которых 40–45 лет. Высокая степень износа оборудования создает потенциальную опасность как для потребителей, так и для обслуживающего персонала [1, 2].

К тому же работа оборудования в неблагоприятных погодных условиях, обусловленная высокой температурой окружающего воздуха в летний период, ведет к тому, что движущая сила теплового потока минимальна, активные части оборудования нагреваются, нередки случаи перегрева трансформаторов, нарушения системы охлаждения. В связи с этим при ограниченных возможностях замены оборудования необходима разработка компактных конструкций для охлаждения, позволяющих решить проблему отвода тепла от обмоток трансформаторов, что увеличит надежность эксплуатации.

Авторами данной работы предлагается устройство для дополнительного охлаждения масляного трансформатора с термоэлектриче-

скими преобразователями [3]. Оно состоит из теплоизолированной емкости, заполненной водой, на внутренней и наружной сторонах которой имеются металлические ребра, на внешней стороне емкости имеются термоэлектрические преобразователи. Ночью от воды отводится тепло при помощи преобразователей, увеличивающих движущую силу теплообмена, и часть воды переходит в лед. Лед образуется на ребрах, расположенных в воде. Днем лед тает, забирая избыточное тепло от трансформатора. Преобразователь представляет собой термоэлектрический холодильник, имеющий последовательно соединенные полупроводники р- и н-типа, образующих р-н- и н-р- переходы между керамическими пластиинами. Каждый из таких переходов имеет тепловой контакт с одним из двух радиаторов. В результате прохождения электрического тока определенной полярности образуется перепад температур между радиаторами модуля: один радиатор работает как холодильник, другой радиатор нагревается и служит для отвода тепла [4]. Конструктивные параметры и эксплуатационные режимы термоэлектрических устройств представлены производителями [5].

В нижнюю часть бака масляного трансформатора 1 вмонтирован змеевик 7 для дополнительного охлаждения силового трансформатора водой внутри емкости 2. К наружной поверхности одной из стенок емкости 2 прикреплены термоэлектрические модули 8, холодная сторона которых использована для теплопередачи охлаждаемой жидкости. При этом с целью формирования наибольшей толщины слоя льда на внутренней поверхности емкости 2 выполнено оребрение 9 (рис. 1). Для эффективного отвода тепла с нагретой стороны модулей 8 установлен вертикальный канал квадратной или прямоугольной формы 5. Предварительное охлаждение циркулирующей воды происходит в вертикальных грунтовых теплообменниках (ВГТО) 3 и 4 в виде *U*-образных труб, вмонтированных в пробуренные скважины глубиной от 10 до 100 м.

Разработанная система охлаждения имеет два режима работы. Первый режим – накопления холода – используется в часы работы трансформатора, соответствующие небольшой тепловой нагрузке. В этом режиме вода из емкости 2 насосом 6 при закрытой запорной арматуре 11 подается на предварительное охлаждение в первую секцию ВГТО 3. Затем вода поступает в вертикальный канал 5, где происходит отвод тепла от нагретых поверхностей модулей 8. Пленка жидкости, стекающая по вертикальной поверхности канала 5, наиболее эффективно снимает избыток теплоты, обеспечивая при этом пониженную

температуру на холодной стороне модулей 8. За счет этого на внутренней поверхности емкости 2 на выполненном оребрении 9 происходит кристаллизация воды и наращивание слоя льда. Далее вода, нагретая в вертикальном канале 5, поступает на дополнительное охлаждение во вторую секцию ВГТО 4, после чего направляется в верхнюю часть емкости 2. Таким образом, за счет работы термоэлектрических модулей 8 происходит аккумуляция холода в емкости 2 при постоянной циркуляции охлаждающей воды (рис. 1). Проведенные исследования показали, что в пиковые режимы нагрузки оборудования эффективным является охлаждение с помощью термоэлектрических преобразователей определенного объема воды, содержащейся в емкости до температуры 0°C и замораживание оставшегося объема, т.е. применение явления фазового перехода вода–лед.

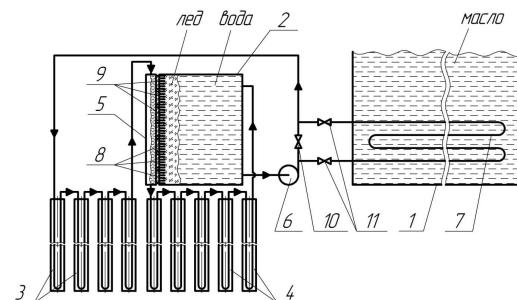


Рис. 1. Дополнительная система охлаждения силового трансформатора [3]: 1 – бак трансформатора; 2 – емкость; 3, 4 – вертикальные грунтовые теплообменники (ВГТО); 5 – вертикальный канал квадратной или прямоугольной формы; 6 – насос; 7 – змеевик; 8 – термоэлектрические модули; 9 – ребра, служащие для формирования слоя льда; 10, 11 – запорная арматура

Второй режим работы соответствует высоким тепловым нагрузкам работы трансформатора. В этом случае охлажденная вода из емкости 2 насосом 6 при закрытой запорной арматуре 10 поступает в змеевик 7. Вода, циркулирующая по змеевику 7, охлаждает трансформаторное масло в баке 1 и далее подается в те же устройства, что и при первом режиме работы. Дополнительное жидкостное охлаждение нижней части бака трансформатора приводит к повышению эффективности охлаждения масла в часы, соответствующие наибольшей тепловой нагрузке, предотвращая выход из строя силовых трансформаторов.

Выводы по работе. Эффективность работы охлаждающего устройства масляных трансформаторов зависит от режима работы термоэлектрических модулей, и его целесообразно рассматривать применительно к конкретным вариантам систем охлаждения. Применение термоэлектрических преобразователей обеспечивает эффективный отвод тепла от токоведущих элементов при кратковременных существенных перегрузках, что значительно увеличивает надёжность работы системы в целом. Проведенные численные исследования позволяют произвести выбор наиболее оптимального теплового потока через преобразователь для охлаждения и кристаллизации жидкости в емкости исходя из времени, отводимого для накопления холода. Для интенсивного охлаждения и кристаллизации воды за короткое время (в течение 3–4 часов) необходимо комбинировать термоэлектрические преобразователи с суммарным тепловым потоком более 1 кВт. В случае возможности продолжительного охлаждения жидкости при невысоких тепловых нагрузках достаточно использовать термоэлектрический преобразователь, имеющий тепловой поток равный 0,5 кВт.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-5215.2016.8.

### **Библиографический список**

1. **Ларин В.С.** Мировые тенденции развития трансформаторного оборудования (по итогам 45-й сессии СИГРЭ) // Электричество. 2015. № 8. С. 20-26.
2. О снижении риска повреждений силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше, сопровождающихся внутренними КЗ / М.М. Львова, С.Ю. Львов, В.Б. Комаров и др. // Электрические станции. 2014. № 9 (998). С. 41-48.
3. **Дмитриева О.С., Дмитриев А.В.** Система охлаждения масляного трансформатора с применением термоэлектрических модулей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 11-12. С. 56-59.
4. **Булат Л.П.** Термоэлектрическое охлаждение: состояние и перспективы // Холодильная техника. 2004. № 8. С. 2-7.
5. Термоэлектрические модули Crystal LTD S-127-14-15-L2. Specification [Электронный ресурс]. URL: <http://www.crystalltherm.com/upload/iblock/9e3/TM%20S-127-14-15-L2%20SPEC.pdf>.

# АНАЛИЗ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯТОРОВ ЛЭП И ОРУ

студент **Жиленков А.А.**

аспирант **Балобанов Р.Н.**

Казанский государственный энергетический  
университет, г. Казань

**Аннотация.** В статье рассмотрена применимость различных методов диагностики состояния изоляции, а также возможность использования световых индикаторов, устанавливаемых на изолирующие конструкции высоковольтных линий и подстанций, для контроля состояния изоляции. Показана осуществимость индикации ранней стадии развития дефекта изоляции при использовании светодиодных излучателей.

**Ключевые слова:** высоковольтная изоляция, дефект изоляции, индикатор дефекта, оптический индикатор.

**Abstract.** The article discusses the applicability of various methods of diagnostics of insulation condition, as well as the possibility of using lights, mounted on insulating construction of high voltage lines and substations, for insulation monitoring. Display shows the feasibility of an early stage of development the defect isolation using LED emitters.

**Keywords:** High-voltage insulation, insulation defect, the defect indicator, optical indicator.

Одним из основных направлений развития энергетики является совершенствование контроля состояния элементов электрооборудования. С развитием технологий становится разумным использование средств дистанционной диагностики контроля состояния электрооборудования с помощью различных датчиков, расположенных в местах потенциального повреждения.

Целью научно-исследовательской работы является анализ существующих методов диагностики дефектов изоляторов и разработка оптимального универсального, удобного и недорого устройства диагностики.

На сегодняшний день есть множество способов контроля изоляции, работающих по принципу приёма излучений: теплового, ультразвукового, светового и др.

Как известно технологическое состояние изоляторов проверяется заводом после его изготовления. Для определения эксплуатационного состояния они нагружаются на некоторых заводах на 60% от минимальной разрушающей нагрузки. Если изолятор выдерживает такую

нагрузку, то он считается годным для использования. Во время испытаний повышенным напряжением изоляция ослабляется (происходит ионизация газовых включений). Эти изменения накапливаются со временем и могут развиться при воздействии перенапряжений. Подобные дефекты в изоляторах позволяет обнаруживать метод, в основе которого лежит акустическая эмиссия. Испытание проводится с помощью стяжек УКИ-1 и приборов ПАК-ЗМ по методике АО "ВНИИЭ". В этом случае контроль происходит несколькими нагрузлениями изолятора на 40%. Если в случае повторного нагружения получен сигнал об акустической эмиссии, то это означает, что в нём есть магистральные трещины. Тем не менее, это у этого метода высокая трудоёмкость, и в ходе испытаний могут появиться трещины, которых раньше не было, потому что в основе эмиссии лежит анализ сигнала при появлении новых или увеличении существующих трещин. Более того, задачей работы является определить именно такой метод диагностики, который был бы наиболее удобен, и который давал бы нам актуальные данные в ходе эксплуатации. А вышеописанные методы позволяют нам получить данные изоляторов, неподключённых к сети и в специальных лабораторных условиях.

Таким образом, искомое устройство должно быть устройством дистанционного контроля. Распространены нестационарные приборы для дистанционной диагностики. Часто встречаются устройства, осуществляющие контроль в ходе облёта вдоль трасс. Одно из изобретений имеет электромагнитный датчик излучения и цифровой осциллограф, установленные на корпусе малоразмерного беспилотного летательного аппарата [1]. С их помощью производится определение высокочастотных импульсов. Информацию об измерениях и данные о местоположении БЛА записываются в память компьютера, расположенного в его корпусе. Существует ряд роботов, приспособленных для передвижения вдоль ВЛ. Например, есть робот, который передвигается по токоведущему проводу или грозозащитному тросу. Он включает в себя устройство привода для перемещения через опоры ЛЭП, устройства сбора, хранения и обработки данных, устройство управления, датчики состояния ЛЭП, камеру и систему приводов. Известно также устройство поиска дефектов, у которого есть прибор передачи радиосигнала на наземную станцию. Оно имеет видеокамеру и микроконтроллер. Существуют также два похожих устройства вертолётного типа, описанные в американском и российском патентах. Они включают в себя летательный аппарат, ролик для передвижения по траекто-

рии грозозащитного троса, аккумулятор и систему управления [2]. У всех этих устройств есть ряд больших минусов. Для них нужно специальное оборудование для размещения их на ЛЭП. Необходимы сложные приводы для перемещения с одной опоры на другую. Они имеют множество механических частей, вероятность выхода из строя которых велика. Должно быть, постоянное наблюдение и управление ими. А также эти устройства разумно использовать только на длинных воздушных линиях электропередач, и не подходят для использования в качестве приборов диагностики изоляторов, к примеру, на РУ.

Исходя из вышеописанного, следует обратить особое внимание на устройства, которые не требуют летательных аппаратов или средств передвижения по линии. Есть ряд устройств, в основе работы которых лежит приём ультразвукового сигнала, который содержится в высоковольтном разряде, например, «Ультрапроб», УД-8М, «Ингула», а также достаточно известен «Ультраскан 2004» - прибор дистанционного контроля высоковольтных изоляторов [3]. Каждый из этих приборов проводит спектральный анализ в своём диапазоне, но у них есть один главный недостаток, заключающийся в том, что в условиях практической эксплуатации на действующих подстанциях амплитуда сигналов от короны при таких частотах во много раз превышает амплитуды сигналов частичных разрядов. Сильные помехи на действующих подстанциях очень сильно затрудняют или даже делают нереальной регистрацию сигналов, вызванных частичными разрядами, а, значит, и диагностику дефектов, т.е. не представляется возможным определить, что является источником - дефект или корона. Тем не менее, «Ультраскан 2004» продуктивно работает при диагностике состояния изоляции электроснабжающих линий и оборудования РУ на напряжение 6-35 кВ. Но при контроле ОРУ на напряжение 110 кВ его эффективность значительно понижается за счет сильных помех из-за поверхностных и коронных разрядов. Эту проблему постарались решить в устройстве, которое работает на частоте около 800-1000 Мгц и способно зарегистрировать сигналы в изоляторах от частичных разрядов при напряжении 110 кВ [4]. Тем самым, он почти, что не ощущает коронные разряды на данном напряжении (судя по испытаниям на двух силовых трансформаторах и на высоковольтных разъединителях, находящихся под напряжением 110 кВ). Однако все перечисленные выше устройства дистанционного контроля высоковольтной изоляции работают, завися от частоты, на которую они рассчитаны. А сигнал о наличие частичных и коронных разрядов на разные напряжения тоже разный.

Соответственно, каждый отдельный прибор не является универсальным по отношению ко всем напряжениям, на которые рассчитаны подконтрольные изоляторы.

Одним из основных методов контроля электрооборудования является ИК-диагностика, т.е. диагностика по тепловому излучению, основанная на регистрации интенсивности собственного инфракрасного излучения изоляции с использованием тепловизоров. Типичные тепловизоры используют матричный неохлаждаемый микроболометр, содержащий  $320 \times 240$  элементов. Использование тепловизионной диагностики применительно к изоляции не столь однозначно. Ожидаемая деградация диэлектрических материалов в электрическом поле в большинстве случаев связана с выделением тепла. Увеличение температуры, однако, весьма мало. Трудности с тепловизионной диагностикой изолирующих конструкций обусловлены двумя факторами. Во-первых, градиент температуры между исправными и дефектными изоляторами, а также между изоляторами и окружающим воздухом типично составляет десятые доли градуса, что близко к пределу чувствительности тепловизоров. Во-вторых, существует неоднозначность определения состояния гирлянд изоляторов. Дефектные изоляторы в гирляндах могут быть как «холоднее», так и «теплее» исправных изоляторов. Существуют и практические трудности проведения инфракрасной диагностики многоэлементной изоляции, связанные с экранировкой «нагретых» металлических частей «холодными» тарелками, бликами от солнца и другими сторонними источниками излучения.

Существует оптический метод регистрации частичных разрядов, у которого наиболее высокая пространственно-временная разрешающая способность и чувствительность. Пространственное разрешение оптических дефектоскопов принципиально ограничено только дифракцией. В настоящее время в России для регистрации ЧР используют электронно-оптические дефектоскопы (ЭОД) «Филин-3» (1984–1988 годы), «Филин-5» (1991–1993 годы) и «Филин-6» (с 1999 года). Однако в старых моделях диагностирование можно производить только ночью, потому что невозможно различать сигнал при дневном свете. Более того все дистанционные способы контроля изоляции обладают ограниченной эффективностью из-за упущения дефектов и требуют опытного диспетчера для правильного истолкования полученных результатов и подходящих погодных и временных условий для работы.

Проанализировав все вышеописанные методы, приходим к тому, что необходимо устройство, которое могло бы содержать в себе полу-

жительные стороны других способов контроля. Таким образом, в КГЭУ было создано устройство индикации оптических сигналов дефектов высоковольтных изолирующих конструкций. Индикатор располагается вблизи изолятора, находящегося под напряжением, так что электрическое поле создает разность потенциалов между его электродами [5]. Состояния изоляционной конструкции можно определить по силе свечения индикатора. Индикатор выполнен по схеме на основе динисторов (рис.1). Спецификой данной схемы является возможность индикации частичных разрядов, происходящих в изоляции при дефекте или загрязнении [6]. Диодный мост VD1 - VD4 в схеме предназначен для выпрямления тока, который заряжает емкость C1. Напряжение на C1 возрастает. Когда напряжение на выводах динистора VD6 достигает 30-40 В, он открывается, и зелёный светодиод HL1 заряжается и светится в импульсном режиме. Если есть частичные разряды, то при определённой величине их импульсов напряжение на динисторе VD7 превышает напряжение на VD6. Тогда он первым откроется, и светиться будет красный светодиод HL2.

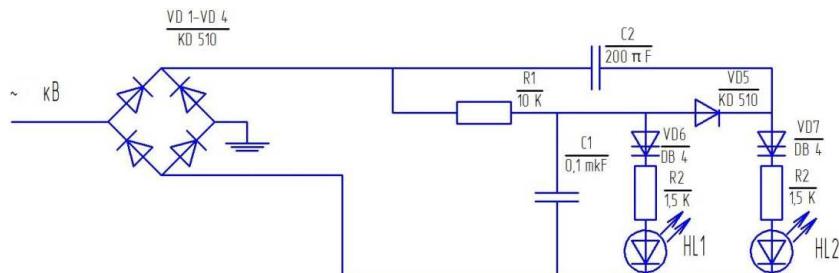


Рис.1. Схема индикатора на основе динисторов

По результатам этих исследований был создан опытный образец индикатора, испытания которого проходили на открытом распределительном устройстве 110кВ Казанской ТЭЦ-3. Индикатор дефекта был установлен на изолирующую штангу и контактной частью соприкасался с заземленной частью опорного изолятора (рис. 2). На данном изоляторе были обнаружены частичные разряды.

**Выводы.** Проанализированы различные методы диагностики изоляции. Обнаружен искомый метод – с помощью оптических индикаторов. Проведённый патентно-информационный поиск показал наличие большого числа разработок в этой области.



Рис.2. Индикатор дефекта у опорного изолятора в ОРУ 110 кВ

Есть потенциал развития выбранного метода: установка в различных местах обследования конструкции, дистанционный способ сбора актуальных данных с датчика или/и использование летательных аппаратов при осмотре приборов, необходимо решить проблемы стойкости к перенапряжениям и неблагоприятным погодным условиям.

### **Библиографический список**

1. Пат. 2483314 Рос. Федерация, МПК G01R 31/08. Способ аэродиагностики высоковольтной линии электропередач / В.Е. Качесов, Д.Е. Лебедев; заявитель и патентообладатель ООО НПП «Энергоконсалт». № 2011147003/28; заявл. 18.11.2011; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.
2. Пат. 2558002 Рос. Федерация, МПК G01R 31/08. Устройство диагностики воздушных линий электропередач и его компонент / Л.О. Виноградова, В.А. Криворотов, А.В. Лемех и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Лаборатория будущего». № 2014103626/28; заявл. 03.02.2014; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 21.
3. Пат. 2262100 Рос. Федерация, МПК G01N 29/04. Устройство ультразвукового контроля высоковольтных изоляторов под напряжением / Ю.А. Калинчук, В.А. Куликов, Ф.А. Калинчук; заявитель и патентообладатель ООО «НПП Метакон-Томич». № 2004104541/28; заявл. 16.02.2004; опубл. 10.10.2005, Бюл. № 28.
4. Пат. 67267 Рос. Федерация, МПК G01N 29/04. Устройство контроля высоковольтного оборудования под напряжением / Ю.А. Калинчук, Л.В. Второва, Ф.А. Калинчук; заявитель и патентообладатель ООО «НПП Метакон». № 2007121335/22; заявл. 06.06.2007; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 28.
5. Пат. 2517776 Рос. Федерация, МПК G01R 31/08. Способ оптической дистанционной диагностики изолирующей конструкции / Зарипов Д.К.; заявитель и патентообладатель Зарипов Д.К. № 2012151785/28; заявл. 03.12.2012; опубл. 27.05.2014, 6 с.
6. **Зарипов Д.К., Балобанов Р.Н.** Индикатор дефекта высоковольтной изолирующей конструкции // Электротехника. 2016. № 6. С. 16-21.

# ОПТИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ И НЕСИММЕТРИЮ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИЖС

аспирант Жилин Е.В.

Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород

**Аннотация.** В работе рассмотрены коэффициенты, характеризующие несинусоидальность и несимметрию. Выявлено, что из-за наличия в системах электроснабжения ИЖС однофазных электроприемников с нелинейной вольтамперной характеристикой их значения превышают предельно допустимые, это приводит к возникновению дополнительных потерь электроэнергии, которые достигают 14% от суммарной потребляемой мощности. Поэтому, целью работы является оптимизация коэффициентов, по критерию минимума потерь электроэнергии при минимуме затрат на установку технического оборудования.

Основными потребителями системы электроснабжения ИЖС являются однофазные коммунально-бытовые электроприемники. Они имеют нелинейную вольтамперную характеристику, так как они содержат полупроводниковые элементы в своей структуре. Это приводит к появлению высших гармоник тока и напряжения в системе электроснабжения ИЖС. Кроме этого неравномерное распределение однофазных электроприемников в трехфазной четырехпроводной сети вызывает появление тока небаланса в нулевом проводе. Наличие высших гармоник и несимметричное подключение электроприемников приводит к снижению показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в системе электроснабжения ИЖС [1].

К показателям, характеризующим несинусоидальный режим работы в системах электроснабжения ИЖС можно отнести суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и тока [2]:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_1} \cdot 100; \quad K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_{(n)}^2}}{I_1} \cdot 100.$$

здесь  $n$  – порядковый номер гармонической составляющей;  $U_{(n)}$  – действующее значение  $n$ -й гармонической составляющей.

Таким образом, для оценки коэффициентов, определяющих несинусоидальность периодических кривых, необходимо знать спектральный состав несинусоидальных токов и напряжений.

Другой характеристикой несинусоидальности является коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения и тока:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_1} \cdot 100; \quad K_{I(n)} = \frac{I_{(n)}}{I_1} \cdot 100.$$

Несимметричный режим работы характеризует коэффициент несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности:

$$K_{2(u)} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\%; \quad K_{0(u)} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\%.$$

Значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$  и несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$  в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2% в течении 95% времени и 4% в течении 100% времени интервала в одну неделю.

Высокий уровень коэффициентов несинусоидальности и несимметрии в системах электроснабжения ИЖС приводит к появлению дополнительных потерь электроэнергии, которые могут достигать 14% от суммарной потребляемой электроэнергии [3].

Для снижения коэффициентов, и как следствие дополнительных потерь электроэнергии, существует множество различных методов и технических устройств [4]. Однако это потребует дополнительных финансовых вложений. В итоге имеются две взаимосвязанные составляющие затрат: затраты на установку технических устройств для уменьшения коэффициентов и затраты от низкого качества электроэнергии.

Применять различные методы, снижающие коэффициенты несинусоидальности и несимметрии в системе электроснабжения ИЖС очень сложно, а порой и невозможно, а использование различных технических устройств не всегда окупается даже за весь период эксплуатации.

Поэтому основной целью оптимизации коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию является выбор техни-

ческих средств компенсации избытка реактивной мощности, тока искажений высших гармоник и тока небаланса от несимметричной нагрузки. Задача оптимизации решается путем минимизации потерь электроэнергии, вызванных наличием высших гармоник и несимметричных токов.

Постановка оптимационной задачи заключается в определении объекта, параметров и критериев оптимизации, а также ограничений для целевой функции.

Выбор оптимального типа, мощности и места размещения технических средств для уменьшения потерь электроэнергии в системе электроснабжения ИЖС выполняется с учетом двух критериев: минимума приведенных затрат и минимума потерь активной мощности. Целевая функция для первого критерия  $Z(\mathcal{E})$  содержит два слагаемых: стоимость потерь электроэнергии в системе электроснабжения ИЖС, затраты на установку технических средств.

$$Z(\Delta\mathcal{E}) = c_1 \cdot \Delta\mathcal{E} + K_H \cdot K(\mathcal{E}) \rightarrow \min,$$

где,  $c_1$  – стоимость потерь 1 кВт·ч электроэнергии;  $\Delta\mathcal{E}$  – потеря электроэнергии за установленный период;  $K_H$  - нормативный коэффициент окупаемости капиталовложений;  $K(\mathcal{E})$  – капитальные затраты на установку технических средств.

На целевую функцию накладывается область ограничения, обусловленная техническими требованиями к системе электроснабжения ИЖС.

$$\begin{cases} |U_1(Y_{\Phi KY})| \leq U_{(1)доп}; \\ K_U(Y_{\Phi KY}) \leq K_{Uдоп}; \\ K_I(Y_{\Phi KY}) \leq K_{Iдоп}; \\ K_{2U}(Y_{\Phi KY}) \leq K_{2Uдоп}; \\ K_{0U}(Y_{\Phi KY}) \leq K_{0Uдоп}; \\ \cos\varphi_{A,B,C}(Y_{\Phi KY}) \leq \cos\varphi_{A,B,C Hop}, \end{cases}$$

где  $Y_{\Phi KY}$  – вектор столбец проводимости ФКУ, См;  $U_{(1)доп}$  – текущее (допустимое) напряжение прямой последовательности в узле сети, В;  $\cos\varphi_{A,B,C Hop}$  – текущее (нормативное) значение коэффициента мощности;  $K_{2U}$  - текущее (допустимое) значение коэффициента несимметрии

напряжения по обратной последовательности, %;  $K_{0U}$  – текущее (допустимое) значение коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности, %;  $K_U$  – текущее (допустимое) значение суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению, %;  $K_I$  – текущее (допустимое) значение суммарного коэффициента гармонических составляющих по току, %;

Система электроснабжения ИЖС описывается методом узловых потенциалов. Исходными данными являются технико-экономические показатели, таки как стоимость электроэнергии, удельные затраты на единицу технических средств, параметры сети, диапазон нагрузок [5].

$$\dot{I} = \underline{Y} \cdot (S'((\underline{SY}S')^{-1} \cdot S(\dot{J} - \underline{Y} \dot{E})) + \dot{E}) - \dot{J},$$

где  $E$  – вектор-столбец комплексных ЭДС ветвей (ненулевые значения для ветвей трансформатора),  $B$ ;  $J$  – вектор-столбец комплексных узловых токов (ненулевой),  $A$ ;  $Y$  – диагональная матрица комплексных проводимостей ветвей, См;  $I$  – вектор-столбец комплексных токов ветвей,  $A$ ;  $S$  - матрица связи.

Результатом вычислений является оптимальный вектор мнимых составляющих проводимостей ветвей с минимальным уровнем высших гармоник и несимметрии, на основании которых определяются номера ветвей, содержащих технические устройства для компенсации нелинейности и несимметрии.

Условия реализуемости технических средств определяются точностью компенсации, быстродействием, эксплуатационной надежностью, удельными затратами на монтаж и эксплуатацию. Поэтому необходимо проанализировать все способы компенсации высших гармоник и несимметричных токов в системе электроснабжения ИЖС учитывая ее особенности.

Для примера рассмотрим фрагмент системы электроснабжения ИЖС, представленный на рис. 1. Для узлов системы электроснабжения требуется определить величину тока компенсации третьей гармоники исходя из условия минимума суммарных затрат на установку этих устройств и покрытия потерь активной мощности.

Исходными данными является напряжение сети ( $U_{nom} = 0,4$  кВ), сопротивление линии ( $R_1 = 0,4$ ;  $R_2 = 0,5$ ), ток третьей гармоники в узлах ( $I_{1(3)} = 3,12$  ;  $I_{2(3)} = 3,62$  ), удельные затраты на установку технических устройств ( $Z_0 = 0,5$  у.е./A), удельные затраты на покрытие потерь активной мощности ( $C_0 = 10$  у.е./кВт).

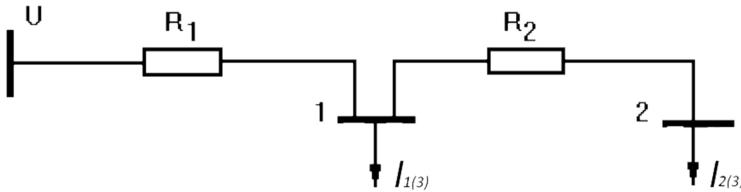


Рис. 1. Фрагмент системы электроснабжения ИЖС

Целевая функция, представляет собой суммарные затраты на установку технических устройств и покрытие потерь активной мощности в системе электроснабжения ИЖС

$$Z = Z_0 \cdot (I_{\kappa 1} + I_{\kappa 2})^2 + a_1 \cdot (I_{1(3)} + I_{2(3)} - I_{\kappa 1} - I_{\kappa 2})^2 + a_2 \cdot (I_{2(3)} - I_{\kappa 2})^2 \rightarrow \min,$$

где  $a_1 = R_1 \cdot C_0 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_2 = R_2 \cdot C_0 \cdot 10^{-3}$ ,  $I_{\kappa 1}$  и  $I_{\kappa 2}$  – величина тока компенсации.

Введение числового коэффициента  $10^{-3}$  необходимо для приведения всех составляющих целевой функции к одной размерности (у.е.).

Для решения задачи выбираем метод покоординатного «спуска». Для этого необходимо определить частные производные целевой функции по переменным  $I_{\kappa 1}$  и  $I_{\kappa 2}$ .

$$\frac{\partial Z}{\partial I_{\kappa 1}} = Z_0 - 2 \cdot a_1 \cdot (I_{1(3)} + I_{2(3)} - I_{\kappa 1} - I_{\kappa 2});$$

$$\frac{\partial Z}{\partial I_{\kappa 2}} = Z_0 - 2 \cdot a_1 \cdot (I_{1(3)} + I_{2(3)} - I_{\kappa 1} - I_{\kappa 2}) - 2a_2 \cdot (I_{2(3)} - I_{\kappa 2}).$$

Примем исходное приближение  $I_{\kappa 1} = 0$ ,  $I_{\kappa 2} = 0$ . Для этих значений вычислим значения целевой функции и ее частных производных:  $Z^0 = 22,8$  у.е.,  $\partial Z / \partial I_{\kappa 1} = 0,45$ ,  $\partial Z / \partial I_{\kappa 2} = 0,41$ .

Очевидно, что в направление переменной  $I_{\kappa 2}$  целевая функция  $Z$  убывает сильнее, чем в направлении  $I_{\kappa 1}$ , поскольку производная  $|\partial Z / \partial I_{\kappa 1}| > |\partial Z / \partial I_{\kappa 2}|$ . Поэтому в направлении  $I_{\kappa 2}$  начинаем «спуск». Принимаем величину шага  $\lambda = 4$  А, тогда первое приближение будет  $I_{\kappa 1} = 0$ ,  $I_{\kappa 2} = 4$ , а значение целевой функции составит  $Z^1 = 22,725$  у.е. Второй шаг  $I_{\kappa 1} = 0$ ,  $I_{\kappa 2} = 8$ , значение целевой функции  $Z^2 = 22,81$  у.е.

Из результатов вычисления целевой функции видно, что «спуск» по координате  $I_{\kappa 2}$  целесообразно прекратить, поскольку  $Z^2 > Z^1$ , и вер-

нуться к значениям переменным полученным на первом шаге. Выполним новый второй шаг в направлении первой переменной  $I_{k1} = 4$ ,  $I_{k2} = 4$ , значение целевой функции  $Z^3 = 22,79$  у.е. Движение в направлении первой переменной нецелесообразно поскольку  $Z^3 > Z^2$ .

Точка с координатами  $I_{k1} = 0$ ,  $I_{k2} = 4$  находится в окрестности минимума целевой функции  $Z$ , при принятой длине шага  $\lambda = 4$  А, более точное решение, без использования вычислительных программ не может быть получено. Таким образом для наиболее эффективного уменьшения коэффициентов, необходимо установить во втором узле фильтрокомпенсирующие устройство с величиной тока компенсации третьей гармоники 4 А.

**Выводы:** анализ системы электроснабжения ИЖС, показал наличие высших гармоник и токов несимметрии, которые приводят к дополнительным потерям и увеличению коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию.

Выбор технических устройств для уменьшения коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию необходимо производить одновременно по нескольким параметрам, путем решения нелинейной задачи оптимизации.

### **Библиографический список**

1. Виноградов А. А., Зябкина О. Н. Показатели качества электрической энергии, обусловленные применением светодиодных светильников // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 159–161.
2. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Авербух М. А., Жилин Е. В. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Энергетик. 2016. № 6. С. 54–57.
4. Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в электроустановках промышленных предприятий / М.А. Авербух, В.А. Кузнецов, Д.Н. Коржов и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 5 (36). С. 203–208.
5. Третьяков Е. А. Оптимизация качества и потерь электрической энергии в электрических сетях нетяговых потребителей // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2011. № 3 (34). С. 50–54.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СЕТЯХ 110-500 кВ

канд. техн. наук, доц. Зацаринная Ю.Н.

канд. физ.-мат. наук, доц. Губаева О.Г.

студент Рахмаев Р.Н.

Казанский государственный энергетический  
университет, г. Казань

**Аннотация.** В статье рассматриваются причины возникновения феррорезонансных явлений и способы сохранения оборудования в работоспособном состоянии, путем борьбы с этим явлением. Причины возникновения феррорезонансных явлений в сетях 110 кВ и 220-500 кВ различны, это связано со способом заземления нейтрали 110 кВ и выше 110 кВ.

С целью повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем необходимо применять системный подход по анализу работы ее отдельных объектов. Для разработки методов анализа сложных объектов, таких как электроэнергетическая система, необходим скрупулезный разбор исходной статистической информации по работе элементов этой системы для принятия решений по оптимизации работы, снижению повреждений в исследуемых объектах.

Современные требования надежного электроснабжения потребителей определяют необходимость исследования режимов работы электрических систем, приводящих к повреждению электрооборудования и недопуску электроэнергии. Одной из важнейших причин возникновения таких режимов являются феррорезонансные явления, поэтому исследование причин их возникновения в сетях 110-500 кВ являются актуальными и необходимыми для разработки мероприятий по их предотвращению и ликвидации.

Целью исследования является изучение процесса феррорезонанса в сетях 110-500 кВ, выявление возможных последствий и мероприятий по недопущению повреждения трансформаторов напряжения при влияния феррорезонансного процесса на них.

Феррорезонансные явления возникают в электрических сетях при неполнофазных включениях, оперативных переключениях, перемежающихся дуговых замыканиях на землю при взаимодействии емкостей электрооборудования электрических систем с нелинейными индуктивностями намагничивания магнитопроводов трансформаторов [1, С. 135].

При возникновении явления феррорезонанса возникают достаточно длительные перенапряжения на шинах распределительных устройств, опасные для ограничителей перенапряжений и разрядников, и токовые перегрузки обмоток электромагнитных трансформаторов, которые могут привести к повреждению изоляции и образованию витковых замыканий, что может привести к взрывам трансформаторов, а следовательно, к пожарам в распределительных устройствах электрических станций и подстанций.

Кроме экономической целесообразности исследования феррорезонансных процессов можно выделить документальные факторы, в частности пункт 4.2.175 ПУЭ, в котором сказано, что в РУ 220-500 кВ с воздушными выключателями следует предусматривать мероприятия по предотвращению феррорезонансных перенапряжений, возникающих при последовательных включениях трансформаторов напряжения и емкостных делителей напряжения выключателей.

Феррорезонансные явления имеют место быть в электрических сетях не зависимо от их номинального напряжения и способа заземления нейтралей силовых трансформаторов. Из них к большему материальному ущербу приводят феррорезонансные явления в сетях 110-500 кВ, следовательно, они являются наиболее опасными. Причины возникновения феррорезонансных явлений в сетях 110 кВ и 220-500 кВ различны, это связано со способом заземления нейтрали 110 кВ и выше 110 кВ.

Воздушные и реже кабельные распределительные сети 110 кВ работают с эффективно заземленной нейтралью, однако у значительной части силовых трансформаторов она разземлена для уменьшения токов КЗ и упрощения релейной защиты [2, С. 66]. В этих сетях были замечены три вида устойчивых феррорезонансных явлений:

- гармонический (50 Гц) и субгармонический (16,6 Гц) феррорезонанс между нелинейной индуктивностью ТН и емкостями конденсаторов, шунтирующих разрывы высоковольтных выключателей;
- субгармонический феррорезонанс при неполнофазных режимах линий электропередачи, когда напряжение попадает на отключенную фазу (вместе с установленным ТН) через междуфазные емкости линии;
- гармонический феррорезонанс при неполнофазных режимах линий электропередачи, когда емкость невключенной фазы резонирует с нелинейной индуктивностью отпаченного силового трансформатора с разземленной нейтралью.

Феррорезонанс ТН с шунтирующими конденсаторами на выключателях отмечался в те времена, когда такие конденсаторы там устанавливались. Современные выключатели 110 кВ шунтирующих конденсаторов не имеют.

Субгармонический феррорезонанс на отключенном фазе линии отмечался только один раз более 40 лет назад. Произошло это на очень длинной магистральной линии без отпаек на силовые трансформаторы. С тех пор конфигурация сети 110 кВ изменилась и такие феррорезонансные явления больше не наблюдались.

Неполнофазные режимы ЛЭП 110 кВ случаются либо из-за отказа выключателей или разъединителей, либо из-за обрывов проводов. Отключенная от источника фаза линии не может рассматриваться в качестве элемента сети с заземленной нейтралью. На этой фазе возможны как неотключаемые замыкания на землю, так и длительные феррорезонансные явления, сопровождающиеся, как показывает опыт, 2,5-кратными повышениями напряжения основной частоты. Последние могут возникнуть, если все присоединенные к линии отпаечные силовые трансформаторы окажутся слабонагружены и имеют разземленную нейтраль. ТН 110 кВ повреждается при этом за несколько минут. Таких случаев в России происходит по 10–15 ежегодно.

Сети с напряжением 220 кВ и выше – это в основном магистральные сети с эффективно заземленной нейтралью, которая у силовых трансформаторов никогда не разземляется. При неполнофазных режимах линий с подключенными к ним силовыми трансформаторами тоже возможны повышения напряжения основной частоты. Но они не столь значительны, как в сетях 110 кВ, быстро отключаются существующей защитой от повышения напряжения.

Практический опыт эксплуатации показывает, что существенную опасность для электромагнитных ТН представляет явление феррорезонанса с емкостями конденсаторов, шунтирующих разрывы высоковольтных выключателей. На новых элегазовых выключателях 220 кВ удалось избавиться от шунтирующих конденсаторов, а на напряжении 330–750 кВ конденсаторы еще остаются [3, С. 17].

Результирующая емкость конденсаторов, шунтирующих один полюс выключателя, может быть весьма значительной – более 1000 пФ. Если после отключения выключателя напряжение источника через эти конденсаторы попадет на ТН, то может возникнуть феррорезонанс. Напряжение источника прикладывается к ТН не полностью, а делится между емкостью шунтирующих конденсаторов и емкостью шин, на

которых он установлен. Величина напряжения на ТН зависит от соотношения этих емкостей.

Для анализа феррорезонансных процессов реальную схему, содержащую несколько источников и выключателей, ошиновку и ТН, представляют однофазным эквивалентным контуром, состоящим из одного источника, одной эквивалентной емкости и одного ТН. Эквивалентная емкость равна сумме емкостей всех выключателей и ошиновки, а напряжение эквивалентного источника определяется соотношением этих емкостей.

Параметры эквивалентных контуров в реальности очень разнообразны: напряжение варьируется от 10 до 90% от напряжения источника, а емкость может составлять от сотен до десятков тысяч пикофарад. Поэтому и феррорезонансные процессы тоже различны. Меняются не только величины токов и напряжений ТН, но и их частота. Наиболее опасен гармонический феррорезонанс на частоте 50 Гц, сопровождающийся большими токами, при которых для теплового повреждения первичной обмотки ТН достаточно 5–10 мин. Субгармонический феррорезонанс на частоте 16,6 Гц сопровождается в 10 раз меньшими токами, нагревает первичную обмотку ТН в 100 раз медленнее и соответственно менее опасен.

В последние годы рядом авторов Дементьевым Ю.А., Горюшиным Ю.А., Дарьян Л.А., Архиповым И.Л., ОАО «ФСК ЕЭС», Акопян А.Г., ОАО РТЗ «Энергия», Берлин Б.Е., Агафоновым Г.Е., ОАО «НИИВА», Кадомской К.П., Лаптевым О.И., НГТУ, Гайворонским А.С. ведутся интенсивные работы по экспериментальным и теоретическим исследованиям по возникновению феррорезонанса в сети 500 кВ, результате которых авторы пришли к выводу, что для предотвращения феррорезонансных явлений в схемах подстанций напряжением 220 кВ и выше оперативные переключения следует производить в такой последовательности, при которой не создавались бы схемы последовательного соединения делительных конденсаторов воздушных выключателей с трансформаторами напряжения серии НКФ [4, С. 13].

В заключении работы можно сделать вывод, что в сети 110 кВ, при работе с разземленной нейтралью, можно выделить в отдельную группу, так как феррорезонанс может возникнуть при возникновении неполнофазных режимов работы. Для сохранения электрооборудования в таких случаях можно рекомендовать трехфазное отключение резонирующих силовых трансформаторов от линии выключателями. Отключение должно производиться от дополнительно установленной

релейной защиты, реагирующей на повышение напряжения нулевой последовательности на разомкнутом треугольнике дополнительных обмоток ТН 110 кВ с уставкой 150 В и выдержкой времени 3–5 с.

Основной причиной феррорезонанса, в сетях с глухозаземленной нейтралью, является наличие высоковольтных выключателей с емкостным делителем. Известны несколько способов борьбы с феррорезонансом, на основе которых можно разработать антирезонансный электромагнитный ТН 220–750:

- линеаризация характеристики намагничивания путем размыкания магнитопровода;
- повышение потокосцепления насыщения путем снижения nominalной индукции;
- повышение потерь в меди первичной обмотки;
- повышение потерь в стали магнитопровода.

Кроме того, для исключения феррорезонансных явлений в схемах подстанций напряжением 220 кВ и выше, что важна последовательность операций, исключающая феррорезонансные процессы.

### **Библиографический список**

1. Методика обнаружения дефектов первичной обмотки измерительного трансформатора напряжения типа НКФ / Мартин Ндайизе, Р.Г. Ильдарханов, А.Е. Усачев, Г.Г. Ильдарханов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 5-6. С. 134–143.
2. Поляков В.С., Чертусова В.М. Феррорезонанс в сети 220 кВ и меры борьбы с ним // Труды ЛПИ. Л., 1982. № 382. С. 65–71.
3. Зарипов Д.К., Балобанов Р.Н. Индикатор дефекта высоковольтной изолирующей конструкции // Электротехника. 2016. № 6. С. 16–21.
4. Экспериментальные и теоретические исследования условий возникновения феррорезонанса в сети 500 кВ с трансформаторами напряжения типов НКФ и НАМИ / Ю.А. Дементьев, Ю.А. Горюшин, Л.А. Дарьян и др. // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2007. № 4. С. 10–14.

# **ПОТЕРИ МОЩНОСТИ НА КОРОНУ НА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ И СПОСОБЫ ИХ СНИЖЕНИЯ**

канд. техн. наук, доц. **Зацаринная Ю.Н.**

студент **Крайкоза А.И.**

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань*

**Аннотация.** В статье описаны условия возникновения коронного разряда на поверхности проводов и то, чем сопровождается это явление. Наиболее подробно изложен вопрос потерь мощности на корону и способы снижения данных потерь.

В настоящее время все больше заметным становится темп роста потребления электроэнергии на душу населения и все более насущной становится проблема качества ее передачи. Снижение уровня обслуживания объектов электроэнергетики, увеличение эксплуатационной нагрузки на них и несвоевременная замена изношенного оборудования ведет к аварийным режимам, влекущих различного рода электрические пробои и искровые разряды и, в частности, коронный разряд. Так, например, по характеристикам коронного разряда судят о величине потери мощности в высоковольтных линиях. Вопрос потерь мощности на корону является весьма актуальным, так как согласно данным работ Ю.С. Железненко, годовые потери мощности на корону в электрических сетях РФ составляют более 4 млрд кВт·ч.

Целью работы является изучение условий возникновения коронирования проводов ВЛ и способов ограничения этих влияний.

Из-за неравномерности многопроволочных проводов и различных дефектов корона на проводах возникает точечно и называется местной. Далее по мере увеличения напряженности корона распространяется по всей длине провода, такая корона называется общей [1, С. 135].

Коронование проводов сопровождается свечением, радиопомехами, акустическим шумом, продуцированием озона, повреждением изоляции линий электропередач. Не мало важным является утечка тока, и как следствие потеря мощности. Для ограничения потерь мощности на корону в ПУЭ предусмотрена глава 1.3 «Выбор проводников по нагреву, экономической плотности тока и по условиям короны», согласно которой выбор проводников на напряжение 35 кВ и выше должен происходить с учетом среднегодовых значений плотности и температуры воздуха, приведенного радиуса проводника, а также коэф-

фициента негладкости проводников [2, С. 13]. При этом наибольшая напряженность поля у поверхности любого из проводников, определенная при среднем эксплуатационном напряжении, должна быть не более 0,9 начальной напряженности электрического поля, соответствующей появлению общей короны. Выполнение данных условий оказывает существенное влияние на выбор конструкции ЛЭП.

Самым весомым фактором, влияющим на коронование проводов являются погодные условия. Этот фактор является сложным в устранении, в виду своих физических свойств. Капли дождя, снега, инея, оседая на проводах создают «острые» выступы, тем самым уменьшая диаметр провода, что снижет  $U_{kp}$  (и  $E_{kp}$ ) на 30-50%, и провода начинают короновать.

При исследовании влияния погодных условий на корону выделяют следующие виды погодных условий:

- хорошая погода (погода с относительной влажностью воздуха менее 90%, без осадков, тумана и отложений росы, инея, изморози и гололеда на проводах);

- сухой снег, к которому можно отнести снежную крупу, снежные зерна, ледяные иглы в воздухе, метели с выпадением снега (за исключением низовой метели и поземок, которые не достигают проводов);

- дожди разной интенсивности, в том числе морось и мокрый снег, так как их влияние на уровень ПК близко к влиянию дождя;

- изморозь, приводящая к гололедно-изморозевым отложениям на проводах. Сюда относятся: кристаллическая и зернистая изморозь, гололед, сложные отложения на проводах.

- плохая погода с повышенной влажностью, с туманом различной интенсивности, отложением инея, изморози и росы на проводах) [3, С. 5].

В табл.1 в зависимости от погодных условий приведены средние удельные потери мощности и энергии на корону в воздушных линиях электропередач в сетях РФ с учетом их продолжительности в часах.

Из данных таблицы следует, что потери энергии на корону на ВЛ увеличиваются с ростом напряжения. Следует отметить, что эти потери невозможно исключить, их можно только ограничивать.

Для уменьшения потерь на корону используют расщепление проводов. При проектировании ЛЭП 500 кВ используют 3 провода в пучке, разнесенных на расстояние 45 см друг от друга.

Провода фиксируются на заданном расстоянии дистанционными изоляционными распорками. Этот пучок эквивалентен одному проводу весьма большого диаметра.

Таблица 1

Средние удельные потери мощности и энергии на корону в воздушных линиях электропередач в сетях РФ

Вид погоды	Продолжительность, час	Потери энергии ВЛ, Вт·ч/м			
		220	330	500	750
Хорошая	5159	1548	7738	12382	29406
Повышенная влажность	746	1268	4028	6266	14174
Снег	807	1956	5326	10007	20175
Туман	190	608	1900	3116	6460
Дождь	395	2370	7616	14280	31892
Изморозь	1381	17953	49716	81755	160196
Среднегодовые потери энергии, Вт·ч/м	25603	76324	127806	262303	

Чтобы снизить влияние погодных условий целесообразно применять покрытие проводов, препятствующие возникновению на его поверхности капель дождя и изморози. Такими покрытиями является супергидрофобное и супер-гидрофильтное. Супер-гидрофобное покрытие исключает возможность образования капель в силу поверхностного натяжения, а супер-гидрофильтное обеспечивает равномерное смачивание вдоль всего провода тонкой пленкой [4, С. 6].

В перспективе рассматривается использование покрытия стойкого к природным факторам и электромагнитному полю, которое будет обладать свойствами самоочистки в зависимости от солнечной или энергии электромагнитного поля.

Для регулировки напряжения в сетях 220 кВ и выше целесообразно привлекать электрические станции, так как основной резерв по реактивной мощности и быстродействующие средства её регулирования сосредоточены именно там. А на блочных трансформаторах, где не устанавливаются устройства регулирования напряжения под нагрузкой, для регулирования напряжения на РУ 220 кВ и выше возможно с применением специальных устройств автоматики [5, С. 2]. Таким устройством может являться устройство автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора. Данный метод рассматривается в перспективе как услуга, которая будет введена на Рынке системных услуг, функционирование которого обеспечивает АО «Системный оператор Единой энергетической системы».

Из-за того, что потери мощности на корону увеличиваются на 1-2 порядка при плохих погодных условиях и слабой загрузке линии, целесообразно применять режимное регулирование. Если при плохой

погоде среднезатратное напряжение 515 кВ снижать до 500 кВ, то потери данные потери уменьшатся на 10-15 %. Для осуществления оперативного регулирования напряжения сети необходимы данные о текущем и прогнозируемом значении потерь на корону в проводах. Также нужно учитывать условия нагрева и охлаждения проводов, так как при хорошей солнечной погоде поверхность провода может нагреться на 10 градусов выше окружающей его среды.

**Выводы.** Коронование проводов сопровождается свечением, продуцированием озона, акустическим шумом, повреждением изоляции ЛЭП, и потерями мощности. Потери мощности на корону в сетях РФ велики и их нельзя исключить, их можно только ограничить. Уровень этих потерь зависит от погодных условий. Для ограничения потерь мощности на корону в ПУЭ предусмотрена глава 1.3 «Выбор проводников по нагреву, экономической плотности тока и по условиям короны», учет которой влияет на конструкцию фаз ЛЭП. Использование специальных покрытий проводов препятствующих возникновению на поверхности провода капель дождя и изморози, что также уменьшает потери на корону. Ограничение потерь на корону осуществимо не только на вновь проектируемых ЛЭП, но и на уже существующих. Перспективным направлением в данном вопросе является привлечение для регулировки напряжения в сети электрических станций и осуществление режимного регулирования.

### **Библиографический список**

1. Капцов Н. А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. М., Л.: ОГИЗ. Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1947. 226 с.
2. Красько А. С., Пономаренко Е. Г. Техника высоких напряжений (Изоляция и перенапряжения). Минск: БНТУ, 2011. С. 29-31.
3. Линии электропередачи 345 кВ и выше: Сб. Л59 трудов НИИ энергетики СССР / Пер. с англ. В. В. Бургдорфа. М.: Энергия, 1980 [Электронный ресурс]. URL: <http://forca.ru/knigi/archiv/linii-elektroperedachi-345-kv-i-vyshe-5.html>.
4. Тамазов А. И. Потери на корону и их снижение в сети 220 кВ и выше // Электро. 2004. № 4. С. 15-20.
5. Костюшко В. А. Анализ расчетных и экспериментальных оценок потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередачи переменного тока. М.: НТФ «Энергопрогресс»: Энергетик, 2011. 83 с.

# **РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ БЛОКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА ТГФ-500 кВ**

канд. техн. наук, доц. **Петухов С.В.**

ст. преп. **Кришьянис М.В.**

*Северный (Арктический) федеральный  
университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск*

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются достоинства элегазового трансформатора тока на класс напряжения 500 кВ. Особый интерес представляет расчет и анализ электрического поля в таком трансформаторе - он выполняется с целью определения снижения напряженности на элементах блока измерительных обмоток трансформатора. Результаты некоторых расчетно-теоретических исследований приведены ниже. Проведенные исследования доказали надёжность таких аппаратов и их перспективность для применения в нашей стране.

В последнее десятилетие появилась устойчивая тенденция применения в электроэнергетике для ОРУ трансформаторов тока (ТТ) с элегазовой изоляцией.

Превосходство элегазовых трансформаторов тока над трансформаторами тока с бумажно-масляной изоляцией очевидно:

- отсутствие масла, являющегося причиной пожара;
- для предотвращения разрушения и пожара при коротком замыкании внутри ТТ в конструкции предусмотрено мембранные предохранительные устройства, срабатывающие при определенном аварийном давлении, которое ниже давления, рассчитанного из условий механической прочности элементов конструкции ТТ;
- ТТ, заполненный элегазом, имеет меньшую массу;
- обслуживание ТТ в эксплуатации сводится к мониторингу давления элегаза в ТТ;
- контроль качества элегаза методом взятия проб не требуется;
- правильно выбранные и изготовленные уплотнения в конструкции ТТ обеспечивают его эксплуатацию без подпитки элегазом - 15-20 лет.

Рассмотрим некоторые особенности проектирования высоковольтных трансформаторов тока с элегазовой изоляцией:

- при расчете электрических полей, выборе изоляционных промежутков и формы электродов должно быть обеспечено отсутствие ча-

стичных разрядов, вызывающих разложение элегаза с появлением химически активных составляющих;

– аппарат, заполненный элегазом, представляет собой сосуд, работающий под давлением. Поэтому элементы конструкции трансформатора тока должны удовлетворять требованиям ГОСТ 26158-84 и ГОСТ 14249-89.

– разъемные и неразъемные соединения должны обеспечивать герметичность при заданных перепадах температуры окружающей среды.

Поскольку стоимость изготовления элементов КРУЭ прямо связана с их размерами, вполне естественным является стремление изготовителей к их уменьшению. Это проявляется, в числе прочего, в постоянной тенденции к снижению размеров изолирующих промежутков и использованию слабонеоднородных электрических полей, в которых изоляция в наибольшей степени заполнена сильным электрическим полем. Характерное свойство элегазовой изоляции в промежутках со слабонеоднородным полем заключается в том, что пробой изоляции происходит под действием максимальной напряжённости практически независимо от распределения поля в изолирующем промежутке. Это позволяет, основываясь на результатах расчёта параметров поля, с высокой точностью определять расчётным путём уровень электрической прочности высоковольтной изоляции в проектируемом аппарате и приводить его в соответствие с предъявляемыми требованиями.

Особый интерес представляет расчет и анализ электрического поля – он выполняется с целью определения снижения напряженности на элементах блока измерительных обмоток трансформатора тока ТГФ-500 кВ в месте установки узла транспортного крепления.

Эта система отличается от использованных ранее моделей изменением формы блока транспортного крепления. Наименьшее расстояние между блоком транспортного крепления и оболочкой равно 141 мм в области слабо неоднородного поля.

Для выполнения расчетно-теоретических исследований использовался программный комплекс Elcut .

Расчётная модель (рис.1) обладает осевой симметрией и симметрией относительно нижней границы.

Расчёты выполнены при потенциале экрана вторичной обмотки 100 кВ, потенциале оболочки  $U=0$ . С учётом замкнутости расчётной системы инверсия потенциалов не приводит к изменению вычисляемых напряженностей.

Результаты выполненного расчёта представлены на рис. 2-4 .

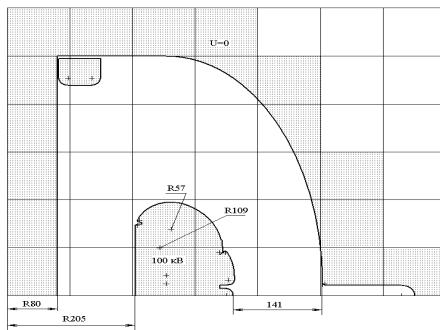


Рис. 1. Расчетная модель

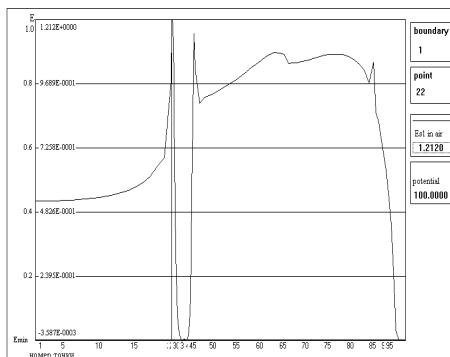


Рис.2 Распределение напряжённости по поверхности блока вторичных обмоток

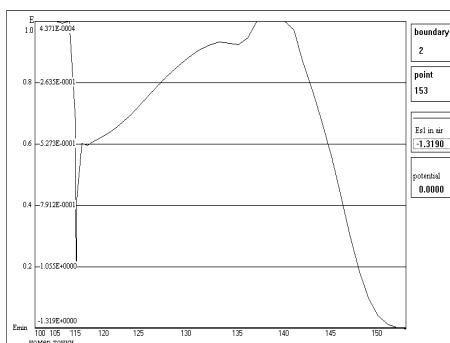


Рис.3 Распределение напряжённости по поверхности оболочки и первичной обмотке

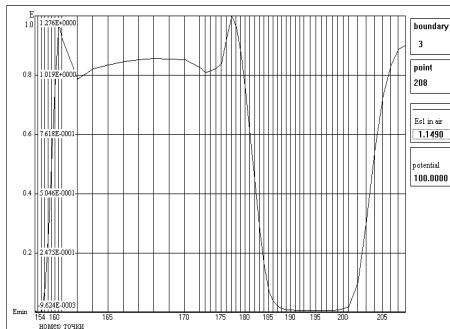


Рис.4. Распределение напряжённости по поверхности блока транспортного крепления

Как видно из рис.4, на верхней части блока транспортного крепления в месте наименьшего расстояния до оболочки напряжённость электрического поля равна 1.28 кВ/мм при 100 кВ соответствует амплитуде 11.37 кВ/мм при испытательном напряжении 630 кВ или 19.77 кВ/мм при 1550 кВ.

В результате расчетно-теоретических исследований выполнена проверка на электрическую прочность основных изоляционных промежутков. С помощью расчётов параметров электрического поля доказано, что при заданных геометрических размерах основные изоляционные промежутки обладают достаточным запасом электрической прочности. За счёт новых решений в конструкции трансформатора удалось снизить его стоимость по сравнению с вариантом маслонаполненного двухкаскадного трансформатора тока на тот же класс напряжения.

#### Библиографический список

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Том 3. СПб.: Питер, 2003. 377 с.
2. Рожкова Л.Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций: М.: Энергоатомиздат, 1987. 648 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАЗНОСТИ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ ЭЛЕКТРОЛИЗА ЦИНКА

магистрант Рыбачёнок М.А.<sup>1</sup>

д-р техн. наук, проф. Хохлов Ю.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

**Аннотация.** На основе результатов анализа электромагнитных процессов с целью повышения качественных показателей электрической энергии показана целесообразность повышения фазности выпрямительных агрегатов электролиза цинка. Приведены внешние и спектральные характеристики многофазных выпрямителей. Рекомендовано предельную фазность выпрямителей выбирать из условия сохранения основного режима работы агрегатов.

В электролизном производстве Челябинского цинкового завода в настоящее время эксплуатируются выпрямительные агрегаты, разработанные еще в восьмидесятые годы прошлого столетия. Постепенно назревает необходимость замены существующих агрегатов на более современные. Эффективность использования электрической энергии и качество технологического процесса электролиза цинка во многом определяются схемным решением и способом управления выпрямительными агрегатами. В данной работе рассматриваются пути построения оптимального схемного решения таких агрегатов.

Цель работы: исследование влияния фазности выпрямительных агрегатов на качественные показатели электрической энергии преобразовательной подстанции электролиза цинка.

Основную роль в определении схемного решения играет фазность преобразователя –  $p$ . Многофазные выпрямители строятся на основе использования последовательного и параллельного включения элементарных коммутирующих групп вентилей. Под коммутирующей будем понимать группу, вентили которой обмениваются всем или частью выпрямленного тока. Коммутирующие группы вентилей различаются числом фаз  $m$ . Теоретически величина  $m$  может принимать любые целочисленные значения в диапазоне  $2 \leq m \leq \infty$ . Примеры схем ряда

имеющих практическое значение коммутирующих групп приведены в работе [1].

В результате анализа электромагнитных процессов установлен спектр вентильного тока в коммутирующей группе произвольной фазности  $m$  (рис. 1).

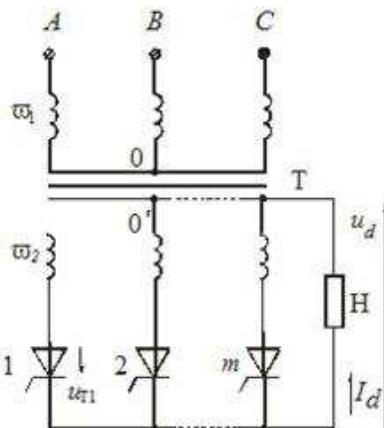


Рис. 1. Принципиальная схема коммутирующей группы вентилей

Из приведенных ниже соотношений следует, что только при  $m=3$  наряду с наиболее эффективным использованием обмоток преобразовательного трансформатора по отдаваемой ими в цепь выпрямленного тока мощности такая коммутирующая группа не порождает гармоник, кратные трем. Поэтому в работе рассматриваются многофазные выпрямительные агрегаты, построенные на основе коммутирующей группы с  $m=3$ . Пример схемы одного из вариантов СЭС с двадцатичетырехфазным выпрямителем приведен на рисунке (рис. 2).

Спектр вентильного тока произвольной коммутирующей группы имеет следующий состав [2]:

— постоянная составляющая

$$A_{B0*} = \frac{I_{d*}}{m}$$

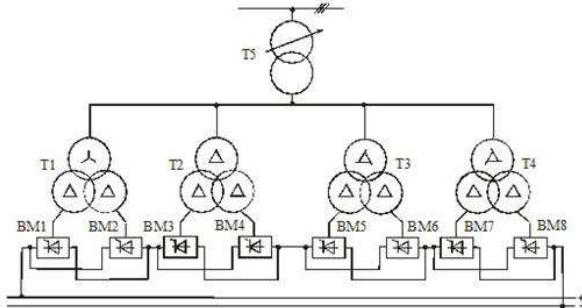


Рис. 2. Принципиальная схема СЭС с двадцатичетырехфазным агрегатом

– амплитуда синусной составляющей  $k$ -той гармоники

$$B_{Bk*} = \frac{2I_{d*}}{\pi k} \sin k \frac{\pi}{m} \left\{ \begin{array}{l} \sin k(\alpha + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{m}) \cos k \frac{\gamma}{2} + \\ + \frac{1}{2I_{d*}} \left[ \frac{k}{k-1} \cos[(k-1)(\alpha + \frac{\gamma}{2}) + k \frac{\pi}{m}] \sin(k-1) \frac{\gamma}{2} + \right. \\ \left. + \frac{k}{k+1} \cos[(k+1)(\alpha + \frac{\gamma}{2}) + k \frac{\pi}{m}] \sin(k+1) \frac{\gamma}{2} \right] - \\ - \frac{U_{d*}}{I_{d*}} \cos k(\alpha + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{m}) \sin k \frac{\gamma}{2} \end{array} \right\}$$

– амплитуда косинусной составляющей  $k$ -той гармоники

$$C_{Bk*} = \frac{2I_{d*}}{\pi k} \sin k \frac{\pi}{m} \left\{ \begin{array}{l} \cos k(\alpha + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{m}) \cos k \frac{\gamma}{2} - \\ - \frac{1}{2I_{d*}} \left[ \frac{k}{k-1} \sin[(k-1)(\alpha + \frac{\gamma}{2}) + k \frac{\pi}{m}] \sin(k-1) \frac{\gamma}{2} + \right. \\ \left. + \frac{k}{k+1} \sin[(k+1)(\alpha + \frac{\gamma}{2}) + k \frac{\pi}{m}] \sin(k+1) \frac{\gamma}{2} \right] + \\ + \frac{U_{d*}}{I_{d*}} \sin k(\alpha + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{m}) \sin k \frac{\gamma}{2} \end{array} \right\}$$

Амплитуда и начальная фаза  $k$ -той гармоники вентильного тока равны:

$$I_{Bmk*} = \sqrt{B_{Bk*}^2 + C_{Bk*}^2}, \quad \psi_{Bk} = \arctg \frac{C_{Bk*}}{B_{Bk*}}$$

С использованием спектра вентильного тока определены приводимые ниже спектральные характеристики двенадцатифазного (рис. 3) и двадцатичетырехфазного агрегатов (рис. 4).

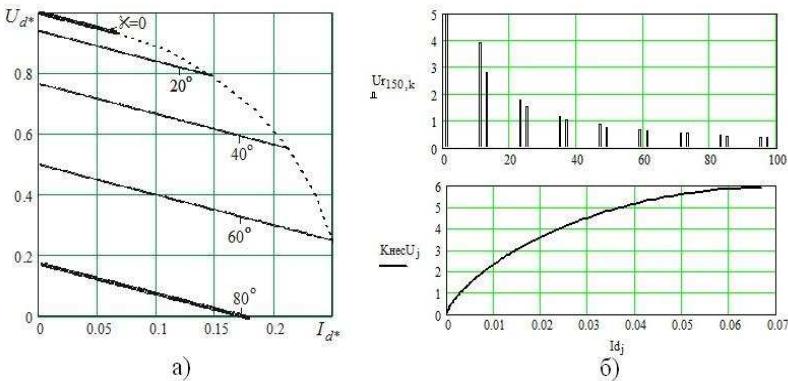


Рис.3. Внешние (а) и спектральные (б) характеристики двенадцатифазных выпрямительных агрегатов

**Выводы.** Из внешних и спектральных характеристик видно, что у двенадцатифазных выпрямителей область основного режима работы больше, чем у двадцатичетырехфазных агрегатов, однако спектр сетевого тока и напряжения содержит 11 и 13 гармоники, также коэффициент несинусоидальности напряжения имеет большее значение.

При определении схемы выпрямительных агрегатов электролиза цинка необходимо путем технико-экономического сравнения из условия сохранения основного режима работы агрегатов найти оптимальный вариант:

1) двенадцатифазные агрегаты с применением специальных фильтров и компенсирующих устройств, либо использованием специальных

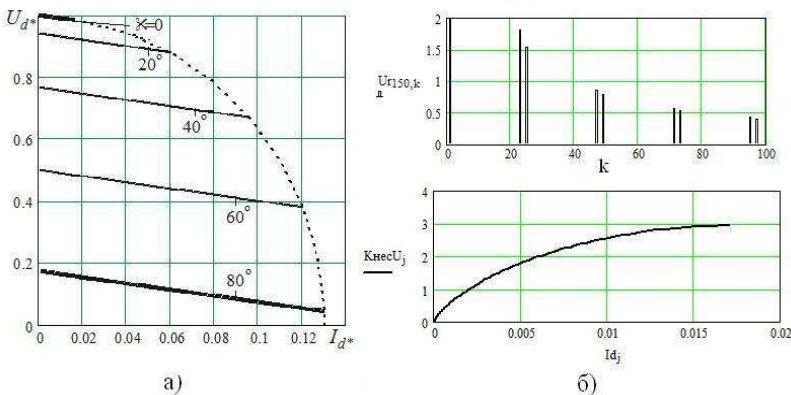


Рис.4. Внешние (а) и спектральные (б) характеристики двадцатичетырехфазных выпрямительных агрегатов

способов управления (векторное управление) с целью улучшения качественных показателей электроэнергии [3];

2) схемные решения на основе применения двадцатичетырехфазных выпрямительных агрегатов.

#### Библиографический список

1. **Хохлов Ю.И.** Основные и глубокие режимы работы многофазных симметричных некомпенсированных выпрямителей систем электроснабжения. – Челябинск: ЮУрГУ, 2014. 104 с.

2. **Хохлов Ю.И.** Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. Челябинск: ЧГТУ, 1995. 354 с.

3. **Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г.** Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 360 с.

# **ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ФОРСИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ОБМОТКАМИ**

д-р техн. наук, доц. **Свинцов Г.П.**

доц. **Зайцев Ю.М.**

канд. техн. наук, доц. **Руссова Н.В.**

аспирант **Михайлов А.В.**

аспирант **Никитина О.А.**

аспирант **Петров В.Н.**

аспирант **Сазанов Д.С.**

*Чувашский государственный университет*

*им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары*

**Аннотация.** Предложена методика проектного расчета форсированного электромагнита постоянного напряжения с последовательно соединенными низкоомной и высокоомной обмотками, размещенными коаксиально. Электромагнитный привод может быть выполнен на базе различной конфигурации магнитной системы. Последовательное подсоединение высокоомной обмотки к низкоомной обеспечивает наилучшее использование обмоточной меди в процессе рабочего цикла электромагнита. Определение наилучших соразмерностей в магнитной системе, обеспечивающих минимизацию частных критерииов оптимальности, рекомендовано проводить двухразовым сканированием выбранной области соразмерностей.

Форсированно управляемые электромагниты обеспечивают существенное снижение массы ферромагнитной стали и обмоточной меди (активных материалов), уменьшение габаритных и установочных размеров, потребляемой мощности. В настоящее время наиболее эффективными и компромиссными между стоимостью устройств управления и производственными, эксплуатационными расходами являются двухобмоточные схемы форсированного управления. Предпочтение [1] отдается схеме последовательного соединения низко- и высокоомной обмоток. Последняя из них шунтируется на определенное время (либо до достижения определенного положения якоря) форсировочным ключом.

Представляет практический интерес разработка общих положений методики проектного расчета форсированных электромагнитов с такой схемой управления, независимо от конфигурации магнитных систем (рис. 1).

Исходными данными для выполнения проектного расчета являются [2]:

- 1) кратности изменения характерных значений напряжения;
- 2) основные соразмерности магнитных систем;
- 3) математические модели:
  - тепловых характеристик:

$$f_1(x_i, q_B, \theta_{m^*})=0; f_2(x_i, q_B, \theta_{VB^*})=0; f_3(x_i, q_H, \theta_{VH^*})=0; \quad (1)$$

- электромагнитных характеристик  $f_4(x_i, \delta_i, B_o)$
- в параметрической форме:

$$P_{\text{эм}}=P_* P_{\text{баз}}; F=F_* F_{\text{баз}}; \quad (2)$$

- механических характеристик приводимого в движение механизма:

$$P_{\text{мх}}=f_5(\delta) \text{ или } M_{\text{мх}}=f_6(\phi), \quad (3)$$

где  $x_i$  – преобразованные (кодированные) значения геометрических соразмерностей, тепловых параметров, магнитной индукции;  $\theta_{m^*}$ ,  $\theta_{VB^*}$ ,  $\theta_{VH^*}$  – относительные функции максимальной температуры, среднеобъемной в толще высокомоментной обмотки, среднеобъемной в толще низкомоментной обмотки соответственно;  $P_*$ ,  $F_*$ ,  $\Psi_*$  – безразмерные функции электромагнитной и магнитодвижущей сил, потокосцепления;  $P_{\text{баз}}$ ,  $F_{\text{баз}}$ ,  $\Psi_{\text{баз}}$  – соответствующие им базисные значения [2].

Составляется условие срабатывания (4), отпускания (5) и теплового равновесия (6) магнитной системы [2]:

$$F_{\text{cp}} = \frac{U_{\text{cp}}}{R_{\text{H,r}}} N_H = \frac{K_{U \min} U_{\text{ном}} N_H}{K_{U \text{cp}} R_{\text{H,r}}}; \quad (4)$$

$$F_{\text{отп}} = \frac{U_{\text{отп}}}{R_{\text{H,x}} + R_{\text{B,x}}} (N_H + N_B) = \frac{K_{U \text{отп}} K_{\text{отп}} U_{\text{ном}}}{R_{\text{H,x}} + R_{\text{B,x}}} (N_H + N_B); \quad (5)$$

$$\theta_m = f_1(x_i, q_B). \quad (6)$$

Они представляют условия функционирования приводных электромагнитов контакторов [3]. Здесь обозначены:  $U_{\text{cp}}$ ,  $U_{\text{отп}}$ ,  $U_{\text{ном}}$  – напряжение срабатывания, отпускания и номинальное;  $F_{\text{cp}}$ ,  $F_{\text{отп}}$  – магнитодвижущие силы обмоток электромагнита при их срабатывании и

отпускании;  $K_{U_{cp}}$ ,  $K_{U_{отп}}$  – коэффициенты конструктивно-технологического запаса по напряжению срабатывания и отпускания;  $K_{отп}$  – отношение напряжения отпускания к номинальному;  $K_{U_{min}}$  – отношение минимального напряжения к его номинальному значению;  $R_{h,x}$ ,  $R_{v,x}$  – сопротивление низкоомной и высокоомной обмоток в «холодном» состоянии;  $N_h$ ,  $N_v$  – число витков низкоомной и высокоомной обмоток.

Основными размерами [4] любой из магнитных систем (рис. 1), в наибольшей степени влияющими на ее характеристики являются: диаметр сердечника ( $d_c$ ), высота ( $H_o$ ) обмотки, ее толщина ( $A_o$ ), получившими название [4] «ядро электромагнита». Отметим, что в этот перечень переменных можно было бы ввести координату ( $\phi$  или  $\delta$ ) положения якоря. Однако, она является известной к началу проектирования.

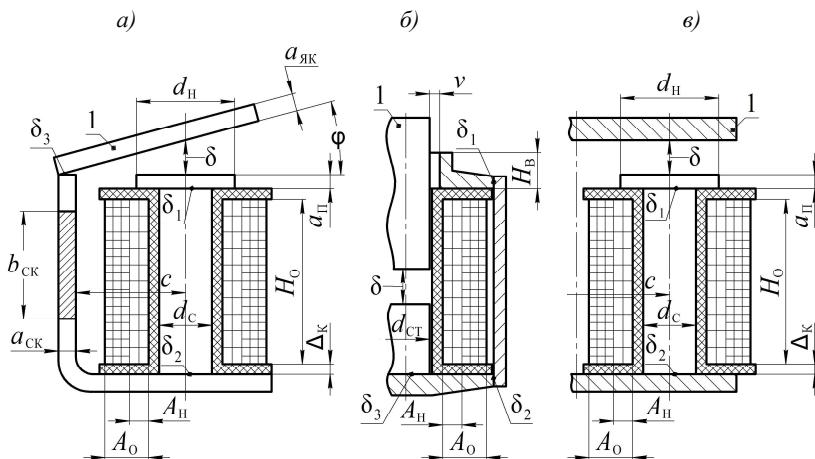


Рис. 1. Форсированные магнитные системы с коаксиально размещенными и последовательно соединенными обмотками

Общим, независимым от конфигурации магнитной системы (рис. 1) являются принятые соразмерности

$$H_{o*} = H_o/d_c; \quad A_{o*} = A_o/d_c; \quad d_{h*} = d_h/d_c.$$

В качестве допустимой температуры принимается максимальная температура ( $\theta_m$ ) в толще высокоомной обмотки (3). Учитывая, что

современные привода контакторов выполняются в закрытом корпусе, можно для описания их теплового состояния использовать выражение (6), полученное конечно-элементным моделированием тепловых характеристик в броневых магнитных системах.

Решая совместно (4) и (5), можно получить соотношения между количеством витков  $n = N_b/N_h$ .

Таким образом, преобразуя уравнения (4), (5), (6) совместно с уравнением баланса, потребляемой и рассеиваемой мощностей одним из численных методов определяется корень уравнения  $f(d_c) = 0$ , что равносильно решению задачи проектного расчета. При этом уточняется на каждом итерационном шаге среднеобъемная температура обмоток:  $f_2(x_i, \theta_{vb}^*) = 0$ ;  $f_3(x_i, \theta_{vh}^*) = 0$ .

Поскольку модели электромагнитных характеристик (2), (3) получены при  $\delta/d_c \geq 0,05$ , то при притянутом положении якоря эти характеристики описываются методами теории цепей при допущении, что магнитные потоки рассеяния отсутствуют, площади поперченного сечения сердечников, ярма (стопа) равны площади поперечного сечения якоря 1 (рис. 1) [5].

Магнитная индукция ( $B_{\delta k}$ ) при конечном значении рабочего воздушного зазора  $\delta_k \leq (0,0001 \div 0,0002)$  м может быть определена на основании равенства:

$$P_{mx,k} = \frac{B_{\delta k}^2 S_{\pi}}{2\mu_0} K_{\pi},$$

где  $S_{\pi}$  – площадь поперечного сечения полюса (рис.2) или полюсного наконечника (рис.1, а, в);  $K_{\pi}$  – число полюсов в магнитной системе. На основании последнего выражения при круглой форме полюсов

$$B_{\delta k} = \sqrt{\frac{2\mu_0 P_{mx,k}}{K_{\pi} S_{\pi}}},$$

где

$$S_{\pi} = \begin{cases} \pi d_h^2 / 4 & (\text{рис. 1, } a, \nu); \\ \pi d_{\pi}^2 / 4 & (\text{рис. 2}). \end{cases}$$

Для магнитной системы (рис.1, б)  $d_{\pi} = d_h = d_{ct}$ . Следовательно, одинаковы в них магнитные индукции ( $B$ ), напряженности ( $H$ ). Это упрощает составление выражения для  $F_{opt}$ . При этом удобно иметь

математически описанные [1] кривые намагничивания  $H = f(B)$  сталей, используемых для выполнения магнитопроводов [6].

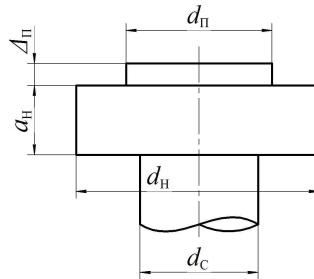


Рис. 2. Цилиндрический наконечник с цилиндрическим полюсом

Для определения  $F_{cp}$  необходимо на основании кривых намагничивания магнитных систем определить границу их линейности ( $B_r$ ). Тогда на основании (2):

$$P_{\text{эм.г}} = \frac{(B_r^2 \pi d_c^2)}{8\mu_0} P_*(x_i, \delta_{kp}, B_r).$$

Следовательно, если  $P_{\text{мх.кп}} \leq P_{\text{эм.г}}$ , то магнитная система линейна и магнитная индукция при срабатывании  $B_{cp}$ :

$$B_{cp} = \frac{1}{d_c} \sqrt{\frac{8\mu_0 P_{\text{мх.кп}}}{\pi P_*(x_i, \delta_{kp}, B_r)}},$$

$$F_{cp} = \frac{B_{cp} d_c}{\mu_0} F_*(x_i, \delta_{kp}, B_r).$$

При  $P_{\text{мх.кп}} > P_{\text{эм.г}}$  магнитная система нелинейна, то

$$F_{cp} = \frac{B_{cp} d_c}{\mu_0} F_*(x_i, \delta_{kp}, B_{cp}),$$

где  $B_{cp} > B_r$  и определяется как корень уравнения:

$$P_{\text{мх.кп}} - \frac{B_{cp}^2 \pi d_c^2}{8\mu_0} P_*(x_i, \delta_{kp}, B_{cp}) = 0.$$

Таким образом, общими алгоритмическими шагами решения задачи синтеза форсированных двухобмоточных электромагнитов, независящими от конфигурации магнитной системы, являются:

- 1) составление уравнения срабатывания, отпускания и теплового равновесия магнитной системы [7];
- 2) определение границы линейности магнитной системы (граничного значения электромагнитной силы) [8];
- 3) определение магнитодвижущей силы срабатывания и отпускания;
- 4) определение кратности числа витков высокоомной к низкоомной обмоток;
- 5) определение диаметра сердечника и основных соразмерностей в магнитной системе.

### **Библиографический список**

1. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. М.: Энергатомиздат, 1989. 160 с.
2. Методика синтеза форсированного клапанного электромагнита постоянного напряжения в схеме с балластным резистором / Ю.М. Зайцев, В.Н. Петров, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 103-112.
3. Методика синтеза форсированного броневого электромагнита постоянного напряжения с внедряющимся якорем в схеме с балластным резистором / Ю.М. Зайцев, И.П. Иванов, О.А. Никитина и др. // Вестник Чувашского университета. 2015. № 3. С. 52-61.
4. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока (Расчет и элементы проектирования). М.: Энергия, 1968. 158 с.
5. Коц Б.Э. Электромагниты постоянного тока с форсировкой. М.: Энергия, 1973. 180 с.
6. Расчет размеров, минимизирующих стоимость активных материалов, форсированного броневого электромагнита, управляемого по схеме с балластным резистором / О.А. Никитина, Н.В. Руссова, Г.П. Свинцов, В.А. Нестерин // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 156-161.
7. Электромагнитные механизмы. Анализ и синтез / Ю.А. Никитенко, Ю.А. Бахвалов, Н.И. Горбатенко, А.Г. Никитенко. М.: Высшая школа, 1998. 380 с.
8. Minimizing the Power Consumption of a Clapper-Type DC Electromagnet in Intermittent Operation / Yu.M. Zaitsev, I.P. Ivanov, O.A. Petrov et al. // Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86. No. 8. Pp. 474-478.

# **АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

ст. преп. Хазиева Р.Т.

магистрант Бочкарева Т.А.

Уфимский государственный нефтяной  
технический университет, г. Уфа

**Аннотация.** Устройства заряда емкостного накопителя, широко применяемые в нефтяной промышленности, оказывают неблагоприятное влияние на работу питающей сети, нефтяное оборудование и месторождения. Значительное количество аппаратуры на промысле не должно быть подвержено электромагнитным помехам. В статье приводится анализ электромагнитной совместимости индуктивно-емкостного преобразователя, входящего в состав электрогидроимпульсной очистительной системы, с питающей сетью.

В нефтяной промышленности широко применяются устройства заряда емкостного накопителя (УЗЕН) на основе индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП) для получения высоких значений энергетических показателей. УЗЕН представляют собой источники питания, работающие в импульсных режимах со звеном повышенной частоты, и влияют на работу сети, качество электрической энергии, нефтяное оборудование и месторождения.

Целью статьи является анализ работы УЗЕН электрогидроимпульсной очистки насосно-компрессорных труб (НКТ) с точки зрения создания им электромагнитных помех (ЭМП) и оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) с системами электроснабжения (СЭС) [1].

Источники вторичного электропитания (ИВЭП) УЗЕН содержат звенья повышенной частоты и функционируют в ключевых (импульсных) режимах, что приводит к росту ЭМП [2]. Нелинейные и периодические (импульсные) нагрузки, несинусоидальность (пульсация) ЭДС и нелинейность внутренних параметров источника и входных цепей потребителей искажают форму входного напряжения, приводят к увеличению тепловых потерь от токов высших гармоник, старению изоляции, увеличению массы фильтров блоков питания нагрузок, к возможности возникновения резонанса на высших гармониках [3].

УЗЕН используются в электрогидроимпульсной очистке насосно-компрессорных труб, на различных участках которых могут образовываться отложения (соли, минералы, парафины).

Принцип действия ИВЭП электрогидроимпульсной очистительной системы (ЭГОС) основан на работе автономного инвертора, коммутационный контур которого выполнен в виде многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК) [4]. Выполнение ЭГОС на основе МИЭК позволяет снизить массу, уменьшить габариты ИВЭП, а также обеспечить повышение качества электрической энергии за счет снижения уровня ЭМП и коэффициента несинусоидальности.

Рассмотрим блок-схему источника электропитания ЭГОС (рис. 1), который включает в себя следующие основные блоки:

- питающая сеть (ПС);
- трехфазный мостовой двухполупериодный выпрямитель (В);
- емкостный фильтр (Ф);
- автономный инвертор напряжения (АИН) с полностью управляемыми транзисторами;
- индуктивно-емкостный преобразователь на базе МИЭК, подключенный к первичной обмотке согласующего трансформатора (Т);
- высоковольтный выпрямительный столб (ВС);
- разрядная цепь (РЦ).

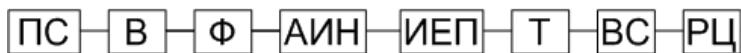


Рис. 1. Блок-схема ИВЭП ЭГОС с ИЕП на основе МИЭК

Для анализа работы УЗЕН зададимся следующими исходными данными:

- напряжение питающей сети 220 В;
- частота питающей сети 50 Гц;
- амплитуда напряжения на входе АИН ( $E_d$ ) 539 В.

Выходное напряжение АИН может принимать значения напряжения источника питания той или иной полярности и формируется в виде последовательности прямоугольных импульсов. Спектр такого напряжения насыщен высшими гармониками, которые нужно отфильтровать. Для оценки качества выходного напряжения АИН используют коэффициент гармоник по напряжению, равный отношению действующего значения напряжения высших гармоник к полному действующему значению напряжения на нагрузке:

$$K_{r,u} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{h(n)}^2}}{U_h} \cdot 100. \quad (1)$$

Разложение кривой выходного напряжения АИН в ряд Фурье приводит к выражению:

$$U_h = \frac{4 \cdot E_d}{\pi} \cdot \left( \cos(\omega \cdot t) + \frac{1}{3} \cdot \cos(3\omega \cdot t) + \dots + \frac{1}{n} \cdot \cos(n\omega \cdot t) \right) \quad (2)$$

Амплитуда основной гармоники:

$$U_{h,(1)}^{\max} = \frac{4 \cdot E_d}{\pi}. \quad (3)$$

Действующее значение основной гармоники:

$$U_{h,(1)} = \frac{U_{h,(1)}^{\max}}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Из разложения в ряд Фурье напряжения прямоугольной формы получим, что гармонический ряд содержит только нечетные гармоники, при этом амплитуды гармоник убывают пропорционально номеру гармоники  $n$  [5]. На рис. 2 представлен спектральный состав выходного напряжения АИН до 13 гармоники.

На рис. 3 представлен амплитудный спектр гармоник выходного напряжения АИН.

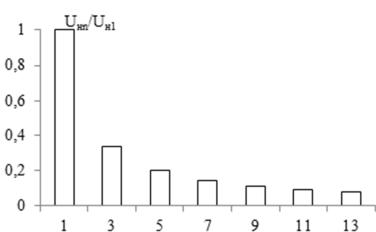


Рис. 2. Спектральный состав выходного напряжения АИН

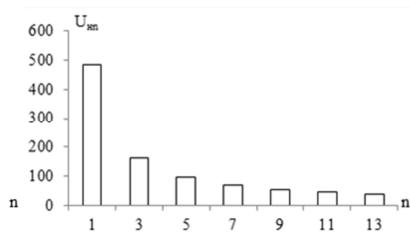


Рис. 3. Амплитудный спектр гармоник выходного напряжения АИН

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения определяется по выражению:

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{h,n}^2}}{U_{h,1}} \cdot 100, \quad (5)$$

где  $N$  – порядок последней из учитываемых гармонических составляющих напряжения.

Расчет по формулам, представленным выше, определил значения коэффициента гармоник по напряжению  $K_{r,u}=22,8\%$  и коэффициента искажения синусоидальности напряжения  $K_u=44,5\%$ . Приведенные показатели в значительной мере превышают нормы, установленные ГОСТ 13109-97.

В статье [6] представлены экспериментальные данные функционирования АИН на основе МИЭК. Результаты эксперимента показали, что уровни высших гармоник находятся в допустимых пределах, а коэффициент несинусоидальности ниже нормативного значения.

Таким образом, применение ИЕП на основе МИЭК в ЭГОС позволяет снизить уровень электромагнитных помех и несинусоидальность напряжения.

### **Библиографический список**

1. Efficiency and electromagnetic interference analysis of wireless power transfer for high voltage gate driver application / J. Pan, F. Qi, H. Cai, L. Xu // Energy Conversion Congress and Exposition. 2016. P. 1-5.
2. Li B., Mansson D. Effect of periodicity in frequency responses of networks from conducted EMI // Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2017. № 6. P.1-9.
3. Evaluation of electromagnetic interference of formation based on complex network / J. Ding, F. Li, J. Zhao, P. Zhao // 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science. 2016. P. 551-554.
4. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. The Research of Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters based on the Two-sections Hybrid Electromagnetic Elements // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines: Сб. докл. X междунар. IEEE науч.-технич. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. С. 1-7.
5. Попков О.З. Основы преобразовательной техники. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. – 200 с.
6. Electromagnetic compatibility of devices on hybrid electromagnetic components / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Р.В. Кириллов и др. // Journal «IOP Conference Series». 2017.

# **ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ ДЛЯ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**аспирант Хворостенко С.В.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** В статье описано применение теории подобия для частотного электропривода позволяющее переносить результаты исследовательской модели на объект подобия. На крупных промышленных предприятиях используется большое количество таких электроприводов различного назначения, экспериментальным исследованием которых невозможно оценить влияние на технологический процесс или исследование затруднено в следствии выполнения ими технологического задания. Для этого необходимо, на основании  $\pi$  – теоремы, составление критериев подобия разных по мощности частотных электроприводов, исследовательского и применяемого на промышленном предприятии.

Частотный электропривод представляет собой совокупность электромеханических устройств, включающий частотный преобразователь и асинхронный двигатель [1]. Использование таких устройств обеспечивает снижение потребляемой электроэнергии в зависимости от режима работы до 25 %. Наряду с оптимизацией и повышением качества выполнения технологического процесса, такие электроприемники являются причиной высших гармоник тока и напряжения генерируемых в энергосистему предприятия [2]. Для определения степени влияния несинусоидального режима на питающую систему электроснабжения для таких электроприемников необходимо проведение экспериментальных исследований по электромагнитной совместимости [3].

Сложность такого эксперимента заключается в невозможности исследования каждого частотного электропривода и допустимого изменения его режима работы. Для проведения исследований при различных режимах работы применяемых электроприводов, необходима разработка критериев подобия сложных систем для электропривода меньшей мощности, находящегося в определенном соответствии с промышленным электроприводом. С этой целью необходима разработка критериев подобия частотного электропривода для возможности переноса полученных характеристик с исследовательского объекта на объект–промышленности.

Цель работы заключается в разработке критериев подобия и масштабных коэффициентов различных по мощности частотных электроприводов.

Теория подобия и разработанные с помощью её критерии дают возможность установить наличие подобия сложных систем или позволяют разработать способы его получения в виде масштабных соотношений, сложных функциональных зависимостей групп параметров сопоставляемых объектов. Критерии подобия – установление соответствие между сравниваемыми объектами и процессами, происходящими в них, при котором функции объектов известны, а математические описания допускают их преобразования к тождественному виду [4].

Для составления  $\pi$  – критериев, согласно первому дополнительному положению о подобии сложных систем, для определения подобия частотного электропривода, применим метод структурного моделирования, на основании которого можно выделить отдельные подсистемы: автономный инвертор напряжения (АИН), неуправляемый выпрямитель (НВ), LC-фильтр (ПЗПТ) и асинхронный двигатель (АД). Запишем обобщенную систему скалярных уравнений каждого элемента двухзвенного преобразователя частоты в системе подвижных координат  $[u; v]$ , являющиеся основополагающей для объекта-оригинала. Такая система координатных осей при  $\omega_k=0$ , используется для описания процессов в электроприводах, в которых выходное напряжение полупроводникового преобразователя частоты несинусоидальное, также ток в фазе совпадает с осью  $u$ , и всегда соответствует реальному фазному току [5].

Система уравнений (3-6), где каждый элемент подсистемы записан со штрихом, будут относится к модели подобия. На основе дополнительного положения о подобии сложных систем, состоящих из подсистем, и используя правило Фурье, определим  $\pi$  – критерии, используя приведение уравнений к безразмерному виду с помощью интегральных аналогов [6]. При этом сопоставляемые процессы в объекте-оригинале и объекте-подобия подобны, поэтому между их подобного рода параметрами должны существовать соотношения соразмерности, пример для третьего уравнения (5):

$$\begin{aligned} i_c &= m_{i_c} \cdot i_c'; \\ i_e &= m_{i_e} \cdot i_e'; \\ i_u &= m_{i_u} \cdot i_u', \end{aligned} \tag{1, 2}$$

где  $m_i$  – масштабные коэффициенты.

### Уравнения АИН

$$f_u = \frac{u_u^*}{2 \cdot U_0}, f_v = \frac{u_v^*}{2 \cdot U_0}, \\ u_{uu} = u_u \cdot f_u, u_{uv} = u_u \cdot f_v, i_u = \frac{3}{2}(i_{lu} \cdot f_u + i_{lv} \cdot f_v); \quad (3)$$

### Уравнения HB

$$u_u = u_{bu}, u_v = u_{bv}, f_{bu} = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cos \theta_i, f_{bv} = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \sin \theta_i, \\ u_b = \frac{3}{2}(u_{bu} \cdot f_{bu} + u_{bv} \cdot f_{bv}), i_u = i_b \cdot f_{bu}, i_v = i_b \cdot f_{bv}; \quad (4)$$

### Уравнения ПЗПТ

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{u_b - u_u}{L_{pb}}, \frac{du_u}{dt} = \frac{i_c}{C_{ob}}, i_c = i_b - i_u; \quad (5)$$

### Уравнения АД

$$u_{lu} = \frac{d\psi_{lu}}{dt} - \omega_k \psi_{lv} + R_l i_{lu}, u_{lv} = \frac{d\psi_{lv}}{dt} - \omega_k \psi_{lu} + R_l i_{lv}, J \frac{d\omega_2}{dt} = M - M_c, \\ 0 = \frac{d\psi_{2u}}{dt} - \omega_k \psi_{2v} - \omega_3 \psi_{2v} + R_2 i_{2u}, 0 = \frac{d\psi_{2v}}{dt} + \omega_k \psi_{2u} - \omega_3 \psi_{2u} + R_2 i_{2v}, \quad (6) \\ M = \frac{3}{2} p_n \psi_{0u} i_{lv} - \frac{3}{2} p_n \psi_{0v} i_{lu};$$

где  $u_u^*$ ,  $u_v^*$  – задающие воздействия;  $f_u$ ,  $f_v$  – индекс модуляции;  $U_0$  – амплитуда опорного напряжения;  $u_u$  – напряжение блока питания инвертора;  $i_u$  – усредненный ток инвертора;  $u_{uu}$ ,  $u_{uv}$  – усредненные выходные напряжения инвертора;  $i_{lu}$ ,  $i_{lv}$  – усредненные выходные токи инвертора;  $u_u$ ,  $u_v$ ,  $i_u$ ,  $i_v$  – преобразованные гармоники напряжений на силовом входе HB и токов сети;  $f_{bu}$ ,  $f_{bv}$  – преобразованные гармоники коммутационных функций HB;  $\theta_i$  – угол поворота результирующего вектора тока сети, относительно оси фазы А напряжения сети;  $u_b$ ,  $i_b$  – напряжение и ток на выходе HB;  $L_{pb}$  – индуктивность сглаживающего реактора LC-фильтр;  $C_{ob}$  – емкость конденсаторной батареи ПЗПТ;  $i_c$  – ток кон-

денсатора ПЗПТ;  $u_{Iu}$ ,  $u_{Iv}$ ,  $i_{Iu}$ ,  $i_{Iv}$ ,  $\psi_{Iu}$ ,  $\psi_{Iv}$  – соответственно преобразованные напряжения токи и полные потокосцепления обмотки статора;  $i_{2u}$ ,  $i_{2v}$ ,  $\psi_{2u}$ ,  $\psi_{2v}$  – преобразованные токи и полные потокосцепления обмотки ротора;  $\psi_{0u}$ ,  $\psi_{0v}$  – главное потокосцепление;  $p_n$  – число пар полюсов.

Критерии подобия частотного электропривода (по правилу интегральных аналогов) получены путем приведения уравнений к безразмерному виду:

- для системы уравнений АИН:  $\pi_1 = \frac{0.5 \cdot u_u^*}{U_0 \cdot f_u}$ ;  $\pi_2 = \frac{0.5 \cdot u_v^*}{U_0 \cdot f_v}$ ;

$$\pi_4 = \frac{u_u \cdot f_v}{u_{Iu}}; \quad \pi_5 = \frac{1.5 \cdot i_{Iu} \cdot f_u}{i_u}; \quad \pi_6 = \frac{1.5 \cdot i_{Iv} \cdot f_v}{i_v}; \quad (7-11)$$

- для системы уравнений НВ:  $\pi_7 = \frac{u_{Bu}}{u_u}$ ;  $\pi_8 = \frac{u_{Bv}}{u_v}$ ;

$$\pi_9 = \frac{1.103 \cdot \cos \theta}{f_{Bu}}; \quad \pi_{10} = \frac{1.103 \cdot \sin \theta}{f_{Bv}}; \quad \pi_{11} = \frac{1.5 \cdot u_{Bu} \cdot f_{Bu}}{u_B};$$

$$\pi_{12} = \frac{1.5 \cdot u_{Bv} \cdot f_{Bv}}{u_B}; \quad \pi_{13} = \frac{i_B \cdot f_{Bu}}{i_u}; \quad \pi_{14} = \frac{i_B \cdot f_{Bv}}{i_v}; \quad (12-19)$$

- для системы уравнений ПЗПТ:  $\pi_{15} = \frac{u_B \cdot t}{L_{p\phi} \cdot i_B}$ ;  $\pi_{16} = \frac{u_u \cdot t}{L_{p\phi} \cdot i_B}$ ;

$$\pi_{17} = \frac{i_c \cdot t}{C_{6\phi} \cdot u_u}; \quad \pi_{19} = \frac{i_u}{i_c}; \quad \pi_{18} = \frac{i_B}{i_c}; \quad (20-24)$$

- для системы уравнений АД:  $\pi_{20} = \frac{\Psi_{1u}}{R_1 i_{1u} t}$ ;  $\pi_{21} = \frac{u_{1u}}{R_1 i_{1u}}$ ;

$$\pi_{22} = \frac{\Psi_{1v}}{R_1 i_{1v} t}; \quad \pi_{23} = \frac{u_{1v}}{R_1 i_{1v}}; \quad \pi_{24} = \frac{\Psi_{2u}}{R_2 i_{2u} t}; \quad \pi_{25} = \frac{\omega_2 \Psi_{2v}}{R_2 i_{2v}};$$

$$\pi_{26} = \frac{\Psi_{2v}}{R_2 i_{2v} t}; \quad \pi_{27} = \frac{\omega_2 \Psi_{2u}}{R_2 i_{2u}}; \quad \pi_{28} = \frac{P_n \Psi_{0u} i_{1u}}{M}; \quad \pi_{29} = \frac{P_n \Psi_{0v} i_{1u}}{M};$$

$$\pi_{30} = \frac{J \omega_2}{Mt}; \quad \pi_{31} = \frac{M_c}{M}. \quad (25-36)$$

Подобие процессов в оригинале и подобии означает, что они, имея качественно одинаковый характер и различаясь лишь масштабами, должны описываться одинаковыми математическими уравнениями. Очевидно, что объект-подобия также будет описывать процессы в частотном электроприводе – в том случае, если будут равны отношения масштабных коэффициентов при сопутствующих членах однородного уравнения, пример для (20-24):

$$\begin{aligned} I_{\pi 1} &= \frac{u_{\text{в}} \cdot t \cdot L'_{\text{пф}} \cdot i'_{\text{в}}}{u'_{\text{в}} \cdot t' \cdot L_{\text{пф}} \cdot i_{\text{в}}} = 1; \quad I_{\pi 2} = \frac{u_{\text{и}} \cdot t \cdot L'_{\text{пф}} \cdot i'_{\text{в}}}{u'_{\text{и}} \cdot t' \cdot L_{\text{пф}} \cdot i_{\text{в}}} = 1; \\ I_{\pi 3} &= \frac{i_{\text{c}} \cdot t \cdot C'_{\text{бф}} \cdot u'_{\text{и}}}{i'_{\text{c}} \cdot t' \cdot C_{\text{бф}} \cdot u_{\text{и}}} = 1; \quad I_{\pi 4} = \frac{i_{\text{в}} \cdot i'_{\text{c}}}{i'_{\text{в}} \cdot i_{\text{c}}} = 1; \quad I_{\pi 5} = \frac{i_{\text{и}} \cdot i'_{\text{c}}}{i'_{\text{и}} \cdot i_{\text{c}}} = 1. \end{aligned} \quad (37-41)$$

где параметры, записанные со штрихом, относятся к модели-подобия.

Особенностью подобия таких сложных систем как частотный электропривод, состоящих из подсистем НВ, ПЗПТ, АИН и АД, соответственно подобных в отдельности, как для исследовательского электропривода, так и объекта-промышленности, необходимо равенство критерии подобия этих подсистем (7-41), которые составлены из параметров (3-6), общих для этих подсистем.

### Библиографический список

- 1. Виноградов А. А., Зябкина О. Н., Михайлова М. Ю.** Анализ показателей качества электрической энергии в системе электроснабжения Лебединского горно-обогатительного комбината в Белгородской области // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №. 3. С. 175-180.
- 2. Авербух М.А., Прасол Д.А., Хворостенко С.В.** Экспериментальное исследование несинусоидальных режимов цеховой системы электроснабжения при динамическом вибрационном формировании бетонных смесей // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 24-31.
3. Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в электроустановках промышленных предприятий / М.А. Авербух, В.А. Кузнецов, Д.Н. Коржов и др. // // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 5. С. 203-208.
4. Josef Kuneš Similarity and Modeling in Science and Engineering. Czech Republic: Springer, 2012. 49 р.
- 5. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н.** Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. 256 с.
- 6. Веников В.А.** Теория подобия и моделирования (для энергетики); Изд. 4-е, доп. и перераб. М.: ЛИБРОКОМ, 2014. 479 с.

# **ВИТКОВЫЕ ЗАМЫКАНИЯ ОБМОТКИ ФАЗЫ СТАТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

канд. техн. наук, доц. Чигвинцев С.В.  
аспирант Ишмухамедов И.К.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

**Аннотация.** Разработка защит обмотки статора высоковольтных электродвигателей от витковых замыканий позволяет избежать серьезных повреждений: разрушение обмотки и стали статора. При этом самые чувствительные токовые отсечки и дифференциальные защиты высоковольтных электродвигателей не реагируют на витковые замыкания. В статье приведено описание разрабатываемого устройства для защиты высоковольтных электроустановок, а так же обоснование возможности построения на основе данного устройства защит от витковых замыканий.

Витковым называют замыкание одного или нескольких витков в одной из фаз трехфазной обмотки статора электродвигателя (ЭД). Витковые повреждения встречаются довольно редко, если они не связаны с истиранием изоляции посторонним предметом, и, как правило, являются результатом развития замыкания на корпус, местных перегревов изоляции, дефектов активной стали статора или следствием пробоя фазы статора на корпус [1].

Витковые замыкания (ВЗ) являются опасным видом повреждения и характеризуются протеканием больших токов в замкнувшихся витках при незначительном изменении тока в неповрежденной части обмотки [2]. В отличие от многофазных коротких замыканий (КЗ), ВЗ могут иметь место только в корпусе электродвигателя. Витковые замыкания в обмотках машин переменного тока, как показывает практика, составляют 80...85% всех повреждений [3].

Релейная защита (РЗ) должна с достаточной чувствительностью и быстродействием реагировать на внутренние повреждения. Так как обычно защита реагирует на параметры подводимого тока, то необходимо иметь надежные методы расчета токов в ЭД, параметров двигателя и др. Полученные значения токов дают возможность провести сопоставительный анализ различных принципов выполнения устройств РЗ двигателей и определить их уставки и времена срабатывания [4]. ВЗ обмоток статора ЭД могут привести к серьезным повреждениям электродвигателя. Это определяет целесообразность приме-

нения защит от ВЗ для обнаружения их на ранней стадии развития с целью уменьшения объема разрушения обмотки и стали статора ЭД.

Экспериментальные исследования установили, что КЗ всего 3...5% витков одной фазы обмотки статора ЭД приводит к недопустимому с точки зрения критической температуры изоляции перегреву, вызывающему разрушение изоляции [5].

Одной из основных причин возникновения ВЗ является превышение нагрузки на ЭД выше установленной нормы. Обмотка статора нагревается, разрушая изоляцию, вследствие чего происходит замыкание между витками обмоток [5].

Замкнутые витки образуют короткозамкнутый контур. В таком контуре протекает ток короткого замыкания под действием ЭДС, наведенной в замкнутых витках магнитным полем ротора и врачающимся магнитным полем статора. В остальной части поврежденной обмотки, а также в двух других фазах токи протекают под действием приложенного напряжения сети. Токи в неповрежденных фазах и неповрежденной части обмотки с витковым замыканием изменяются. Степень их изменения зависит от числа замкнувшихся витков.

Ток в короткозамкнутом контуре повышает температуру замкнутой части обмотки и приводит к локальному повышению температуры магнитопровода. В конечном итоге это может привести к разрушению изоляции обмотки и расплавлению стали магнитопровода. Поэтому электродвигатель необходимо защищать от витковых замыканий. Однако разработка защит от витковых замыканий затруднена тем, что, во-первых, витковое замыкание может незначительно изменять фазные токи, потребляемые двигателем из сети. При этом наиболее распространенные для защиты электродвигателя от КЗ токовые отсечки не способны защищать двигатель от ВЗ. Во-вторых, токи в поврежденной обмотке со стороны сети и токи со стороны нейтрали равны между собой. Поэтому дифференциальная защита, самая чувствительная из всех токовых защит, реагирующая на разность этих токов, не может выявлять витковые замыкания [3].

Для низковольтных электродвигателей вследствие локального повышения температуры статора целесообразно использовать защиту, построенную на контроле температуры статора. Но для высоковольтных электродвигателей данный метод нельзя использовать вследствие большей величины постоянной нагрева стали двигателя по сравнению со временем развития повреждения. Нагрев статора будет происходить

в течение длительного промежутка времени, что приведет уже к развитию ВЗ в междуфазное витковое замыкание или более опасное КЗ.

Цель работы заключается в рассмотрении возможности реагирования на витковые замыкания разрабатываемого устройства на основе трехфазного датчика тока высоковольтных электроустановок.

Авторами был получен патент на полезную модель «Устройство для балансной защиты высоковольтных электроустановок», которое состоит из трех проводников коаксиального типа, расположенных на одинаковом расстоянии от сенсора магнитного поля. К токоведущей жиле проводников коаксиального типа подключены вводные, а к внешнему проводнику подключены обратные кабели от электроустановки [6]. При симметричном режиме магнитное поле в центре устройства для балансной защиты высоковольтных электроустановок будет равно нулю в отличие от аварийного режима. Данная защита будет реагировать на междуфазные замыкания [7]. Улучшенная авторами защита от внутрифазных и междуфазных ВЗ построена на трехфазном датчике тока, позволяющем выявлять отклонение врачающегося магнитного поля трехфазной электроустановки от кругового [8].

В нормальном режиме работы электродвигатель представляет симметричную трехфазную нагрузку, а при витковых замыканиях нагрузка становится несимметричной и появляются токи обратной последовательности. Это приводит к превращению кругового врачающегося магнитного поля в эллиптическое [9].

При ВЗ фазы токов неповрежденных фаз смещаются на одинаковый угол. Ток в поврежденной фазе смещается по фазе в противоположную сторону относительно неповрежденных фаз [2]. Вследствие этого нарушается симметрия трехфазной системы электроустановки и врачающееся магнитное поле в центре трехфазного датчика тока становится эллиптическим, что регистрируется магниточувствительным элементом.

Выводы:

– защита от витковых замыканий позволяет избежать серьезных повреждений электродвигателя, таких как разрушение обмотки или стали статора;

– токовые отсечки и дифференциальные защиты ЭД не реагируют на витковые замыкания вследствие незначительного увеличения фазных токов при небольшой доле замкнутых витков;

– устройство трехфазного датчика тока позволяет построить защиту от витковых замыканий за счет выявления эллиптического вращающегося магнитного поля.

### Библиографический список

1. Алексеев В.Ю., Зайнитдинова Р.А., Путинцева А.А. Уравнения фазных токов при витковых замыканиях в обмотке статора асинхронного двигателя при круговом поле // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). Уфа: Издательство УГНТУ, 2016. С. 193–204.
2. Зайнитдинова Р.А., Пономарева В.В., Шабанов В.А. Расчет фазных токов при витковых замыканиях с учетом влияния несимметрии токов на главный магнитный поток асинхронного двигателя // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). Уфа: Издательство УГНТУ, 2016. С. 249–262.
3. Корогодский В.И. и др. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 242 с.
4. Определение наличия витковых замыканий электромагнитным способом [Электронный ресурс]. URL: [http://studopedia.ru/6\\_72672\\_opredelenie\\_nalichiy-vitkovih-zamikaniy-elektromagnitnim-sposobom.html](http://studopedia.ru/6_72672_opredelenie_nalichiy-vitkovih-zamikaniy-elektromagnitnim-sposobom.html).
5. Чмыхалов Г.Н. Исследование режимов и разработка устройств релейной защиты электродвигателей собственных нужд электрических станций: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (13.03.02). Новочеркасск: НПИ, 1982. 22 с.
6. Патент на полезную модель № 168753. Устройство для балансной защиты высоковольтных электроустановок / С.В. Чигвинцев, И.К. Ишмухамедов, опубл. 17.02.2017. Бюл. № 5.
7. Ишмухамедов И.К., Колесникова О.И. Multiphase short circuits protection of high-voltage electrical plants // 68-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: сб. мат. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. С. 378.
8. Чигвинцев С.В., Ишмухамедов И.К. Трехфазный датчик тока и напряжения // Нефтегазовое дело. 2016. Том 14, № 1. С. 200–205.
9. Чигвинцев С.В., Ишмухамедов И.К. Конечно-элементный анализ магнитного поля трехфазных устройств // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). Уфа: Издательство УГНТУ, 2016. С. 369–377.

# **ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ШТРАФНЫХ ФУНКЦИЙ**

магистрант Юдин А. А.

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию алгоритма оптимизации установленных режимов электроэнергетических систем и сетей по напряжению и реактивной мощности, основанного на применении метода штрафных функций. Результаты исследования иллюстрируются на примере 14-узловой тестовой расчетной схемы. На основании анализа результатов расчета сделаны выводы об эффективности указанного алгоритма для оптимизации режимов сложнозамкнутых сетей.

В настоящее время при управлении режимами электроэнергетических систем и сетей основное внимание уделяется обеспечению надежного снабжения потребителей электрической энергией необходимого качества в соответствии с Правилами устройства электроустановок, межгосударственным стандартом ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» и другими нормативными документами. Однако не менее важной задачей является минимизация затрат [1], связанных с обеспечением функционирования электроэнергетических систем и технологических процессов производства, преобразования, распределения и потребления электрической энергии [2], которая приобретает особое значение после принятия в 2009 году Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Так, например, в методике расчета сетевых тарифов основное внимание уделяется распределению затрат электросетевых компаний по классам напряжения, определению потерь электроэнергии и мощности и распределению их между электрическими станциями и потребителями для формирования цен. Рассматриваемые вопросы особенно актуальны для энергетической отрасли с учетом новых условий ее рыночного функционирования и применения современных информаци-

онных технологий [3]. Следовательно, изучение алгоритмов определения оптимальных установившихся режимов, то есть таких допустимых по техническим ограничениям режимов, при которых целевая функция оптимизации принимает наименьшую величину, имеет важное практическое и теоретическое значение.

Целью данной работы является исследование алгоритма оптимизации электроэнергетических режимов по напряжению и реактивной мощности, основанного на применении метода штрафных функций [3].

Оптимизация режима по напряжению и реактивной мощности используется для определения напряжений в узлах электрической сети, которые являются источниками реактивной мощности. Чаще всего источники реактивной мощности применяются для снижения потерь активной мощности и поддержания напряжения в требуемых пределах [4]:

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}, \quad (1)$$

где  $U_i$  –  $i$ -е контролируемое значение напряжения;

$U_{i\min}$ ,  $U_{i\max}$  – минимальное и максимальное контролируемые значения напряжения.

Учет ограничений-неравенств в значительной степени усложняет оптимизационный расчет. С развитием компьютерной техники для решения оптимизационных задач широкое применение находят методы нелинейного программирования. Рассмотрим один из таких методов, который реализован в программно-вычислительном комплексе RastrWin3, предназначенном для решения задач по расчету, анализу и оптимизации режимов электроэнергетических систем и сетей [4].

Также необходимо отметить, что указанный программно-вычислительный комплекс позволяет выполнять оптимизацию не только по напряжению и реактивной мощности, но и по коэффициентам трансформации регулируемых трансформаторов и автотрансформаторов. В данной работе эта особенность не рассматривается.

Расчет режима в допустимой области соответствует нахождению минимума целевой функции:

$$\Psi = \Delta P + \Sigma \mathcal{W}_i = \Sigma \Delta P_{ij} + K_{\Psi} \Sigma \delta U_i^2, \quad (2)$$

где  $\Delta P$  – суммарные потери активной мощности;

$\mathcal{W}_i$  – штрафные функции, которые вводятся при нарушении ограничений (1) по напряжениям в узлах;

$\Delta P_{ij}$  – потери активной мощности в ветви  $i-j$ ;

$K_{ш}$  – штрафной коэффициент, значение которого подбирается эмпирическим способом;

$\delta U_i$  – нарушение ограничений (1) по напряжениям в узлах, которое определяется следующим образом:

$$\delta U_i = (U_i - U_{i\max})/U_{i\max}, \text{ если } U_i > U_{i\max};$$

$$\delta U_i = 0, \text{ если } U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max};$$

$$\delta U_i = (U_i - U_{i\min})/U_{i\min}, \text{ если } U_i < U_{i\min}.$$

Потери активной мощности в ветви схемы можно рассчитать на основании значений модулей  $U_i$ ,  $U_j$  и углов  $\delta_i$ ,  $\delta_j$  напряжения в начале и конце ветви  $i-j$  соответственно:

$$\Delta P_{ij} = (U_i^2 + U_j^2 + 2U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j)) G_{ij},$$

где  $G_{ij}$  – активная проводимость ветви  $i-j$ .

Нахождение минимума целевой функции (2) производится путем изменения модулей напряжения и реактивной мощности генерирующих узлов – источников реактивной мощности:

$$Q_{ri\min} \leq Q_{ri} \leq Q_{ri\max}; \quad (3)$$

$$U_{ri\min} \leq U_{ri} \leq U_{ri\max}. \quad (4)$$

Оптимальные значения напряжения  $U_{ri}$ , которые являются независимыми переменными, определяются в результате итерационного процесса.

На каждом шаге итерационного процесса находятся следующие величины:

1. Допустимое направление наибольшего убывания целевой функции (2):

$$\Delta S = \Delta U_r.$$

2. Направление изменения зависимых переменных ( $\Delta Q$ ,  $\Delta U$ ,  $\Delta \delta$ ) при изменении независимых переменных в направлении  $\Delta S$ .

3. Из условий, определяемых неравенствами (1), (3), (4), вычисляется наибольший допустимый шаг  $\lambda_{\text{доп}}$  в направлении  $\Delta S$ .

4. Вычисляются значения функции  $\Psi$  в следующих точках:  $\Psi(S)$ ,  $\Psi(S + (\lambda_{\text{доп}}/2)\Delta S)$ ,  $\Psi(S + \lambda_{\text{доп}}\Delta S)$ . Находится  $\lambda_{\text{опт}}$ , который соответствует наименьшему значению функции  $\Psi$  на отрезке  $[0; \lambda_{\text{доп}}]$ . Если  $\lambda_{\text{опт}} = 0$ , то производится деление шага  $\lambda_{\text{доп}}$  пополам и на новом отрезке снова

определяется  $\lambda_{\text{опт}}$ . Количество повторений процедуры деления шага не превышает заданного числа, и если  $\lambda_{\text{опт}}$  останется равным нулю, то оптимизация прекращается.

5. Если ограничением шага послужило одно из ограничений (то есть  $\lambda_{\text{опт}} = \lambda_{\text{доп}}$ ), производится смена набора независимых переменных.

6. Новые значения переменных  $S' = S + \lambda_{\text{доп}}\Delta S$ .

7. Определяются небалансы мощности, и, в зависимости от их величины, рассчитывается новый установившийся режим.

Оптимизация заканчивается, если снижение потерь между соседними итерациями с номерами  $k$  и  $(k+1)$  и значение штрафной составляющей не превышают заданных величин  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ :

$$|(\Delta P_{(k+1)} - \Delta P_k)/\Delta P_k| \leq \varepsilon_1;$$

$$|(\mathcal{W}_{(k+1)} - \mathcal{W}_k)/\mathcal{W}_k| \leq \varepsilon_2.$$

Рассмотрим применение данного алгоритма на видоизмененной 14-узловой тестовой расчетной схеме IEEE [5], приведенной на рис. 1, номинальные напряжения узлов которой составляют 220 и 110 кВ. В данной схеме узел № 1 принят за балансирующий и базисный, узлы № 2, 3, 6, 8 – генерирующие, представляют собой источники реактивной мощности, параметры которых могут быть оптимизированы. Значения параметров режима до оптимизации приведены на рис. 1.

Диапазоны изменения реактивной мощности генерирующих узлов принимаются на основании имеющихся данных о возможностях регулирования реактивной мощности в узлах электрической сети. В соответствии с ГОСТ 32144-2013 положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю. Таким образом, минимальным и максимальным допустимыми пределами изменения напряжения в рассматриваемой схеме являются значения 198 и 242 кВ (номинальное напряжение 220 кВ), 99 и 121 кВ (номинальное напряжение 110 кВ).

Оптимизация электроэнергетического режима выполняется в программно-вычислительном комплексе RastrWin3 в соответствии с приведенным выше алгоритмом. Результаты расчета оптимальных значений реактивной мощности и напряжения в узлах электрической сети представлены в табл. 1.

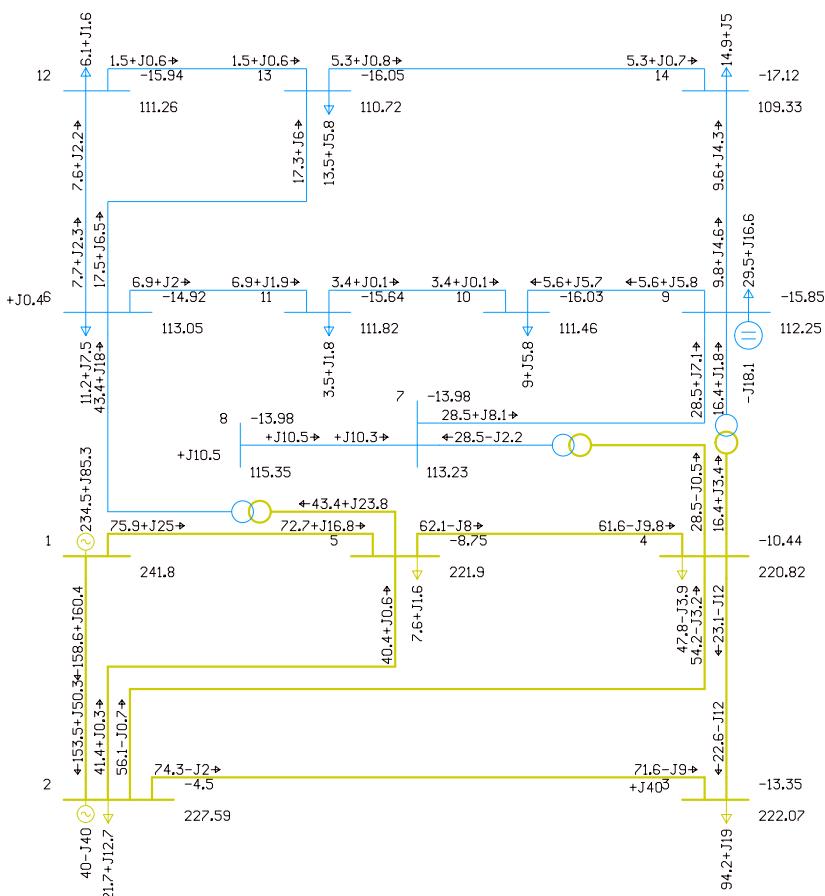


Рис. 1. Тестовая 14-узловая расчетная схема для анализа алгоритма оптимизации в программно-вычислительном комплексе RastrWin3

Потери активной мощности в ветвях рассматриваемой схемы до оптимизации в сети 220 кВ составили 14,86 МВт, в сети 110 кВ – 0,62 МВт. Потери активной мощности в ветвях рассматриваемой схемы после оптимизации в сети 220 кВ составили 13,14 МВт, в сети 110 кВ – 0,58 МВт. Таким образом, в целом по тестовой схеме потери снизились на 11,37 % по сравнению с исходным вариантом. Для расчета оптимального режима потребовалось две итерации.

Таблица 1

Результаты оптимизации установившегося режима электрической сети

Номер узла	$U_{\text{ном}}, \text{kV}$	$U_{\min}, \text{kV}$	$U_{\max}, \text{kV}$	$U, \text{kV}$	$Q_{\min}, \text{Mvar}$	$Q_{\max}, \text{Mvar}$	$Q_r, \text{Mvar}$
1	220	198	242	241,80	—	—	-9,4
2	220	198	242	238,07	-40,0	50,0	44,8
3	220	198	242	230,49	0,0	40,0	30,0
4	220	198	242	230,88	—	—	—
5	220	198	242	231,47	—	—	—
6	110	99	121	121,00	-6,0	24,0	13,1
7	110	99	121	119,19	—	—	—
8	110	99	121	121,00	-6,0	24,0	9,4
9	110	99	121	118,81	—	—	—
10	110	99	121	118,32	—	—	—
11	110	99	121	119,24	—	—	—
12	110	99	121	119,22	—	—	—
13	110	99	121	118,62	—	—	—
14	110	99	121	116,61	—	—	—

Таким образом, на основании анализа полученных результатов можно сделать вывод, что применение указанного алгоритма обеспечивает приемлемую скорость сходимости итерационных расчетов. Кроме того, рассмотренный метод имеет высокую эффективность для оптимизации режимов сложнозамкнутых электрических сетей.

### Библиографический список

1. Дубенко Ю. В., Дышкант Е. Е. Интеллектуальная система контроля и прогнозирования потерь электроэнергии // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 3. С. 131-135.
2. Бакалин Ю. И., Мухин Н. П., Виноглядов В. Н. Сдерживающие факторы в организации энергосбережения и вопросы получения реальной энергоэффективности // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2013. № 2. С. 185-187.
3. Филиппова Т. А., Сидоркин Ю. М., Русина А. Г. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 356 с.
4. RastrWin3 – Документация пользователя [Сайт]: Программный комплекс «RastrWin». [2017]. URL: [http://www.rastrwin.ru/download/Files/HELP\\_RastrWin3\\_29\\_08\\_12.pdf](http://www.rastrwin.ru/download/Files/HELP_RastrWin3_29_08_12.pdf) (дата обращения: 16.10.2017).
5. Тестовые схемы [Сайт]: Отдел энергетики ИСЭиЭПС Коми НЦ УрО РАН. [2017]. URL: [http://energy.komisc.ru/dev/test\\_cases](http://energy.komisc.ru/dev/test_cases) (дата обращения: 16.10.2017).

## **ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УРЗА\***

канд. техн. наук, ст. преп. **Яблоков А.А.**

магистрант **Меркулов А.Ю.**

*Ивановский государственный энергетический  
университет им. В.И. Ленина, г. Иваново*

**Аннотация.** В статье поставлена задача исследования алгоритмов обработки цифровых сигналов, служащих для формирования векторов и расчета параметров сигналов, на основе выборок мгновенных значений тока и напряжения, для целей релейной защиты, автоматики и измерений.

Развитие микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (МП УРЗА) в настоящее время происходит в следующих направлениях [1]:

- более полное освоение созданной техники МП УРЗА;
- создание новых алгоритмов функционирования МП УРЗА;
- расширение области применения МП УРЗА.

Современные МП УРЗА предоставляют широкие возможности и объединяют в себе функции релейной защиты, измерения, регулирования и управления.

Развитие цифровых (микропроцессорных) устройств релейной защиты в рамках цифровой подстанции и использования цифровых трансформаторов тока и напряжения требует решения ряда задач, таких как определение структуры ИЭУ РЗА, выбор алгоритмов цифровой обработки сигналов и разработка новых или улучшение, уже существующих, алгоритмов релейной защиты. Используемые структуры построения релейной защиты, представлены на рис. 1 [2].

Важной частью приведенных структур, является цифровая обработка дискретной информации и формирование векторов, которые

---

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Мультифункциональная система на основе цифровых трансформаторов тока и напряжения для цифровых подстанций» (уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57717X0276).

используются в алгоритмах релейной защиты. Исследование данных алгоритмов и является целью настоящей работы.

Оцифрованные выборки мгновенных значений сигналов (токов и напряжений) формировались и обрабатывались в ПО Matlab, посредством программ, реализующих рассматриваемые алгоритмы расчета амплитуды и фазы между сигналами.

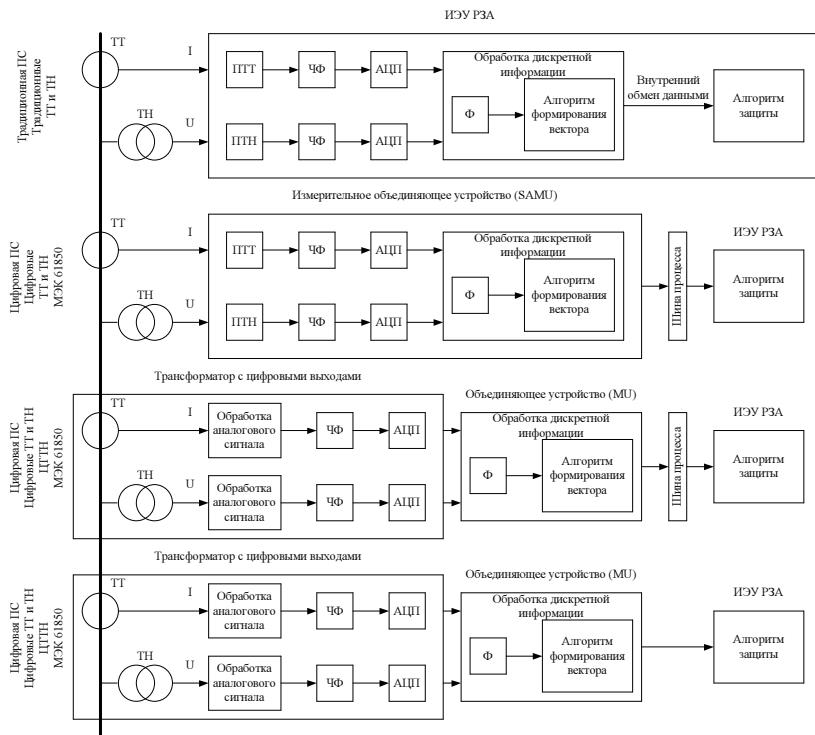


Рис. 1. Структура цифровых УРЗА и каналов связи и передачи данных: ТТ, ТН – трансформаторы тока и напряжения, соответственно; ПТТ, ПТН – промежуточные трансформаторы тока и напряжения, соответственно; ЧФ – частотный фильтр; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; Ф – антиалайзинговый фильтр; ИЭУ – интеллектуальное электронное устройство

В качестве исходных рассматривались следующие сигналы (см. рис. 2):

- синусоидальный сигнал;
- синусоидальный сигнал с наложением шума при отношении сигнал шум от 10 до 30 дБ;
- несинусоидальный сигнал с коэффициентом несинусоидальности от 1 до 50 %.

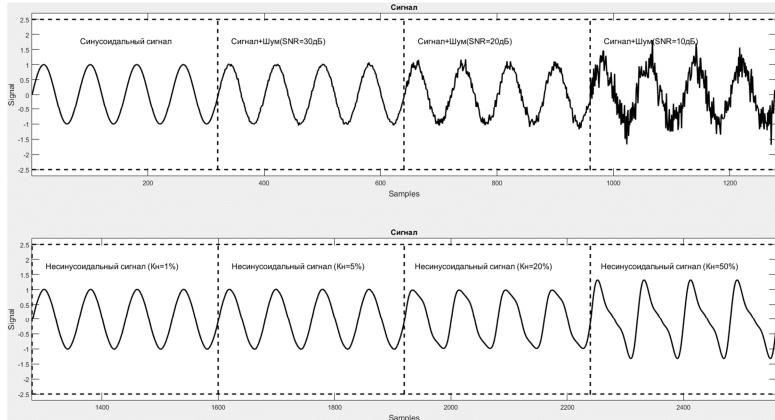


Рис. 2. Исходные сигналы

В качестве алгоритмов определения амплитуды ( $A_{1(2)}$ ) и фазы ( $\phi_{12}$ ) сигналов по выборкам мгновенных значений ( $Y_{1(2)}(nT_d)$ ) рассматривались следующие алгоритмы:

- Расчет амплитуды как средквадратичное за период:

$$A_{1(2)} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N Y_{1(2)}^2(nT_d)}}{N}. \quad (1)$$

- Расчет амплитуды по алгоритму из [3]:

$$A_{1(2)} = \frac{\pi \sum_{n=1}^N |Y_{1(2)}(nT_d)|}{2N}. \quad (2)$$

– Расчет фазы между сигналами по алгоритмам из [4]:

$$\varphi_{12} = \arcsin \sum_{n=3}^{N+2} \frac{[Y_1([n-2]T_d) - Y_1(nT_d)][Y_2([n-2]T_d) + Y_2(nT_d)]}{4\pi A_1 A_2}. \quad (3)$$

$$\varphi_{12} = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sum_{n=3}^{N+2} \frac{[Y_1([n-2]T_d) - Y_1(nT_d)][Y_2([n-2]T_d) + Y_2(nT_d)]}{8\pi}}{\sum_{n=3}^{N+2} \frac{Y_1(nT_d)Y_2(nT_d)}{N}} \right]. \quad (4)$$

– Расчет фазы между сигналами по алгоритмам из [5]:

$$\varphi_{12}^{(1)} = \arcsin \left[ \frac{\left| \frac{Y_1(nT_d)}{Y_1(nT_d) - Y_1([n-1]T_d)} \right| (Y_2(nT_d) - Y_2([n-1]T_d)) + Y_2([n-1]T_d)}{A_2} \right]. \quad (5)$$

$$\varphi_{12}^{(2)} = \arcsin \left[ \frac{\left| \frac{Y_2(nT_d)}{Y_2(nT_d) - Y_2([n-1]T_d)} \right| (Y_1(nT_d) - Y_1([n-1]T_d)) + Y_1([n-1]T_d)}{A_1} \right]. \quad (6)$$

– Расчет фазы между сигналами по алгоритму из [3]:

$$\varphi_{12} = \arcsin \left( \frac{\left[ \frac{2 \cdot \sum_{n=1}^N Y_1(nT_d)Y_2(nT_d)}{N} \right]}{\left[ 4\pi^2 \cdot \frac{\sum_{n=1}^N |Y_1(nT_d)|}{N} \cdot \frac{\sum_{n=1}^N |Y_2(nT_d)|}{N} \right]} \right). \quad (7)$$

– Расчет фазы между сигналами по алгоритму с использованием «чистых» ортогональных составляющих из [6]:

$$\varphi_{12} = \arctg \left( \frac{Y_1(nT_d)}{Y_1([n+N/4]T_d)} \right) - \arctg \left( \frac{Y_2(nT_d)}{Y_2([n+N/4]T_d)} \right). \quad (8)$$

– Расчет фазы между сигналами по алгоритму с использованием двух или трех выборок из [7]:

$$\varphi_{12} = \arctg \left( \frac{\frac{2\pi f_{50} Y_1(nT_d)}{Y_1(nT_d) - Y_1([n-1]T_d)}}{T_d} \right) - \arctg \left( \frac{\frac{2\pi f_{50} Y_2(nT_d)}{Y_2(nT_d) - Y_2([n-1]T_d)}}{T_d} \right). \quad (9)$$

$$\varphi_{12} = \arctg \left( \frac{\frac{2\pi f_{50} Y_1([n-1]T_d)}{Y_1(nT_d) - Y_1([n-2]T_d)}}{2T_d} \right) - \arctg \left( \frac{\frac{2\pi f_{50} Y_2([n-1]T_d)}{Y_2(nT_d) - Y_2([n-2]T_d)}}{2T_d} \right). \quad (10)$$

Помимо алгоритмов рассмотренных выше, также было проанализировано оконное ДПФ [8], нецентрированное (11) и центрированное (12) со стационарными и «плавающими» окнами, соответственно:

$$\hat{X}_\omega(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\omega(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\omega(n) \left[ \cos \frac{2\pi kn}{N} - j \sin \frac{2\pi kn}{N} \right]. \quad (11)$$

$$\hat{X}_\omega(k) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} x(n)\omega(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} x(n)\omega(n) \left[ \cos \frac{2\pi kn}{N} - j \sin \frac{2\pi kn}{N} \right]. \quad (12)$$

где  $N$  – число выборок сигнала за период и количество компонент разложения;  $x(n)$  – при  $n = 0, 1, \dots, N-1$  измеренные значения сигнала в соответствующих дискретных точках;  $\omega(n)$  – оконная (весовая) функция.

Исследованные оконные функции представлены на рис. 3 [9].

Анализ работы алгоритмов производился при количестве выборок  $N = 80$  (для целей РЗА) и  $N = 256$  (для целей коммерческого учета и измерений) в соответствии с международным стандартом IEC 61850-9-2LE.

Расчеты производились в программном комплексе Matlab и отображались в табличном и графическом виде (см. рис. 4), для дальнейшего анализа о применимости тех или иных алгоритмов и методов, рассмотренных выше.

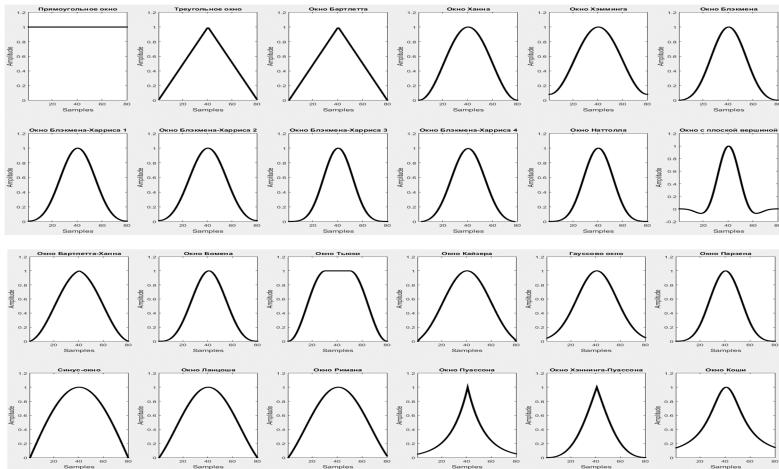


Рис. 3. Окненные (весовые) функции

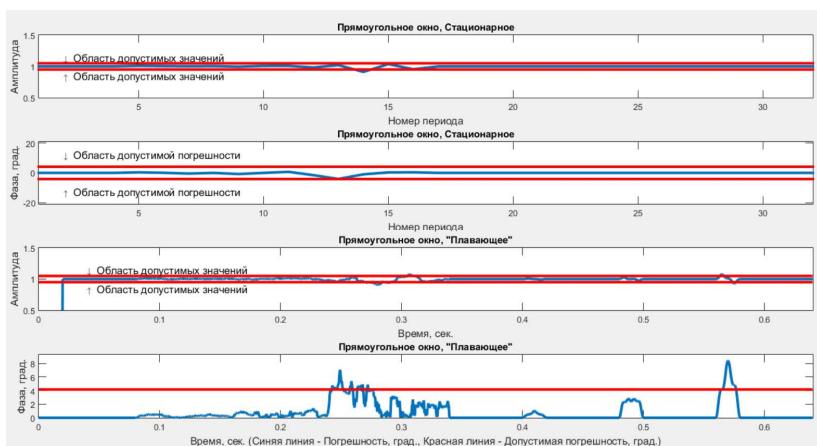


Рис. 4. Результат расчета для ДПФ с прямоугольным окном при  $N = 80$

В ходе исследования было получено, что алгоритм (4) и прямое ДПФ дают наиболее точные результаты среди алгоритмов (3)-(10). Для (1) и (2) получаемые значения амплитуд сигналов имеют недопусти-

мые погрешности, при наложении на сигнал шума или появления высших гармоник в составе сигнале. Для оконного ДПФ, среди используемых весовых функций, наиболее точный и приемлемый результат дали следующие окна: прямоугольное, треугольное, окно Бартлетта, Ханна, Хэмминга, Бартлетта-Ханна и Кайзера. Среди данных окон наилучшими при растекании спектра оказались окна Хэмминга и Кайзера.

### **Библиографический список**

1. Развитие микропроцессорных устройств релейной защиты, автоматики и управления (МП РЗАУ) электрических систем / В.Г. Гарке, А.А. Жегалов, И.Ю. Иванов и др. // Релейная защита и автоматика энергосистем: Сб. докладов XX конф. (Москва, 1–4 июня 2010). М: «Научно-инженерное информационное агентство», 2010. С. 203–209.
2. **Маслов А.М., Лобанов П.Л.** Вопросы стандартизации при реализации концепции Цифровой подстанции [Электронный ресурс] // Материалы 2-й Межд. выставки и конф. по инновационным проектам в электросетевом комплексе IPNES 2011, 6–8 сент. 2011 г. URL: <http://tuenergetica.ru/epr/184/13441.htm>
3. **Воронов А.С.** Измерение разности фаз сигналов // Горизонты образования. 2007. № 7. С. 1–2.
4. Патент на изобретение РФ № 2569939 «Способ определения угла сдвига фаз между двумя синусоидальными сигналами (варианты)». Автор: Муссонов Г.П. Дата приоритета: 29.09.2014.
5. Патент на изобретение РФ № 2563556 «Способ определения угла сдвига фаз между синусоидальными сигналами (варианты)». Автор: Муссонов Г.П. Дата приоритета: 03.07.2014.
6. **Аржаников Е.А., Чухин А.М.** Автоматизированный анализ аварийных ситуаций энергосистем. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000. 76 с. (Библиотека электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 2(14)).
7. **Никитин А.А.** Цифровая релейная защита. Основы синтеза измерительной части микропроцессорных реле: текст лекций. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. 240 с.
8. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие; 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.
9. **Хэррис Ф. Дж.** Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. 1978 (январь). Т. 66, № 1. С. 60–96.

### **3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

---

#### **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ**

студент Аксенов П.Л.

канд. техн. наук Егоров М.Ю.

Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург

**Аннотация.** Выполнен анализ мирового развития методов интенсификации теплообмена, приведены примеры применения интенсифицированных технологий в энергетике. Обсуждаются возможности и перспективы применения различных методов интенсификации теплообмена в оборудовании ядерных энергетических установок: парогенераторах, промежуточных сепараторах-пароперегревателях и конденсаторах паровых турбин.

#### **Введение**

Вырабатываемая в ядерных энергетических установках энергия проходит преобразование в различных теплообменных аппаратах. В современных ЯЭУ необходимо увеличение отводимых тепловых потоков в ядерных реакторах и парогенераторах АЭС [1], в конденсаторах и промежуточных сепараторах-пароперегревателях [2] паровых турбин, в системах охлаждения, в испарителях и теплообменных аппаратах разнообразного назначения, включая теплообменники воздушного охлаждения градирен АЭС, системы аварийного отвода теплоты от реакторных установок АЭС, подогреватели питательной воды кипящих аппаратов, системы водоподготовки, системы опреснения и очистки водных растворов, маслоохладители, системы воздушного охлаждения турбоэлектрогенераторов.

Эффективность работы ЯЭУ определяется интенсивностью рабочих процессов в этих аппаратах. Актуальность интенсификации теплообмена в элементах ЯЭУ также продиктована необходимостью

– уменьшения массогабаритных параметров теплообменной поверхности и оборудования АЭС в целом, особенно крупногабаритного (парогенераторы);

– снижения металлоёмкости ЯЭУ;

– уменьшения затрат энергии на прокачку теплоносителя в контурах ЯЭУ;

- повышения работоспособности, надёжности и срока службы оборудования ЯЭУ за счёт исключения или смягчения неблагоприятных режимов его работы с кризисами кипения, колебаниями расхода, пульсациями температуры элементов и появлением термоусталостных повреждений.
- уменьшения периода охлаждения элементов ЯЭУ;
- уменьшения отложений на парогенерирующих поверхностях.

**Цель работы** — анализ возможностей использования методов интенсификации теплообмена в оборудовании АЭС: парогенераторах, сепараторах-пароперегревателях и конденсаторах паровых турбин.

Задача повышения эффективности теплообменного оборудования ЯЭУ решается за счёт использования различных методов интенсификации теплообмена, разработки которых ведутся уже более 150 лет [3].

Сегодня известны не только множество методов интенсификации теплообмена, но и ряд классификаций таких методов, например, классификация по воздействию на среду, предложенная А.Е. Берглесом [4].

#### **Анализ методов интенсификации и их применения.**

Особо перспективны «пассивные» методы, возмущающие поток и изменяющие его параметры без использования внешней энергии:

1. *Обработанные, текстурированные поверхности.* На поверхность наносят мелкомасштабные деформации, полученные при их обработке или путём нанесения покрытий. По данным [5] шероховатость, получаемая в данном случае, позволяет интенсифицировать теплообмен до 9 раз по сравнению с гладкой поверхностью.

2. *Шероховатые поверхности.* Поток теплоносителя разбивается при помощи турбулизаторов разного размера — от зернистой шероховатости до дискретных трехмерных выемок и/или выступов. При использовании этого метода необходимо учитывать и увеличение теплопередающей поверхности. Интенсификация теплообмена достигает 70% [6].

3. *Ребристые поверхности.* Данный способ увеличивает поверхность теплообмена и турбулизирует поток. Метод хорошо изучен и широко применяется в различных теплообменниках.

4. *Устройства перемешивания* применяют при вынужденной конвекции. Вставки, “перемещая” теплоноситель от теплообменной поверхности в основной поток, улучшают теплообмен. В работе [7] предложено использование ребер или витой проволоки для интенсификации теплообмена вблизи тепловыделяющих сборок АЭС.

5. Устройства закрутки потока вызывают вторичную циркуляцию. Закрутить поток можно при помощи винтовых труб, спиральных вставок в трубы, шнеков, различных входов в канал. Так, при использовании винтовой ленточной вставки можно добиться увеличения теплоотдачи до 2,3 раз, при росте гидросопротивления до 1,9 раз [8].

6. Змеевики не только повышают компактность теплообменных устройств, но и закручивают поток, интенсифицируя теплообмен. Актуально исследование тепломассопереноса в каналах с закруткой при низких и сверхнизких массовых скоростях, в условиях тепловой или гидравлической разверки.

7. Устройства поверхностного натяжения увеличивают долю смоченной поверхности и обеспечивают рост теплоотдачи [9].

8. Присадки для жидкых теплоносителей обеспечивают рост интенсивности теплообмена при сохранении гидравлического сопротивления. Например, использование поверхностно-активных веществ позволяет увеличить эффективность теплообменника на 40% [10].

9. Добавки в газовый поток частичек жидкости увеличивают коэффициент теплоотдачи в 5-10 раз. При попадании газа в жидкости теплообмен также усиливается [11].

«Активные» методы предусматривают приложение внешней энергии для воздействия на поток:

1. Механическое перемешивание жидкости приводит к росту критерия Рейнольдса, сопровождается интенсификацией радиально-тангенциальных потоков [12].

2. Вибрации поверхностей теплообмена [13] и пульсации потока жидкости приводят к дополнительному “транспорту” теплоты [14].

3. Использование электростатических полей приводит к ускорению движения капель, диспергированию больших капель на маленьких каплях и равномерному покрытию пучка труб охлаждающей средой по всему объему аппарата [15].

Количество публикаций по интенсификации непрерывно растет, но результаты исследований противоречивы. Выбор способа интенсификации не всегда достаточно обоснован, что подтверждает актуальность настоящей работы.

### **Примеры интенсифицированных технологий в ЯЭУ и результаты их применения.**

1. Технологические каналы водоохлаждаемых кипящих реакторов канального типа (РБМК) и тепловыделяющие сборки кипящих реакторов корпусного типа (ВК, BWR).

При использовании технологических каналов с решётками-интенсификаторами на Игналинской АЭС достигнуто повышение мощности реактора в 1,5 раза при сохранении габаритов. Хотя в настоящее время новые кипящие реакторы канального типа не создаются, их проекты существуют (например, проект МКР-800) и интенсификация теплообмена решётками-турбулизаторами в них предусмотрена.

Тепловыделяющие сборки реакторов корпусного типа, получивших широкое распространение в мире (США, Япония, Германия), постоянно погружены под уровень кипящей в пузырьковом режиме воды. Поэтому необходимости повышения теплоотдачи здесь нет. Но интенсификаторы теплообмена и в этом случае полезны с целью повышения запаса до кризиса кипения. Их конструктивное исполнение аналогично применяемому в кипящих реакторах канального типа, когда решётки-интенсификаторы объединяют функции дистанционирования пучка тепловыделяющих элементов и завихрителей двухфазного потока.

2. Тепловыделяющие сборки ядерных реакторов водоводяного типа (ВВЭР). Цель интенсификации для сборок реакторов типа ВВЭР та же, что и для сборок корпусных кипящих реакторов – повышение критического значения плотности теплового потока. В реакторах ВВЭР предыдущих поколений специальных средств интенсификации теплоотдачи от поверхностей твэлов не было, так как высокие скорости воды в активной зоне (до 10 м/с) и малые гидравлические диаметры межтвэльного пространства обеспечивали высокие коэффициенты теплоотдачи (порядка  $(2...5) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>·К). Однако постоянно повышающаяся энергонапряжённость активных зон в результате использования новых видов ядерных топлив и повышения единичных мощностей реакторов (реализованы моноблоки АЭС мощностью в 1450...1480 МВт·эл, проектируются энергоблоки мощностью 1800 МВт·эл и выше) в условиях постоянно повышающихся требований к их безопасности привели разработчиков реакторов к использованию решёток-интенсификаторов, повышающих критические нагрузки при кипении в 1,5–2 раза.

#### **Перспективы применения методов интенсификации в ЯЭУ.**

1. *Конденсаторы паровых турбин.* Поперечно обтекаемые паром трубные пучки могут выполнять из труб с поперечным относительно невысоким оребрением. Оптимальные размеры оребрения: высота рёбер 1...1,5 мм, расстояние между рёбрами 2...3 мм. При этом средний по высоте пучка коэффициент теплоотдачи при конденсации возрастает

$$\frac{\alpha_{OPEBP}}{\alpha_{ГЛАДК}} = 1,29 \cdot \left( \frac{d}{h} \right)^{1/4} \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр гладкой трубы,  $h$  – высота ребра.

Для водяного пара, конденсирующегося на трубах диаметром 12,7 мм при высоте рёбер 0,5…1,6 мм; толщине их у вершины 0,5…1,5 мм и расстоянии между рёбрами  $s = 0,5…4$  мм отношение (1) лежит в пределах 2,5…3, причём практически не меняется с изменением геометрических размеров  $s, h$  в указанных выше пределах.

2. *Промежуточные сепараторы-пароперегреватели* (СПП) влажнопаровых турбин. Для этих аппаратов интенсификация теплоотдачи по стороне нагреваемого пара желательна по причине её малой интенсивности по сравнению с теплоотдачей при конденсации пара высокого давления. Приемлемые показатели компактности имеют тесные поперечно обтекаемые трубные пучки. Эффективны поперечно обтекаемые пучки низкоребристых труб.

На сегодняшний день энергоблоки ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 отечественных проектов оснащаются аппаратами СПП с перегревательной частью в виде продольно обтекаемых пучков труб. Продольное обтекание менее эффективно, нежели поперечное. В этих СПП с целью интенсификации применены продольные приварные рёбра. Целесообразным представляется также нанесение лунок на поверхность рёбер. Это даёт повышение приведённого коэффициента теплоотдачи (т. е. отнесённого к гладкой поверхности) на 15…20% и возможность соответствующего сокращения площади поверхности нагрева при сохранении требуемых величин перегрева пара.

Применение «олунения» и выступов на поверхности теплообмена в СПП возможно также на исходно «гладких», т. е. неоребрённых трубах, как при их поперечном, так и при продольном обтекании. Так, применительно к вертикальным пучкам труб пароперегревательных модулей аппаратов СПП-500-1 для энергоблоков с реакторами РБМК предложены выступы сферической формы на внутренней поверхности трубок, обтекаемой перегреваемым паром.

3. *Парогенераторы*. Применение методов интенсификации в парогенераторах обусловлено возможностью уменьшения массогабаритных характеристик. Перспективно применение периодических кольце-

вых накаток, так как они не увеличивают внешнего диаметра труб, но эффективно турбулизируют поток согласно зависимости [16]:

$$Nu_{\text{инт}} = Nu_{\text{гл}} \cdot [100 \cdot \left(1 - \frac{d}{D}\right)]^{0,445}$$

Нанесение накатки на всю длину трубок обеспечивает рост коэффициента теплопередачи на уровне 9%. Нанесение же накаток не по всей длине трубы, а только на некоторую её часть приводит к снижению гидравлического сопротивления при незначительном уменьшении получаемого выигрыша [17].

### **Выводы.**

1. В результате выполненного анализа мирового развития методов интенсификации установлено, что имеет место множество перспективных и малоизученных методов для применения в оборудовании атомных электрических станций

2. Показано, что в атомной энергетике перспективно повышение эффективности рабочих процессов за счёт применения интенсификации тепломассобменных процессов в основном оборудовании АЭС: реакторах, конденсаторах, парогенераторах, а также сепараторах-пароперегревателях.

3. Для перечисленных видов оборудования отобраны энергоэффективные методы интенсификации, а также сформулированы практические рекомендации по их применению. Приведены количественные оценки, свидетельствующие об теплогидравлической эффективности предложенных методов.

### **Библиографический список**

1. Интенсификация тепломассообменных процессов в парогенераторах насыщенного пара АЭС с ВВЭР как средство повышения эффективности и надежности / Н.Д. Агафонова, М.Ю. Егоров, В.В. Сергеев и др. // Атомная энергия. 2017. Т. 123. № 3. С. 128–132.
2. Results from tests of modernized moisture separator-reheater of K-500-65/3000 turbine plants of the power unit no. 4 at the Leningrad nuclear power plants (NPP) / M.A. Gotovskii, B.S. Fokin, M.Ya. Belenki and oth. // Thermal Engineering. 2012. Т. 59. № 2. Р. 113–118.
3. **Попов И.А., Махянов Х.М., Гуреев В.М.** Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 559 с.
4. Bibliography of Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer / A.E. Bergles, V. Nirmalan, G.H. Junkhan, R.L. Webb // Report HTL-31, ISU-ERI-Ames-84221, Heat Transfer Laboratory, Iowa State University, Ames, IA. 1983.

5. Кипение воды на микроструктурированных поверхностях. / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, Н.Н. Зубков и др. // Труды Академэнерго. 2012. № 1. С. 14–31.
6. **Кунтыш В.Б., Сухоцкий А.Б., Яцевич А.В.** Тепловая эффективность вихревой интенсификации теплоотдачи газового потока при продольном и поперечном обтекании круглотрубных поверхностей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 4. С. 63–74.
7. **Овсянник А.В.** Термодинамическое моделирование теплообмена при кипении на неизотермической(поперечно-ограниченной) поверхности // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2004. № 3. С. 49–58.
8. **Кириллов П.Л., Богословская Г.П.** Теплообмен в ядерных энергетических установках. М., Энергоатомиздат, 2008. 256 с.
9. **Ежов А.В., Букин В.Г., Кузьмин А.Ю.** Влияние масла на режимы движения двухфазного потока кипящего смесевого хладагента внутри трубы // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2008. № 2 (43). С. 190–193.
10. Интенсификация теплообмена в ТВС ВВЭР-СКД / В.Я. Беркович, В.М. Махин, М.П. Никитенко и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2012. № 32. С. 112–120.
11. **Колядин Е.А.** Влияние закрутки потока газов на конвективный теплообмен в утилизационных газотрубных котлах // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2007. № 2. С. 159–162.
12. **Газизулин Н.А.** Исследование конвективной теплопередачи в аппарате с механической мешалкой // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. 2013. Т. 15. № 4-2. С. 511–514.
13. **Козлов В.Г., Селин Н.В.** Экспериментальное исследование тепловой конвекции в слое, совершающем колебания сферического маятника // Конвективные течения. 2005. № 2. С. 5–16.
14. **Голованов А.Н., Рулёва Е.В.** О влиянии периодических пульсаций газа-охладителя на характеристики теплообмена в системе пористого охлаждения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 2 (14). С. 85–90.
15. **Киреев В.В., Руднев С.Д** Теплообмен при охлаждении в электростатическом поле // Техника и технология пищевых производств. 2012. № 2. С. 111–117.
16. **Кишкун А.А., Краев М.В., Зуев А.А.** Интенсификация теплообмена // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2005. № 3. С. 130–134.
17. **Аксенов П.Л., Егоров М.Ю.** Интенсификация теплообмена в оборудовании АЭС // Неделя науки СПбПУ. Институт энергетики и транспортных систем: мат. научн. конф. с международным участием. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. Ч. 1. С. 82–84.

# **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЛЬЦЕВЫХ НАКАТОК-ТУРБУЛИЗАТОРОВ**

**студент Аксенов П.Л.**

**канд. техн. наук Егоров М.Ю.**

*Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

**Аннотация.** Предложена оптимизация конструкции парогенераторов типа ПГВ-1000, эксплуатирующихся на АЭС с ВВЭР на основе интенсификации теплогидравлических процессов с помощью системы периодических кольцевых накаток труб теплообменной поверхности без изменения технологии сборки аппарата.

Проведены тепловой, гидравлический и компоновочный расчёты как без применения интенсификаторов теплообмена, так и с их использованием. Выполнен сравнительный анализ гидравлических характеристик парогенератора в зависимости от геометрических параметров примененных турбулизаторов.

Применение интенсификации теплообмена обеспечивает снижение массо-габаритных характеристик парогенераторов типа ПГВ-1000 на 9%.

**Введение.** Проблема экономии энергоресурсов относится к числу проблем, требующих детального анализа. Использование ядерного топлива взамен органическому для производства теплоты и электроэнергии началось с 50<sup>х</sup> годов прошлого века и вписывается в концепцию не только энергосберегающей, но и экологической политики. Увеличение доли атомной энергетики в энергетическом балансе России с нулевого уровня в 1954 году до 18,6% в 2015 году доказывает необходимость энергосбережения и в атомной энергетике.

В ходе рабочего процесса на АЭС вода нагревается в реакторе и охлаждается в конденсаторе, проходя через множество теплообменников. Одной из важнейших задач является повышение эффективности и увеличение единичной мощности теплообменного оборудования АЭС. Так как при увеличении единичной мощности растет и масса аппарата, то повышается важность и актуальность совершенствования конструкций теплообменных аппаратов: сокращение массогабаритных характеристик, снижение мощности на прокачку теплоносителей через аппарат при условии фиксированной тепловой мощности. В настоящее время и в перспективе одним из доступных и экономически целесообразным является метод интенсификации теплообмена. В состав основного оборудования двух- и трехконтурных АЭС входит парогенератор

– специальный теплообменный аппарат для генерации пара за счёт отбора теплоты у теплоносителя и передаче её рабочему телу.

**Цель работы** – исследовать применение метода периодических кольцевых накаток на примере парогенератора ПГВ-1000.

Парогенератор типа ПГВ-1000 (рис.1) для АЭС с ВВЭР – однокорпусный двухконтурный теплообменный аппарат горизонтального типа с погруженным трубным пучком.

Главной тенденцией в развитии реакторных установок было увеличение единичной мощности, а, следовательно, и повышение единичной мощности парогенератора. За длительный период разработки и эксплуатации парогенераторов (начиная с аппаратов типа ПГВ-440 в 1970-е годы), их паропроизводительность выросла более чем в 4,5 раза, поверхность теплообмена увеличилась более чем в 3,5 раза, а количество трубок – в 2,5 раза [1].

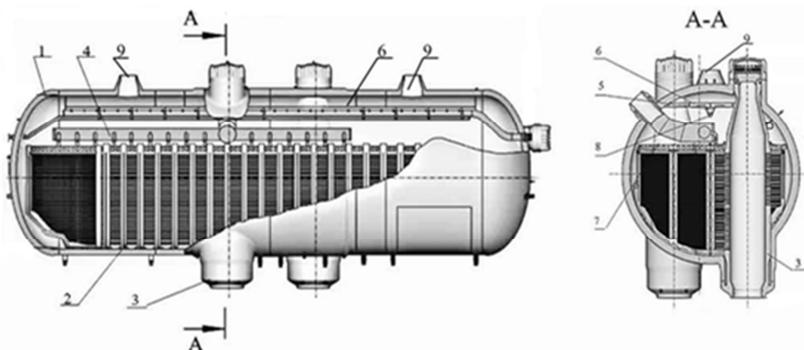


Рис. 1. Конструкция парогенератора ПГВ-1000: 1 – корпус; 2 – пучок теплообменных труб; 3 – коллектор первого контура; 4 – устройства подвода и раздачи питательной воды; 5 – устройства подвода и раздачи питательной воды в аварийных режимах; 6 – пароприемный дырчатый лист; 7 – погруженный дырчатый лист; 8 – устройство подачи химических реагентов; 9 – патрубки отвода пара

Такой рост достигнут путем увеличения габаритных размеров парогенератора, а также за счет изменения расположения коллекторов относительно друг друга, изменения компоновки трубок и других технических решений [1]. В результате парогенераторы достигли максимальных допустимых транспортным диаметром размеров – диаметра

4 м [2]. Для дальнейшего их совершенствования предлагается применить методы интенсификации теплообмена [3].

В рамках исследования эффективности применения периодических кольцевых накаток были проведены тепловой, компоновочный, гидравлический расчёты для конструкций парогенератора как без применения метода интенсификации, так и с интенсификаторами.

В расчётах приняты допущения:

– вода – несжимаемая жидкость, изменение плотности не учитывается (принято в соответствии с [4])

– неизменность физических свойств среды при движении в трубах и в зависимости от положения труб в парогенераторе

– отсутствие тепловых потерь парогенератора в окружающую среду: выполняется уравнение теплового баланса (принято в соответствии с рекомендациями [1])

– поверхность теплообмена не подвергается загрязнению в виде осадков из теплоносителя, накипи нагреваемого пара (термическое сопротивление пучка труб постоянно)

– для расчета теплоотдачи в тесных ручках труб выбрана скорость в узком сечении по данным [1]

– теплota трения не учитывается (принято в соответствии с [4])

– повышение интенсивности теплообмена со стороны питательной воды не учитывается и идёт в дополнительный запас в пользу выводов настоящей работы.

Основной задачей **теплового расчета** являлось определение поверхности теплообмена и числа труб. Теплоотдача со стороны теплоносителя определялась по зависимости [4]:

$$\alpha_1 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_{\text{вн}}} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}, \quad (1)$$

для течения в круглых трубах с  $Re = 10^4 \dots 10^6$  и  $Pr = 0,7 \dots 2$ .

Для описания теплоотдачи со стороны рабочего тела использована формула для кипения в большом объёме [4]:

$$\alpha_{60} = 4,32 \cdot (p^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot p^2) \cdot q_{\text{кип}}^{0,7}, \quad (2)$$

где  $p = p_{2S}$  – давление во втором контуре, МПа,  
справедливая при  $p = 0,1 \dots 20$  МПа,  $q < 0,4$  МВт/м<sup>2</sup>.

По плотности теплового потока определена величина поверхности испарительного участка парогенератора ПГВ-1000 (в аппарате кроме

него есть и экономайзерный участок), количество труб, и их общую длину.

Компоновочное решение для парогенератора зависит от количества труб и их геометрических параметров. Для выбранной конструкции найдены определяющие транспортные размеры парогенератора: диаметр и длины [5].

Одной из задач **гидравлического расчёта** являлось определение потерь давления в тракте греющей среды. После выполнения теплового и компоновочного расчетов разрабатывалась гидравлическая схема парогенератора, были выделены участки для выбора коэффициентов трения  $\xi_{тр}$  и местных гидравлических сопротивлений  $\xi_m$ . Сумма потерь напора в парогенераторе определяет выбор насоса для прокачки теплоносителя по первому контуру.

Метод периодических кольцевых накаток относится к методам интенсификации с помощью использования шероховатостей поверхности. На наружную поверхность трубы наносятся периодические кольцевые накатки, причем внутри образуются периодические кольцевые диафрагмы, см. рис. 2. При использовании метода пристенный слой турбулизируется, образуются вихри, что и обеспечивает интенсификацию теплообмена.

Особенностью данного способа интенсификации является то, что при его применении не увеличивается внешний диаметр труб. Это позволяет использовать трубы в тесных пучках без изменения технологии сборки аппарата.

Эффективность выбранного метода определяется геометрическими параметрами канавок:

$t/D = 0,5$  – относительный шаг между канавками;

$d/D = 0,94$  – относительный диаметр трубы между выступами.

Кроме этого, предложено применение канавок не по всей длине труб, а только на её части.

Интенсификация обеспечивает теплоотдачу с внутренней поверхности трубы. Для расчета безразмерного коэффициента теплоотдачи со стороны теплоносителя использована зависимость [6]:

$$Nu_{инт} = Nu_{гл} \cdot [100 \cdot \left(1 - \frac{d}{D}\right)]^{0,445}, \quad (3)$$

где  $Nu_{гл}$  – число Нусельта без применения интенсификаторов.

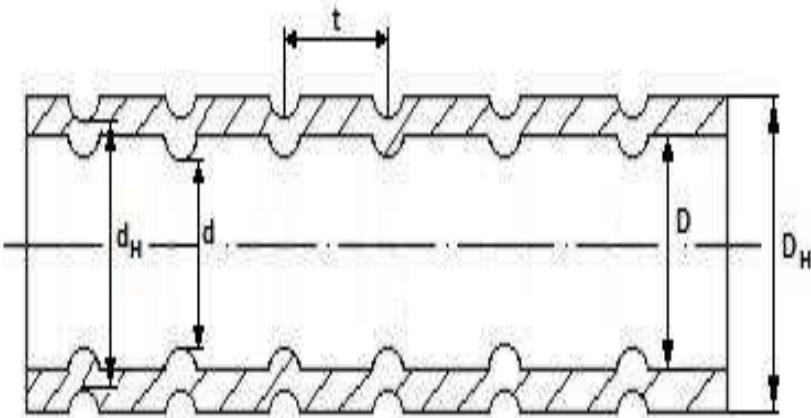


Рис. 2. Сечение трубы с применением периодических кольцевых накаток:  
 $t$  – шаг между канавками;  $d$  – диаметр канала в месте, где расположен выступ;  
 $d_h$  – диаметр канала до дна канавки;  $D$  – диаметр канала до основания выступа;  
 $D_h$  – диаметр трубы наружный

Используя «интенсифицированный» коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  и неизменный  $\alpha_2$ , был рассчитан коэффициент теплопередачи и удельный тепловой поток, определены величина поверхности испарительно-го участка и длина труб.

Для технико-экономического анализа определено количество турбулизаторов [7]:

$$n_{\text{турб}} = \frac{l_{\text{инт}} \cdot n_{\text{тр}}}{t}. \quad (4)$$

Турбулизаторы не меняют компоновку аппарата, но увеличивают гидравлическое сопротивление труб [6]:

$$\frac{\xi_{\text{инт}}}{\xi_{\text{гл}}} = \left[ 1 + \frac{\lg Re - 4,6}{3,4 \frac{Re}{10^5} + 6} \right] x \quad (5)$$

$$x \left( 1,3 - \sqrt{\left| \frac{d}{D} - 0,93 \right|} \right) \cdot \exp \left[ 20,9 \cdot \left( 1 - \frac{d}{D} \right)^{1,05} \right],$$

где  $\xi_{\text{гл}}$  – гидравлическое сопротивление без применения кольцевых накаток.

Диапазон использования соотношения (5):  $d/D=0,9-0,97$ ;  $t/D=0,5-10,0$ .

Результаты расчётов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставление теплогидравлических характеристик

парогенератора типа ПГВ-1000 для АЭС с ВВЭР

без применения интенсификаторов теплообмена

и с использованием системы периодических кольцевых накаток

Наименование	Значение для варианта без применения турбулизаторов	Значение для варианта с турбулизаторами	Разница, %	Размерность
Диаметр корпуса, $D_{\text{пп}}$	3,36	3,36	0	м
Количество трубок, $n$	$1,18 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^4$	0	шт.
Длина трубок, $l_{\text{tp}}$	10,4	9,5	9	м
Коэффициент теплоотдачи со стороны теплоносителя, $\alpha_1$	$2,95 \cdot 10^4$	$4,54 \cdot 10^4$	35	Вт/(м <sup>2</sup> · К)
Коэффициент теплоотдачи со стороны сетевой воды, $\alpha_2$	$2,58 \cdot 10^4$	$2,58 \cdot 10^4$	0	Вт/(м <sup>2</sup> · К)
Коэффициент теплопередачи, $k$	$6,52 \cdot 10^3$	$7,16 \cdot 10^3$	8,9	Вт/(м <sup>2</sup> · К)
Гидравлическое сопротивление первого контура, $\Delta p_{\text{1конт}}$	0,21	0,34	61	МПа

## **Выводы**

1. Применение интенсификации теплообмена методом периодических кольцевых накаток обеспечило увеличение коэффициента тепло передачи на 9% и привело к уменьшению длины парогенератора на 9%, что обеспечивает соответствующее снижение массы и объема аппарата.
2. Гидравлическое сопротивление по первому контуру возросло на 61% (на 0,13 МПа).
3. Для внедрения на АЭС предложенного способа интенсификации необходимы прочностные расчёты для всех проектных и запроектных режимов работы оборудования и проведение экспериментальных исследований на натурных параметрах.

## **Библиографический список**

1. **Рассохин Н.Г.** Парогенераторные установки атомных электростанций. М: Энергоатомиздат, 1987. 385 с.
2. **Цветков Ф.Ф. Григорьев Б.А.** Тепломассообмен. М.: МЭИ, 2011. 558 с.
3. **Кишkin А.А., Краев М.В., Зуев А.А.** Интенсификация теплообмена // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2005. № 3. С. 130–134.
4. Несущая способность парогенераторов водо-водяных энергетических реакторов / Махутов Н.А., Драгунов Ю.Г., Фролов К.В. и др. М.: Наука, 2003. 439 с.
5. **Харченко С.А., Лахов Д.А.** О предельной мощности горизонтально го парогенератора // 16-я научно-техническая конференция молодых специалистов ОКБ "Гидропресс": Сб. трудов. Подольск, 2014, С. 1–9.
6. **Аксенов П.Л., Егоров М.Ю.** Интенсификация теплообмена в оборудовании АЭС // Неделя науки СПбПУ. Институт энергетики и транспортных систем: мат. научн. конф. с международным участием. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. Ч. 1. С. 82–84.
7. **Аксенов П.Л., Егоров М.Ю.** Интенсификация теплообмена в парогенераторе ПГВ-1000В АЭС // Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена; Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тез. Докл. Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену и XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. С. 157–158.

# **ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ КАНАЛОВ ГОЛОВКИ БЛОКА ЦИЛИНДРОВ НА ИХ ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ**

студент Губайдуллин Р.Р.

Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева - КАИ, г. Казань

**Аннотация.** Целью работы является исследование возможности применения аддитивных технологий 3D печати при исследовании влияния формы каналов головки блока цилиндров (ГБЦ) на их пропускную способность с помощью продувочного стенда. В ходе исследования было выполнено: разработка методики производства экспериментальных образцов ГБЦ на 3D принтере для продувочного стенда; упрощение, ускорение и удешевление исследований влияния формы каналов ГБЦ. Исходя из полученных данных сделан вывод о том, что аддитивных технологий 3D печати является перспективным при исследовании влияния формы канала головки блока цилиндров на их пропускную способность.

На сегодняшний день при создании и доводке поршневых двигателей большое внимание уделяется увеличению пропускной способности впускных и выпускных клапанов. В результате значительно улучшаются наполнение и очистка цилиндров, сводятся к минимуму забросы выхлопных газов во впускную систему, уменьшается затраты на работу насосных ходов, что приводит к выигрышу в полезной работе цикла. При этом увеличивается среднее эффективное давление цикла ре и, как следствие, снижается удельный расход топлива  $ge$  [1].

Для оценки и улучшения газодинамических характеристик каналов ГБЦ используются специальные экспериментальные установки – продувочные стенды [2]. Приметами таких стендов являются: стенд SuperFlow (США), стенд НТЦ-КАИ (г. Казань) и стенд МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва). Стенды позволяют быстро оценить эффективность каналов на стадии проектирования. Так, например, один эксперимент на продувочном стенде может занять несколько минут, в то время как симуляция подобного процесса в среде CFD программ может занять от нескольких дней до пары недель. Но для проведения испытаний на стендах требуется большое количество заготовок для экспериментальных образцов. Как правило, такими заготовками являются ГБЦ существующих двигателей, что вносит ряд негативных факторов:

- высокая стоимость ГБЦ;
- высокая стоимость доработки и изготовления ГБЦ связанные с механической обработкой металлов;
- необходимость в дорогих и громоздких фрезерных ЧПУ станках для механической обработки;
- зачастую низкая скорость изготовления экспериментального образца.

Целью данной работы является исследование возможности применения аддитивных технологий 3D печати при исследовании влияния формы каналов головки блока цилиндров (ГБЦ) на их пропускную способность с помощью продувочного стенда. Также данная работа решает следующие задачи: создание методики производства экспериментальных образцов ГБЦ на 3D принтере, уменьшение расхода полимерных материалов и времени печати экспериментальных образцов, удешевление подобных исследований, увеличение скорости исследований по сравнению с симуляцией в CFD пакетах программ, удешевление оборудования для изготовления образцов.

В качестве решения задач предлагается заменить на стадиях исследования экспериментальные ГБЦ на модели напечатанные на 3D принтере. Для этого необходимо разработать методику изготовления данных моделей. Следует отметить, что довольно часто технологии 3D печати называют технологиями быстрого прототипирования [3].

Данная методика состоит из следующих этапов [3]:

- создание цифровой модели изделия;
- экспорт 3D модели в STL формат;
- генерация G-кода;
- подготовка к печати;
- печать модели;
- финишная обработка модели.

Первые два этапа выполняются преимущественно средствами систем автоматизированного проектирования. Рассмотрим первый этап подробнее [4].

Первое, снятие геометрических размеров с существующей ГБЦ средствами 3D сканирования или разработка новой 3D модели ГБЦ.

Второй шаг, создание 3D модели экспериментального образца (рис. 1).

Третий шаг, проведение прочностного анализа образца (рис. 1).

Четвертый шаг, на основе прочностного анализа проведение топологической оптимизации образца (рис. 2) с использованием инструмента «Генератор форта» пакета программ Autodesk Inventor.

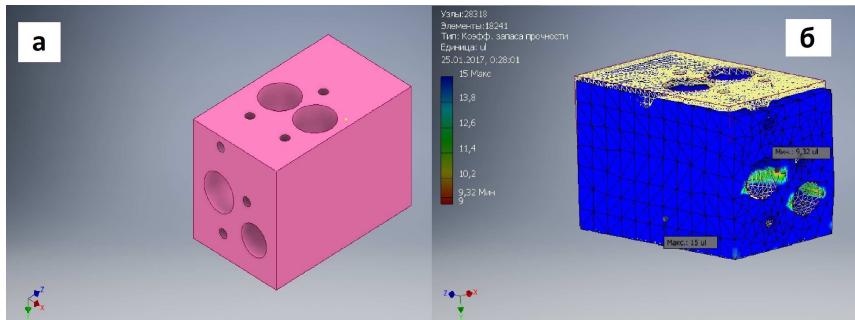


Рис. 1. Экспериментальный образец: *а* – 3D модель экспериментального образца, *б* – прочностной анализ экспериментального образца

Пятый шаг, на основе результатов топологической оптимизации разработать базовую модель ГБЦ (рис. 3). Четвертый и пятый шаг должны позволить сократить время, уменьшить расход полимеров и стоимость печати. В данной работе массу базовой модели удалось уменьшить на 56% за счет оптимизации.

Шестой шаг, разработка серии экспериментальных моделей с различными формами каналов на основе базовой модели.

На этапах три и четыре предполагается использование программного обеспечения для 3D печати.

В данной работе было использовано Simplify 3D. Исходя из результатов симуляции печати время печати удалось сократить до 22 ч. 19 мин., что на 21 ч. 52 мин. меньше печати неоптимизированной модели.

На шестом этапе экспериментальным образцам может потребоваться механическая обработка. Для этих целей наиболее эффективно подойдут фрезерные ЧПУ станки для полимерных материалов. В качестве такого станка можно привести Моделист CNC-305. Данное оборудование значительно компактнее и дешевле станков по металлу [5].

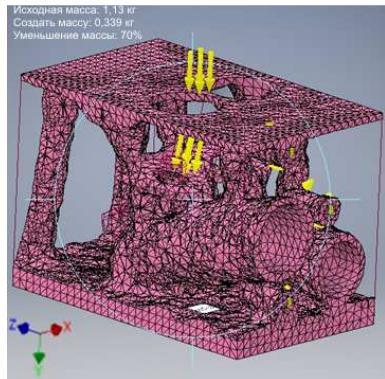


Рис. 2. Топологическая оптимизация экспериментального образца

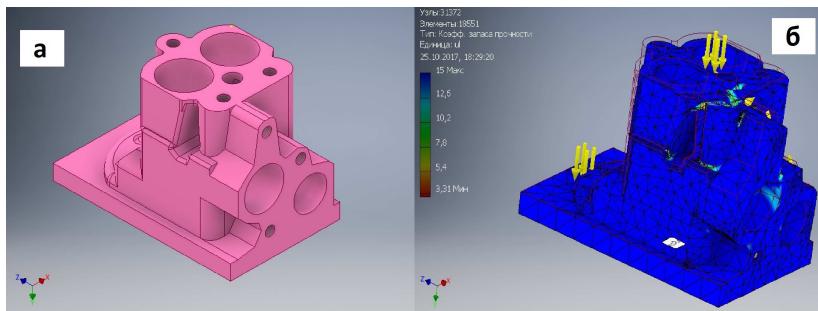


Рис. 3. Базовая модель ГБЦ: *а* – 3D модель базовой модели ГБЦ, *б* – прочностной анализ базовой модели ГБЦ

После получения экспериментальных моделей на них закрепляется оснастка и они испытываются на продувочном стенде. По результатам испытаний определяются наиболее эффективные каналы для создания эффективных головок блоков цилиндров.

**Выводы.** Исходя из полученных данных мы можем сделать вывод о том, что применение технологий быстрого прототипирования при исследовании влияния формы канала головки блока цилиндров на их пропускную способность является перспективным. В ходе исследования было сделано: разработана методика производства экспериментальных образцов ГБЦ на 3D принтере для продувочного стенда; упрощение, ускорение и удешевление исследования.

### Библиографический список

1. Филимонов Н.С., Гришин Ю.А. Стенд для исследования газодинамических характеристик клапанных каналов поршневых двигателей // Молодой ученый. 2016. № 12. С. 429–434.
2. Flowbenches [Электронный ресурс]. URL: <http://superflow.com>.
3. Бугаев И.В. Роль компьютерного моделирования в аддитивных технологиях // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5. С. 64–66.
4. Смирнов В.В., Шайхутдинова Е.Ф. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное авиадвигателестроительное производство // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2013». Казань, 2013. С. 114–119.
5. ЧПУ станки [Сайт]. URL: <http://top3dshop.ru>.

# **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОДУВОЧНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ КАНАЛОВ ГОЛОВКИ БЛОКА ЦИЛИНДРОВ НА ИХ ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ**

студент Губайдуллин Р.Р.

Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань

**Аннотация.** Цель данной работы является описание возможностей продувочного стенда НТЦ-КАИ для исследования газодинамических характеристик впускных и выпускных каналов головки блока цилиндров (ГБЦ). В данной статье были решены следующие задачи: описать конструкцию стенда, провести сравнительный анализ стенда НТЦ-КАИ с его аналогами. Созданный экспериментальный стенд дает возможность производить продувки впускных и выпускных каналов в головках поршневых двигателей и на основе полученных данных выполнять построение и анализ расходных характеристик клапанных каналов, производить исследования в расчетных программах. Также может выполняться последовательная модернизация форм каналов с целью снижения сопротивления и улучшения их расходных характеристик.

На сегодняшний день при проектировании, модернизации и формировании поршневых двигателей большое количество сил тратиться увеличению пропускной способности впускных и выпускных каналов. В результате чего значительно улучшаются наполнение и очистка цилиндров, сводятся к минимуму забросы выхлопных газов во впускную систему, уменьшается затраты на работу насосных ходов, что приводит к выигрышу в полезной работе цикла. При этом увеличивается среднее эффективное давление цикла  $p_e$  и, как следствие, снижается удельный расход топлива  $g_e$  [1]. Размеры сечений впускных и выпускных трубопроводов двигателей внутреннего сгорания, как правило, выбирают на основании эмпирических данных. Окончательную их доводку можно провести лишь экспериментально [2]. Для решения данной проблемы в современной технике используют стенды продувки ГБЦ [1]. Приметами подобного оборудования являются: стенд SuperFlow (США), стенд НТЦ-КАИ (г. Казань) и стенд МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва).

Цель данной работы – описать возможности продувочного стенда НТЦ-КАИ для исследования газодинамических характеристик впускных и выпускных каналов ГБЦ. Задачи работы: описать конструкцию стенда, провести сравнительный анализ стенда НТЦ-КАИ с его анало-

гами. Устройство продувочного стенда НТЦ-КАИ представлено на рис. 1 и 2.

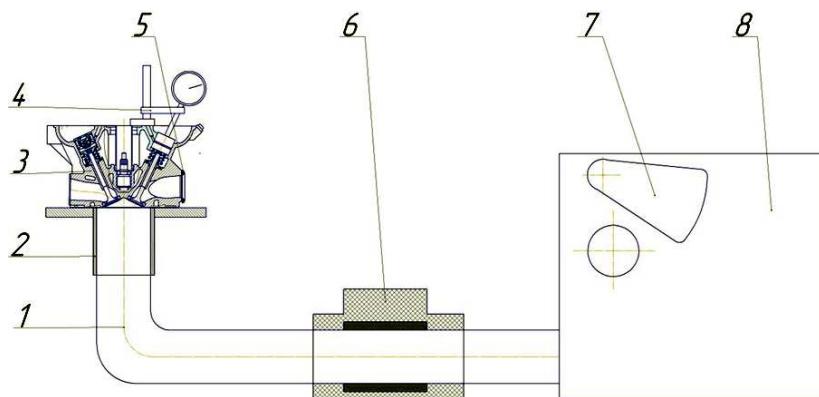


Рис. 1. Схема продувочного стенда для продувки впускного канала:  
1 – трубопровод; 2 – модель цилиндра; 3 – ГБЦ; 4 – индикатор часового типа с штативом; 5 – коноидальный насадок; 6 – датчик расхода и давления воздуха; 7 – регулятор перепада давления; 8 – блок продувочных компрессоров

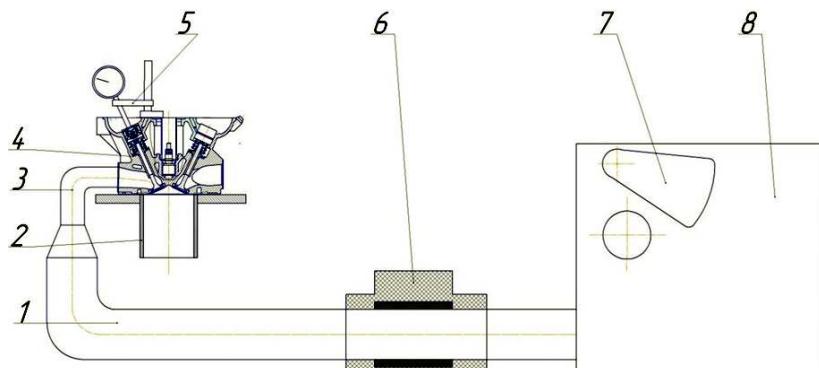


Рис. 2. Схема продувочного стенда для выпускного канала:  
1 – трубопровод; 2 – модель цилиндра; 3 – оснастка для продувки выпуска;  
4 – ГБЦ; 5 – индикатор часового типа с штативом; 6 – датчик расхода и давления воздуха; 7 – регулятор перепада давления; 8 – блок продувочных компрессоров

Принцип работы продувочного стенда, на примере продувки впускного канала, следующий. До начала замера с помощью датчика давления 6 определяется атмосферное давление. После контроля, что выпускной клапан закрыт, а отверстие в регуляторе перепада давления 7 полностью открыто, открывается выпускной клапан на требуемую величину с помощью специальной оснастки в конструкции, которой, как правило, используется болт с миллиметровой резьбой, что контролируется с помощью индикатора 4. Включается блок компрессоров 8. С помощью регулятора 7 устанавливается необходимый перепад давлений между атмосферой и давлением на датчике 6. В общемировой практике данный перепад давления  $\Delta p$  принято выставлять равным 25 или 28 дюймам водного столба (6 227 и 6 974 Па соответственно). После установления данного режима на стенде атмосферный воздух через насадок 5 поступает во впускной канал, откуда через клапанную щель попадает в модель цилиндра 2. Затем через трубопровод 1 он проходит датчик 6 и попадает в компрессорный блок 8, откуда выходит обратно в атмосферу через отверстие регулятора перепада давления 7. В результате датчик 6 фиксирует значение объемного расхода воздуха G для канала на заданном подъеме клапана. Аналогичным образом проводится замер выпускного канала с главным отличием в том, что воздух в канал будет поступать через модель цилиндра, а не насадок как в прошлом примере.

Полученные данные объемного расхода воздуха позволяют судить о потенциальной мощности двигателя. Так, например, в мировой практике были выявлены следующие закономерности:

1. Увеличение пропускной способности канала в зависимости от подъема клапана имеет прямолинейную зависимость от увеличения мощности автомобиля в зависимости от оборотов двигателя. То есть при увеличении расхода воздуха через канал на малом, среднем и максимальном подъеме клапана можно ожидать увеличение мощности при малых, средних и максимальных обратах соответственно.

2. При перепаде давления в 28 дюймов водного столба и измерении объемного расхода в кубических кубах в минуту (cfm – кубический фут в минуту,  $1000 \text{ cfm} = 0,472 \text{ м}^3/\text{с}$ ) для четырех цилиндровых атмосферных бензиновых двигателей величина максимального расхода через впускной канал будет приблизительно равна максимальной мощности двигателя. Откуда следует вывод о том что качество впускных каналов более важно, чем выпускных.

Как показала практика работы на продувочном стенде НТЦ-КАИ (рис. 3 $\alpha$ ) и мощностном колесном стенде Cartech (рис. 3 $\beta$ ) кафедры АДиС КНИТУ-КАИ описанные закономерности довольно справедливы и удобны для предварительного анализа. Однако для более точного и широкого анализа необходимо специальное программное обеспечение. И одним из важнейших входных данных для детального анализа будут являться результаты продувки. Примером таких программных продуктов является Dinomation. Данная программа может использовать данные объемного расчета в своих вычислениях. Однако более распространённым видом входных данных является эффективная площадь каналов  $\mu F$ . Данный параметр используется в следующих программных продуктах: Diesel-RK, Lotus Simulation Tools.

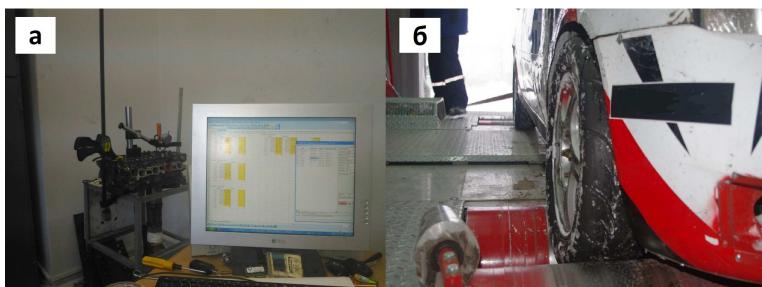


Рис. 3. Испытательные стенды:  $\alpha$  – продувочный стенд НТЦ-КАИ;  $\beta$  – мощностной колесный стенд Cartech кафедры АДиС КНИТУ-КАИ

Для преобразования данных объемного расхода воздуха  $G$  в эффективную площадь сечения канала  $\mu F$  необходимо воспользоваться формулой [3]:

$$\mu F = \frac{G}{\sqrt{2 * \Delta p * \rho}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха.

Отличительными особенностями стенда НТЦ-КАИ перед стендом МГТУ им. Н. Э. Баумана являются [1]:

1. Отсутствие ресивера после модели цилиндра на стенде НТЦ-КАИ.
2. Замер перепада давления и объемного расхода воздуха производиться в одном и том же сечении в отличии от стенда МГТУ им. Баумана.

3. Стенд МГТУ им. Баумана способен произвести замер выхлопного канала только при течении воздуха от насадка в цилиндр. В то время как стенд НТЦ-КАИ от цилиндра к выходу выпускного канала, что является более естественным режимом работы выпускного канала.

Отличительными особенностями стенда НТЦ-КАИ перед стендом SuperFlow являются [4]:

1. Стенд SuperFlow, также как и стенд МГТУ им. Баумана, способен произвести замер выхлопного канала только при течении воздуха от насадка в цилиндр.

2. Стенд НТЦ-КАИ имеет регулятор давления в отличие от стендов SuperFlow. Для определения объемного расхода на заданном перепаде давления стенд SuperFlow использует аппроксимацию. Что в отличии от экспериментального способа может дать погрешность при сравнении двух и более образцов ГБЦ на продувочном стенде.

Из данного анализа следует, что каждый стенд выполняет одинаковые задачи и имеет свои достоинства и недостатки.

**Выводы.** Созданный экспериментальный стенд позволяет проводить продувки впускных и выпускных каналов в головках поршневых двигателей и на основе полученных данных выполнять построение и анализ расходных характеристик клапанных каналов, производить исследования в расчетных программах. Также может выполняться последовательная модернизация форм каналов с целью снижения сопротивления и улучшения их расходных характеристик.

### **Библиографический список**

1. Филимонов Н.С., Гришин Ю.А. Стенд для исследования газодинамических характеристик клапанных каналов поршневых двигателей // Молодой ученый. 2016. № 12. С. 429–434.
2. Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания: системы поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение, 1985. 456 с.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
4. Flowbenches [Электронный ресурс]. URL: <http://superflow.com/aspx/cat.aspx?catid=4&navid=10>.

# АНАЛИЗ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВЛАГИ В ПЕРЕГРЕВАТЕЛЕ СПП-220 М АЭС С ВВЭР

канд. техн. наук **Егоров М.Ю.**

Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург

**Аннотация.** Опыт эксплуатации турбоустановок насыщенного пара, обязательным элементом которых являются промежуточные сепараторы-пароперегреватели, показал недостаточную эффективность сепарационных устройств, приводящую к транзиту влаги через сепараторы, а при определённых условиях и через ступени перегревателя. Поступление влаги в перегревательную часть вызывает эрозионный износ, повреждения труб разводки, труб поверхности нагрева и корпусов кожухотрубных перегревательных элементов — модулей. Последующее глушение дефектных модулей приводит к проскоку части нагреваемого пара через перегреватель без теплообмена с греющим паром и снижению эффективности аппарата; работе перегревателя в режимах, отличных от проектного; вынужденным остановам турбин; снижению коэффициента использования установленной мощности блока АЭС, недовыработке электроэнергии и необходимости проведения значительного объёма ремонтных работ.

Проведён расчётный анализ испарения поступающей в перегреватель остаточной влаги различного уровня дисперсности 25–125 мкм, поступающей в перегреватель после промежуточного сепаратора-пароперегревателя типа СПП-220 М, включённого между цилиндрами высокого и низкого давления турбоустановки АЭС с водоводяными энергетическими реакторами.

Показано, что капли сепарата начальных диаметров 25–75 мкм полностью испаряются в первой ступени двухступенчатого перегревателя.

## Введение

Экономичность АЭС определяется надежностью работы оборудования турбоустановки. Для турбин, работающих на насыщенном паре, на выходе из цилиндра высокого давления пар имеет влажность 10–15%. В таких условиях лопатки последних ступеней цилиндров низкого давления под воздействием влаги подвержены сильной эрозии, имеют малый ресурс.

Для снижения конечной влажности пара в турбинах предусмотрена промежуточная осушка пара с последующим перегревом отсепарированного пара в сепараторах-пароперегревателях [1]. Применение промежуточной сепарации и перегрева повышает тепловую экономичность турбины.

**Цель работы** – анализ испарения оставшейся после сепарации влаги в первой ступени перегревателя аппарата типа СПП-220 М АЭС с ВВЭР.

### 1. Принцип организации рабочего процесса в конструкции сепаратора-пароперегревателя СПП-220 М

В результате исследований и анализа мирового опыта создания и эксплуатации различных конструкций сепараторов-пароперегревателей вертикального и горизонтального в России получили развитие однокорпусные вертикальные аппараты.

Для турбин К-220-44/3000 разработан однокорпусный вертикальный цилиндрический аппарат СПП-220 М, имеющий перегреватель с продольно оребрёнными трубками, рис. 1. Первые аппараты СПП-220 М применены на четвёртом блоке Нововоронежской АЭС, в дальнейшем СПП-220 М были установлены на ряде АЭС с ВВЭР.

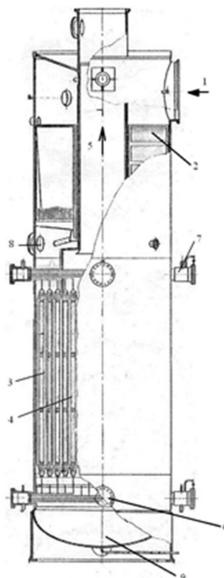


Рис. 1. Общий вид конструкции СПП-220 М: 1 – вход пара из ЦВД; 2 – сепарационные блоки; 3 – I ступень пароперегревателя; 4 – II ступень пароперегревателя; 5 – выход перегретого пара; 6 – выход конденсата греющего пара; 7 – вход греющего пара; 8 – слив отсепарированной влаги; 9 – днище

Пар после цилиндра высокого давления направляется в верхнюю распределительную камеру и далее в сепаратор 2. Сепаратор состоит из 16 одинаковых сепарационных блоков, расположенных радиально между корпусом и выходной трубой перегретого пара.

Общей проблемой конструирования сепарационной части является организация равномерного распределения потоков влаги и пара между сепарационными устройствами [2].

Удаление влаги происходит в сепараторе 2, состоящем из пяти жалюзийных пакетов. В жалюзийном пакете осуществляется два способа сепарации влаги:

1) Поворот потока пара перед жалюзийными элементами с помощью направляющих пластин. При этом происходит удаление крупно-дисперсной влаги.

2) Влага осаждается на поверхностях каналов знакопеременной кривизны. Образовавшаяся плёнка стекает под действием сил тяжести вниз, см. поз. 8 на рис. 1, в сепаратосборник. Каждый из пяти пакетов представляет собой самостоятельное сепарационное устройство. Осущенный пар после жалюзийных элементов проходит дырчатый лист, который предназначен для обеспечения равномерного распределения пара по жалюзийным каналам. Скорость пара в жалюзийном канале при номинальном режиме работы турбины менее 3 м/с. Такая величина скорости почти в два раза ниже критической.

Выход нагреваемого пара из сепарационных пакетов происходит в конический профилированный выхлоп, который имеет переменную площадь и обеспечивает за дырчатым листом постоянное давление пара по высоте. Аналогично организован подвод пара к сепарационным пакетам. Нагреваемый пар при температуре  $t=136^{\circ}\text{C}$  после сепаратора направляется в первую ступень пароперегревателя, где происходит его нагрев отборным паром с давлением  $p=1,85 \cdot 10^6$  Па и температурой  $t=206^{\circ}\text{C}$ ; далее нагреваемый пар при температуре  $t=190^{\circ}\text{C}$  поступает во вторую ступень пароперегревателя. Греющий пар с параметрами  $p=4,2 \cdot 10^6$  Па,  $t=253,5^{\circ}\text{C}$  проходит в трубах сверху вниз. После пароперегревателя нагреваемый пар при  $t=241^{\circ}\text{C}$  направляется в цилиндры низкого давления турбины.

Пароперегреватель СПП-220 М состоит из шестигранных кассет, рис. 2. Кассета включает 37 вертикальных продольно оребрённых трубок  $\varnothing 16 \times 2$ . Греющий пар поступает в кассету сверху, распределяется и течёт внутри трубок, а нагреваемый пар продольно движется межтрубном пространстве. Греющий пар охлаждается внутри трубок,

образуя конденсат, который собирается в нижней части кассеты и отводится по одной трубке. Между первой и второй ступенями имеется перепускной патрубок.

Конструкция первой ступени включает 94 кассеты. Материал труб и ребер – сталь 20, длина оребрённой части труб – 3,9 м. Высота ребер – 8,5 мм, их толщина – 0,8 мм. Шаг труб в кассете – 36 мм. Живое сечение первой ступени для прохода нагреваемого пара составляет  $3,19 \text{ м}^2$ .

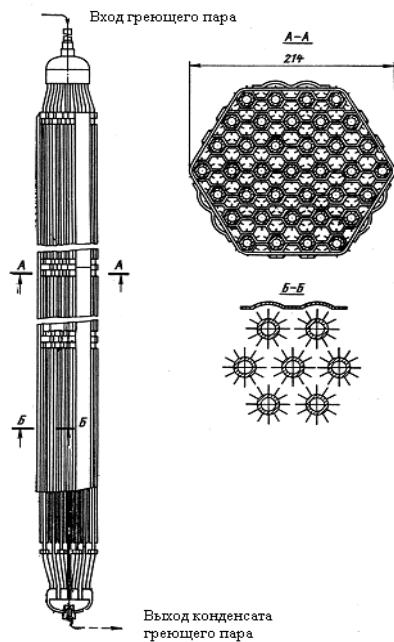


Рис. 2. Кассета пароперегревателя СПП-220 М с продольно оребрёнными трубками

## 2. Расчетный анализ испарения капель влаги в пароперегревателе СПП-220 М

Расход нагреваемого пара на входе в ступень задан равным 118,8 кг/с, давление нагреваемого пара на входе  $3,19 \cdot 10^5$  Па. Расход

греющего пара на входе в ступень принимался равным 8,92 кг/с с последующим уточнением, давление –  $1,85 \cdot 10^6$  Па [1]. В пароперегревателе осуществляется прямоточное опускное движение нагреваемого пара в межтрубном пространстве кассет и конденсирующегося греющего пара внутри труб кассет.

Поверхность пароперегревателя для проведения расчета разбивалась по длине на заданное число шагов (интервалов). На каждом шаге итерационно решалась система двух уравнений – теплового баланса и теплопередачи для нахождения локальных значений температуры нагреваемого пара, стенок трубок пароперегревателя, скоростей нагреваемого и греющего пара, расхода греющего пара и его конденсата, текущих диаметров капель влаги. Теплофизические свойства теплоносителей определялись по средним значениям температур в расчетных интервалах.

Локальный коэффициент теплоотдачи при конденсации насыщенного пара, движущегося в вертикальной трубе сверху вниз, при различных режимах течения пара и при ламинарном и турбулентном течении пленки конденсата определялся по зависимости, предложенной в методических указаниях «Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. РД 24.035.05–89»:

$$\alpha(x) = \text{Nu}(x) \cdot \frac{\lambda'}{\delta},$$

где  $x$  – локальное значение массового расходного паросодержания;  $\text{Nu}(x)$  – локальное значение числа Нуссельта,

$$\text{Nu}(x) = \sqrt{1 + \left[ 0,01 \cdot \text{Re}^{0,83}(x) \cdot (\text{Pr}')^{0,5} \cdot K \right]^2};$$

$\text{Re}(x)$  локальное число Рейнольдса конденсатной пленки,

$$\text{Re}(x) = \frac{(\rho w) \cdot d_{BH}}{4 \cdot \mu'} \cdot (1 - x);$$

$\delta$  – толщина конденсатной пленки, м.

Толщина плёнки  $\delta$  определяется по формуле

$$\delta = \left( \frac{\nu'^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left( a_1^{-n} + a_2^{-n} \right)^{\frac{1}{n}},$$

где  $n = 2,5$ ;  $a_1 = b^{\frac{2}{3}}$ ;

$$b = \left[ 2,28 \cdot \operatorname{Re}(x)^{\frac{3}{4}} + 0,048 \operatorname{Re}(x)^{1,35} \right]^{\frac{2}{3}};$$

$$a_2 = b \cdot \left[ \frac{\rho'(\nu' \cdot g)^{2/3}}{\tau_0(1+C)^2} \right]^{1/2}; \quad \tau_0 = \frac{Cf_0}{2} \cdot \frac{(\rho w)^2}{\rho''} \cdot x^2;$$

$$Cf_0 = \begin{cases} \frac{16}{\operatorname{Re}''(x)} & \text{при } 0 < \operatorname{Re}''(x) \leq 2000; \\ 0,008 & \text{при } \operatorname{Re}''(x) > 2000; \end{cases}$$

$\operatorname{Re}''$  – локальное значение числа Рейнольдса пара;

$$C = \begin{cases} 0 & \text{при } \operatorname{Re}''(x) \leq 2000; \\ 0,9 \cdot X_{tt}^{0,2} & \text{при } \operatorname{Re}''(x) > 2000; \end{cases}$$

$$X_{tt} = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \cdot \left( \frac{\mu'}{\mu''} \right)^{0,1} \cdot \left( \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0,5};$$

$$K = \left[ 1 + \frac{\tau_0(1+C)^2}{\tau_0(1+C)^2 + \rho'g\delta} \right]^{1/2}.$$

Результаты расчёта в каждом интервале использовались в качестве начальных для последующего интервала (шага).

Было определено уменьшение диаметра капель воды  $d$  при испарении в межтрубном пространстве первой ступени пароперегревателя типа СПП-220 М, рис. 3.

### Выводы

1. Установлено, что капли сепаратора начальных диаметров  $d=25-75$  мкм полностью испаряются в первой ступени перегревателя СПП-220 М.

2. Толщина плёнки конденсата греющего пара внутри труб перегревательных модулей первой ступени СПП-220 М не превышает 0,2 мм.

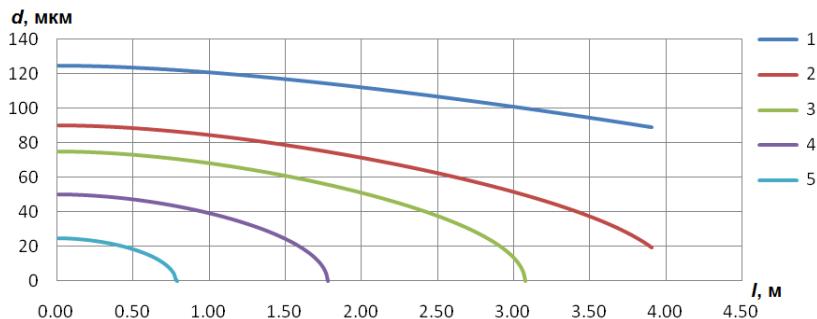


Рис. 3. Уменьшение (по длине трубок перегревателя) диаметра капель воды  $d$  при испарении в межтрубном пространстве первой ступени пароперегревателя типа СПП-220 М; начальный диаметр капель: 1–125 мкм, 2–90 мкм, 3–75 мкм, 4–50 мкм, 5–25 мкм;  $l$  – расстояние от начала перегревательной трубы.

3. Для дальнейшего исследования испарения капель нагреваемой среды в перегревательной части сепараторов-пароперегревателей АЭС необходим синтез результатов расчётов исследований [3] и результатов модельных и натурных теплогидравлических экспериментов [4], в том числе и на влажном паре натурных параметров с пароперегревательными элементами натурной геометрии из натурных материалов.

#### Библиографический список

1. Егоров М.Ю., Готовский М.А., Федорович Е.Д. Повышение эффективности систем сепарации и перегрева пара в турбинах АЭС // Надежность и безопасность энергетики. 2011. № 14. С. 57–64.
2. Results from tests of modernized moisture separator-reheater of K-500-65/3000 turbine plants of the power unit no. 4 at the Leningrad nuclear power plants (NPP) / M.A. Gotovskii, B.S. Fokin, M.Ya. Belenki and oth. // Thermal Engineering. 2012. Т. 59. № 2. Р. 113–118.
3. Liu Y., Qu Z. Numerical investigation of moisture separators with corrugated plates // Energy Procedia. 2017. Vol. 105. P. 1501–1506.
4. Егоров М.Ю. Повышение надёжности сепараторов-пароперегревателей турбин АЭС на основе расчёто-экспериментального моделирования / Наука и инновации в технических университетах: Материалы Одиннадцатого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых учёных. СПб.: Издательство Политехнического университета. 2017. С. 13–15.

# **АНАЛИЗ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СЕПАРАТОРЕ-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕ ТИПА СПП-500 ТУРБИН АЭС ЗМЕЕВИКОВОГО ТИПА**

магистрант **Касаткин И.И.**

канд. техн. наук, доц. **Егоров М.Ю.**

*Санкт-Петербургский Политехнический университет  
Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

**Аннотация.** В работе рассмотрены факторы, влияющие на эффективность осушения пара в жалюзийных сепараторах. Проведен анализ теплогидравлических процессов в сепараторах пароперегревателях змеевикового типа, расчётным путём определены гидравлические потери нагреваемого пара в элементах сепарационной и перегревательной частей аппарата, греющего пара — в перегревательной части.

**Введение.** В турбинах насыщенного пара АЭС сепаратор-пароперегреватель обеспечивает допустимую влажность в цилиндре низкого давления, что повышает надежность и эффективность работы турбоустановки.

Опыт эксплуатации жалюзийных сепараторов-пароперегревателей показал целесообразность совершенствования конструкции аппарата и углубленного изучения протекающих в нем теплогидравлических процессов [1].

Цель работы – анализ гидравлических потерь в сепараторах-пароперегревателях турбин АЭС. Уменьшение гидравлического сопротивления по основному (перегреваемому) потоку пара повышает КПД турбин [2].

В работе выполнен анализ распределения гидросопротивления по нагреваемой среде в сепараторе-пароперегревателе типа СПП-500 со змеевиковым типом перегревателя. Определены потери давления греющей среды в ступенях пароперегревателя.

Конструктивно исследуемый тип сепаратора-пароперегревателя включает в себя входную камеру – для приема пароводяной смеси; направляющие лопатки; жалюзийный сепаратор – для сепарации влаги из влажного пара; двухступенчатый теплообменник-пароперегреватель – для осушки и перегрева нагреваемого пара.

Одной из причин недостаточно полного осушения пара в сепарационной части является наличие мелких капель в потоке пара, которые

с существенной вероятностью могут покинуть сепаратор вместе с основным потоком пара [3].

Значительное количество таких капель образуется в потоке пароводяной смеси вторично. Это может происходить в результате отрыва от капель большего размера (2 на рис. 1), отрыва от пленки жидкости на стенке жалюзи вследствие столкновения с крупными каплями или из-за межфазного напряжения сдвига (3 и 4 на рис. 1) [4].

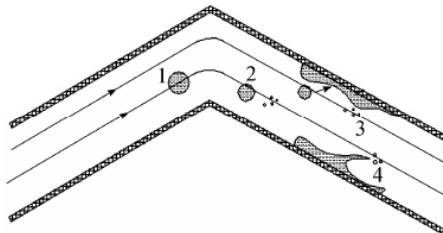


Рис. 1. Вторичное возникновение капель в жалюзийном сепараторе

В сепараторах жалюзийного типа при уменьшении расстояния между сепарационными пластинами и при увеличении скорости потока пароводяной смеси увеличивается эффективность сепарации, но одновременно с этим растут и гидравлические потери нагреваемой среды в аппарате [5].

Эффективность сепарации повышается при использовании дренажных каналов (рис. 2), установленных перед поворотными участками в сепараторе. Такое конструктивное решение обеспечивает отбор сконцентрировавшейся на стенке влаги, уменьшая вероятность повторного уноса капель со стенок жалюзи, но в то же время увеличивает гидравлические потери [6].



Рис. 2. Элемент сепаратора с дренажными каналами

Для проведения гидравлической компоненты расчета проведены оценки тепловых характеристик аппарата [7]. Исследуемый тип сепа-

ратора-пароперегревателя включает в себя входную камеру – для приема пароводяной смеси; направляющие лопатки; жалюзийный сепаратор – для отделения влаги из пара; двухступенчатый перегреватель – для перегрева нагреваемого пара.

Потери давления нагреваемой среды во входной камере, лопатках и жалюзийном сепараторе определены по характеристикам нагреваемой среды:

$$\Delta p_{\text{потерь}} = \Delta p_{\text{вх.кам}} + \Delta p_{\text{лопат}} + \Delta p_{\text{сеп}},$$

$$\Delta p_{\text{потерь}} = f(G_{\text{пп}}^{\text{вх.СПП}}, p_{\text{пп}}^{\text{вх.СПП}}, y_{\text{пп}}^{\text{вх.СПП}}).$$

Для расчета потерь давления использовалась формула Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho,$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления участка;  $\rho$  – плотность среды.

В анализируемой конструкции пароперегревателя нагреваемый пар последовательно перегревается в межтрубном пространстве при поперечном обтекании горизонтально расположенных пучков труб. Греющий пар поступает в пучки горизонтальных спиральных змеевиков (рис. 3).

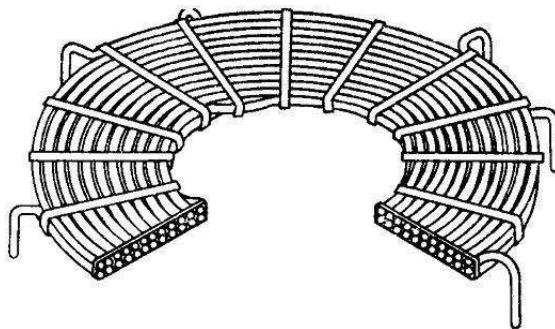


Рис. 3. Двухрядный элемент пучка змеевиковых спиральных труб

Коэффициент сопротивления на один ряд пучка пароперегревателя по нагреваемой среде зависит от режима течения нагреваемого пара [8]:

$$\xi_{\text{на 1 ряд}} = 0,32 \cdot \left(\frac{S_1}{d_1} - 1\right)^{-0,5} \cdot (\bar{s}_1 - 0,9)^{-0,68} \cdot Re_{\text{пучк}}^{\text{ср}}^{-0,2/\bar{s}_1^2}, S_1 \geq S_2,$$

$\bar{s}_1 = \frac{S_1 - d_1}{S_2 - d_1}$ ,  $S_1, S_2$  – шаги труб по высоте, глубине,  $d$ –внешний диаметр трубы.

Потери давления греющей среды складываются из потерь во входном коллекторе, в трубах, соединяющих коллектор с камерой, потеря на трение во входных стояках и спиралях, в отводящих стояках и в трубах, отводящих конденсат из камеры в собирательный коллектор.

Распределение гидравлического сопротивления и его анализ.

Суммарная потеря давления нагреваемого пара

$$\Delta p_{\text{пп}} = \Delta p_{\text{вх.кам}} + \Delta p_{\text{лопат}} + \Delta p_{\text{sep}} + \Delta p_{\text{пучка 1}} + \Delta p_{\text{пучка 2}} + \Delta p_{\text{вых.уч}}$$

$$\Delta p_{\text{пп}} = 5,26 + 1,96 + 0,05 + 4,3 + 8,35 + 1,66 = 21,6 \text{ кПа.}$$

Организованное таким образом распределение гидравлического сопротивления (рис. 4) с существенной долей пароперегревателя (59%) обеспечивает выравнивание поля скоростей в блоке поворотных лопаток на входе в жалюзийный сепаратор и поддержание равномерного поля скоростей в жалюзийных элементах, а также на входе в перегревательную часть аппарата.

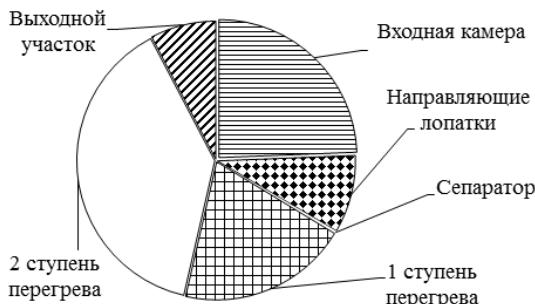


Рис. 4. Распределение потерь давления нагреваемой среды в аппарате

Относительное сопротивление аппарата составило

$$\frac{\Delta p_{\text{пп}}}{\Delta p_{\text{вх}}} \cdot 100\% = \frac{21,6}{335} \cdot 100\% = 6,4\%.$$

Такая величина относительного сопротивления аппарата существенно (на 22%) ниже по сравнению с получившими широкое распространение сепараторами-пароперегревателями с прямотрубными перегревателями. Это принципиально важно, поскольку каждый процент потери давления перегреваемого пара снижает КПД паросилового цикла турбины на 0,05% [1].

Расчётное давление нагреваемого пара на выходе из СПП составило

$$\Delta p_{\text{пп}}^{\text{вых,СПП}} = p_{\text{пп}}^{\text{вых}} - \Delta p_{\text{вых,уч}}; \quad \Delta p_{\text{пп}}^{\text{вых,СПП}} = 0,320 \text{ МПа.}$$

Суммарная потеря давления греющего пара в 1 и 2 ступенях пароперегревателя составила 0,015 и 0,0024 МПа соответственно.

Основную долю от полного сопротивления по греющей среде в пароперегревателе составляют потери на трение во входных стояках и спиральных змеевиках, 97% в первой и 98% во второй ступени.

### Выводы по работе

1. Проведён теплогидравлический расчет конструкции сепаратора-пароперегревателя турбины АЭС по нагреваемой и греющей средам. Получены значения потерь давления по ходу движения нагреваемой среды в сепарационной и перегревательной части аппарата, см. рис. 4.

2. Установлено, что основными компонентами сопротивления нагреваемого пара являются:

- a) входная камера — 24% от общего сопротивления;
- б) трубный пучок 1 и 2 ступеней пароперегревателя — 20% и 39%.

3. При давлении нагреваемого пара на входе в аппарат 0,335 МПа давление на выходе из аппарата составило 0,320 МПа.

4. Относительное расчётное гидравлическое сопротивление аппарата исследованного типа по нагреваемому пару составляет 6,4%, что на 22% меньше, чем сопротивление эксплуатируемых аппаратов типа СПП-500-1 [1].

5. Потери давления греющего пара значительны, в змеевиках 1 ступени длиной 90 м составили ~ 0,015 МПа, в змеевиках 2 ступени длиной 102 м — ~ 0,024 МПа, что способствует устойчивости тепло-

гидравлических процессов, в частности теплообмена, при конденсации греющего пара в длинных горизонтальных змеевиках.

6. Целесообразно проведение дальнейших исследований тепло-гидравлических процессов в системах сепарации и перегрева пара АЭС, направленных на оптимизацию конструкций сепарационных и пароперегревательных элементов, уточнение расчётных рекомендаций [7], описывающих рабочие процессы, и проведение натурных и стендовых испытаний.

### **Библиографический список**

1. Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. Совершенствование системы промежуточной сепарации и перегрева влажнопаровых турбин АЭС: анализ тепло-гидравлических процессов в конструкциях сепараторов-пароперегревателей на основе опыта эксплуатации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 37. С. 339–350.
2. Kolev N.I. Multiphase flow dynamics 5: nuclear thermal hydraulics. // Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 886 p.
3. Structure modification and numerical study of the moisture-separation performance of special crossunder pipe separators for nuclear power steam turbines / X. Wang, P. Cheng, J. Xie, Z. Zhou // Journal of Mechanical Science and Technology. 2015. Vol. 29. № 8. P. 3531–3540.
4. Liu Y., Qu Z. Numerical investigation of moisture separators with corrugated plates // Energy Procedia. 2017. Vol. 105. P. 1501–1506.
5. Li G., Yan Ch., Wang J. Optimization of a moisture separator reheater // Annals of Nuclear Energy. 2014. Vol. 73. P. 537–546.
6. Kavousi F., Behjat Y., Shahhosseini S. Optimal design of drainage channel geometry parameters in vane demister liquid–gas separators // Chemical Engineering Research and Design. 2013. № 91(7). P. 1212–1222.
7. Скворцов С.Д., Егоров М.Ю. Анализ теплопередачи в промежуточных сепараторах-пароперегревателях АЭС // Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбГУ». Институт энергетики и транспортных систем. – Санкт-Петербург, изд-во Политехн. ун-та. 2016. – Ч. 1. С. 84–87.
8. Тепловой и гидравлический расчет сепараторов-пароперегревателей турбин насыщенного пара АЭС. Руководящий технический материал 108.020.107-76// Л.: НПО ЦКТИ, 1976.

---

## **4. СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ**

---

### **НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ И ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА**

магистрант **Бурман Д.Г.**

Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма

**Аннотация.** В условиях развития и повышения энергетической эффективности на промышленных предприятиях горнодобывающей отрасли особое внимание уделяется не только основным технологическим процессам, таким как добыча и переработка руды, но и вспомогательным. Одним из таких энергозатратных процессов является техническое водоснабжение. Доля энергетических затрат этой системы в общем объеме потребления электроэнергии предприятием составляет от 10 до 20%, а сама система обладает достаточным потенциалом для энергосбережения.

В статье рассматриваются основные проблемы построения эффективной системы водоснабжения, направления и методы модернизации данного технологического процесса, на примере Гайского ГОКа, с учетом современных тенденций в области технологии, автоматизации, передачи данных.

Необходимость рассмотрения вопроса построения эффективной и надежной системы связана с тем, что объекты системы технического водоснабжения вводились в эксплуатацию в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века и к настоящему времени морально и физически устарели, перестали отвечать современным требованиям по надежности, безопасности и энергетической эффективности. Одновременно с этим менялась и реальная потребность предприятия в энергоресурсах.

За последние 15 лет производительность по добыче и переработке руды выросла почти в два раза, к 2020г. планируется увеличение добычи руды только на подземном руднике до 9 млн. тонн руды в год.

Анализ энергетических затрат на систему технического водоснабжения Гайского ГОКа показал, что затраты электроэнергии составляют 12%-15% от всего электропотребления предприятия, поэтому обследование всего технологического процесса водоснабжения и поиск возможных путей снижения энергетических затрат были актуальны в данном случае.

Целью проведенной работы являлась разработка некоторых практических мероприятий по оптимизации технологического процесса и реализации комплексной автоматизации системы водоснабжения горно-обогатительного предприятия с целью повышения энергетической эффективности процесса и оптимизации по критерию минимума затрат на единицу вырабатываемого ресурса.

При выполнении работы ставились следующие задачи:

1. Проведение анализа и энергетического обследования системы технического водоснабжения.

2. Определение оптимальной схемы водоснабжения потребителей промышленной площадки;

3. Определение реальных потребностей в технической воде и подбор энергоэффективного оборудования насосных станций водовода;

4. Создание концепции АСУТП (САУ) с максимальной степенью автоматизации технологического процесса перекачивания промышленной воды.

5. Рассмотрение вопросов, связанных с внедрением автоматизированной системы технического учета (АСТУЭ) и автоматической системы диспетчерского управления энергообъектами (АСДУЭ) в части, относящейся к системе технического водоснабжения.

Результатом решения вышеуказанных задач должно стать формирование пакета мероприятий по повышению надежности и энергетической эффективности системы технического водоснабжения предприятия, а также их технико-экономическое обоснование.

Был проведен анализ показателей работы и энергетическое обследование системы технического водоснабжения (СТВС). В результате были обнаружены проблемные места, на которые необходимо обратить внимание в первую очередь и намечены дальнейшие действия.

*Небаланс в системе водоснабжения и водоотведения.* В настоящее время оборотная система обогатительной фабрики (ОФ) служит приёмником для следующих водных потоков: шахтный водоотлив, подотвальные воды, все промышленные, ливневые и паводковые воды. Такая схема позволяет повторно и полезно использовать эти водные потоки для подпитки оборотной системы ОФ. Дополнительно шахтный водоотлив и подотвальные воды выполняют ещё одну важную функцию – с их помощью поддерживается оптимальный водородный показатель (рН) оборотной воды ОФ. У существующей схемы есть и недостаток – объёмы поступающих в оборотную систему ОФ водных

потоков превышают объёмы естественных потерь воды. На сегодняшний день небаланс составляет порядка 3 млн. м<sup>3</sup> в год.

Для исключения небаланса в системе водоснабжения особое внимание стоит уделить проблеме создания замкнутой системы водоснабжения предприятия, как наиболее правильному пути реконструкции водного хозяйства [7]. Учитывая химический состав воды шахтного водоотлива, подотвальных вод и воды оборотного цикла обогатительной фабрики, необходимо понимать, что при создании замкнутой системы водоснабжения не обойтись без строительства очистных сооружений. В зависимости от качества исходной воды необходимо подобрать технологию очистки, но чем сложнее химический состав, тем выше стоимость сооружений. Поэтому на предварительном этапе проводилось тестирование технологических схем очистки дебалансных вод с проведением пилотных испытаний, в которых в качестве исходной воды использовалась вода шахтного водоотлива и смешанная, осветленная вода оборотной системы обогатительной фабрики. Второй вариант оказался более предпочтительным.

*Физически изношенные сети.* Протяженность сетей технического водоснабжения предприятия диаметром от 50мм до 700мм составляет около 80 км. Контроль за их состоянием, своевременное предотвращение утечек, замена изношенных участков с применением труб из полимерных материалов, а так же надежной запорной арматуры – это те обязательные требования, которые позволяют добиться экономии воды.

*Переразмеренное насосное оборудование насосных станций.* Полнение СТВС чистой водой осуществляется от насосных станций водовода (1, 2 и 3 подъемов) из р.Урал. Насосные станции были введены в эксплуатацию в 1970 г. и с тех пор не подвергались реконструкции или модернизации, несмотря на введение обратных циклов и уменьшение потребления чистой воды. Кроме этого следует отметить использование насосных агрегатов 200Д90 (производительность 720 м<sup>3</sup>/ч, напор 90м) с асинхронными электродвигателями 250кВт и 20Д6 (производительность 1950 м<sup>3</sup>/ч, напор 100м) с синхронным электродвигателем 800кВт (аналог Д2000-100). Характеристики насосов перекрывают диапазон потребления воды в течении года (от 450 м<sup>3</sup>/ч до 1300 м<sup>3</sup>/ч), но обеспечивается это их работой в режимах далеких от номинальных. В зависимости от расхода в работе находится один насосный агрегат. Насосное оборудование переразмерено не только по производительности, но и по напору, так на насосной станции 2-го подъема установлены насосные агрегаты создающие напор 90 м, стан-

ция работает на открытый резервуар насосной 3-го подъема. Уточнение высотных отметок при помощи более точного оборудования показало результат - 74м.

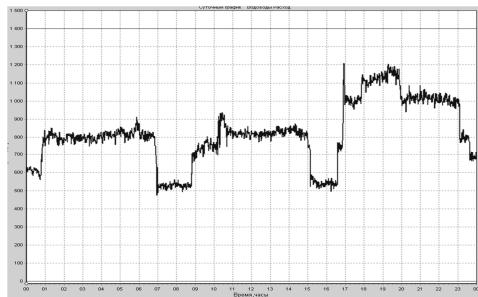


Рис.1. Суточный график потребления чистой технической воды предприятием.

Несоответствие характеристик насосного оборудования реальным потребностям – одна из распространённых ошибок при выборе насосов. Для сохранения энергетической эффективности процесса перекачивания воды не рекомендуется устанавливать насосные агрегаты с запасом или на перспективу. Потери электроэнергии в случае работы в неноминальных режимах могут быть колоссальными. Для насосных станций Гайского ГОКа было выбрано решение с заменой всех насосных агрегатов. На каждой станции предполагается установка четырех насосов, но поскольку диапазон расходов слишком велик для обеспечения его одним агрегатом, предлагается использовать пару насосов. Таким образом, одна пара насосов будет рабочей, а другая – резервной. Данная схема обеспечит работу насосного оборудования в режимах близких к номинальному и необходимое резервирование. Решение о параллельной работе насосов было применено уже на первом этапе работы. На насосной станции 3-го подъема при расходах выше 800 м<sup>3</sup>/ч в работу включался еще один дополнительный насос 200Д90, регулирование производилось на напорной стороне, путем оперирования задвижками добивались близких по значению токов нагрузки на каждом агрегате. Экономия электроэнергии при таком режиме работы составила 82 000кВт·ч в месяц.

*Неэффективный способ регулирования производительности насосных агрегатов.* Регулирование производительности осуществляется гашением части напора задвижкой - дросселированием на напорной стороне, данный способ – один из самых неэффективных [5].

Для обеспечения регулирования производительности насосного агрегата предложено использование регулирования частоты вращения с применением преобразователей частоты (ПЧ). Поскольку замене подвергнутся все насосные агрегаты, то для снижения стоимости преобразовательной техники напряжение электродвигателей принято 400В (в настоящее время 6кВ). В данном случае мощность электродвигателя не превысит 300 кВт.

Изменение уровня напряжения повлечет за собой необходимость реконструкции системы электроснабжения – замену трансформаторов собственных нужд или установку дополнительной комплектной подстанции, прокладку кабельных линий. Учитывая высокую стоимость высоковольтных преобразователей частоты такие затраты будут оправданы.

Для обеспечения покрытия всего диапазона расходов и работы насосных агрегатов в режимах близким к номинальным была выбрана схема с одним рабочим насосом, одним дополнительным. Каждый насос должен будет работать от своего преобразователя частоты, причем при работе одновременно двух насосов они будут находиться в одинаковых условиях, что исключит дополнительные гидравлические потери.

*Отсутствие системы автоматического регулирования производительности.* Регулирование производительности насосных станций производится дежурными машинистами путем оперирования электроприводом напорных задвижек. Основным фактором для регулирования на насосных станциях 1-го и 2-го подъемов является уровень воды в резервуарах насосной следующего подъема. В этом случае отмечаются значительные колебания уровня воды в приемных резервуарах в течение суток, объем резервуара для каждой насосной станции (2 и 3 подъемы) составляет 2000 м<sup>3</sup>. Поскольку насосные агрегаты находятся ниже уровня земли и работают «под заливом», уменьшение уровня может отразиться на их энергетических характеристиках. Наличие максимально возможного уровня в резервуарах, кроме прочего, обеспечивает резервирование при аварийных отключениях электроэнергии.

Для насосной станции 3-го подъема фактором регулирования является давление воды в диктующей точки сети, причем оператор насосной получает сведения о величине давления в этой точке от диспетчера энергоцеха, сам он видит только давление в напорном коллекторе на выходе из насосной станции. Такая ситуация обусловлена наличием промежуточных потребителей между насосной станцией 3-го подъема и промышленной площадкой предприятия.

При создании САУ, в первую очередь, для таких удаленных объектов, как насосные станции 1, 2 и 3 подъемов водовода, необходимо решение вопроса передачей данных и связи. С этой целью разрабатывается проект оптоволоконной линии связи и передачи данных, и его реализация будет необходима.

Система управления должна объединять в себе все насосные станции водовода. Для каждой насосной были выбраны основные технологические параметры, стабилизация которых будет являться для системы управления основополагающей. Для насосной станции 3-го подъема это – давление в диктующей точке сети, но с ограничением по давлению в напорном коллекторе на выходе из насосной станции. Для насосных станций 1 и 2 подъемов – уровень в резервуарах следующей по счету насосной станции так же с ограничением по давлению на выходе из станции. Следует отметить, что для станции 2 подъема дополнительно рассматривался вариант работы насосных агрегатов с устройствами плавного пуска (УПП) и регулированием уровня воды в резервуаре насосной 3 подъема в пределах диапазона 75-100%. Расчет показал, что показатели экономии электроэнергии при применении ПЧ и УПП очень близки по значению. Проводилась оценка количества пуска насосных агрегатов, которая показала, что для месяца с наибольшими расходами (август) количество пусков основного агрегата составит 50, а дополнительного – 217. Использование УПП требует дополнительного изучения по причине возникновения негативных гидравлических явлений, связанных с пуском и остановкой агрегатов.

В условиях развития современной техники создание полностью автоматизированной системы управления не представляет больших проблем, но необходимо понимать, что возникнет необходимость в реализации мероприятий по ограничению доступа на объекты водоснабжения посторонних лиц, видеонаблюдению, пожарной безопасности. Поэтому ставится цель построения автоматизированной системы управления технологическим процессом перекачивания и распределения воды, без постоянного присутствия дежурного персонала на насосных станциях, с максимальной степенью автоматизации, диспетчеризацией объектов и единым центром управления и контроля.

Реконструкции насосных станций водовода уделялось наибольшее внимание, предприятию необходимо было подтверждение экономического эффекта мероприятий. Расчет проводился по методике Лезнова Б.С. [6]. Для подтверждения правильности расчетов использовалась инструкция по расчету экономической эффективности применен-

ния частотно-регулируемого электропривода, разработанная МЭИ и ВНИИЭ, утвержденная Минэнерго РФ в 1997г. По двум методикам были получены сопоставимые результаты. Определялся простой и дисконтированный срок окупаемости который для наиболее предпочтительного варианта составил 3,5 года и 4,5 года соответственно.

Стоит отметить методику Лезнова Б.С. как более полную, позволяющую оценить не только потери электроэнергии при использовании частотного регулирования, но и потери при регулировании задвижкой, потери воды в системе и др.

*Малоэффективные оборотные циклы.* В рамках проведенной работы обследованию подверглись и оборотные циклы водоснабжения. В СТВС предприятия имеется несколько оборотных циклов. Самый мощный из них – это оборотный цикл обогатительной фабрики, его оборот составляет около  $75\ 000\ м^3/сут$ . Далее следуют оборотный цикл компрессорных станций ( $40\ 000\ м^3/сут$ ), система обратного водоснабжения ТЭЦ ( $10\ 000\ м^3/сут$ ) и другие, менее мощные, системы.

Так в системе обратного водоснабжения компрессорных станций №1 и №2 подземного рудника были обнаружено следующее:

- установленные в системе датчики давления не позволяют оценить состояние системы в целом. На компрессорной станции №1 датчики давления на четырех турбокомпрессорах К-250 были установлены в разных местах системы, что кроме неправильного толкования их показаний могло приводить к ложному срабатыванию технологических защит;
- внутренние стенки трубопроводов системы охлаждения имеют значительные отложения;
- не герметичность запорной арматуры и как следствие перетоки охлаждающей воды между подающим и обратным трубопроводами, потери давления;
- отсутствие системы регулирования производительности насосных агрегатов. Количество компрессоров находящихся в работе меняется в течении суток от 3-х до 5-ти, тем не менее даже при отключенном компрессоре охлаждающая вода продолжает циркулировать через его систему охлаждения;
- отсутствие системы фильтрации воды;
- использование открытых резервуаров, несмотря на наличие мигнаградирен. Наличие открытых резервуаров увеличивает потери на испарение и, кроме этого, приводит к тому, что в резервуар осаждается большое количество пыли от проходящих рядом технологических

процессов (погрузка руды в автомобили, проезд большегрузной техники), а повышенная температура воды и солнечный свет вызывают бурное рост водорослей в поверхностном слое;

Учитывая вышеизложенное для компрессорной станции были предложены следующие мероприятия:

1. Замена насосных агрегатов с определением количества одновременно находящихся в работе и применение устройств частотного регулирования.

Система обратного водоснабжения имеет ярко выраженную динамическую характеристику  $H = f(Q)$ . Статическая составляющая в такой системе очень мала, а наклон характеристики обусловлен потерями на трение. Для более эффективного использования средств ЧРП необходимо регулирование этих потерь. Так же необходимо рассматривать и вариант параллельной работы.

2. Регулирование гидравлических характеристик системы путем отключения систем охлаждения неработающих компрессоров.

3. Замена запорной арматуры в системе охлаждения для обеспечения ее герметичности и исключения ненормальных перетоков.

4. Реконструкция градирен. Миниградирни типа «Росинка» позволяют использовать их без слива воды в резервуар, так как это выполнено на предприятии. Объединив трубопроводы слива, можно отказаться от использования резервуаров, тем самым избавиться от потерь, проблем связанных с попаданием пыли и отложений, «цветением» воды.

5. Водоподготовка, борьба с отложениями. При условии выполнения п.4 и уменьшением потерь в системе, появится возможность применения специальных химических средств для использования в оборотных системах (бактерициды, ингибиторы солеотложений и коррозии, поглотители кислорода и сероводорода, пеногасители).

*Несовершенство системы технического учета технической воды.* Учет технической воды выполнен только для крупных потребителей на вводных трубопроводах (обогатительная фабрика и подземный рудник). Кроме этого отсутствует учет внутри этих потребителей с разветвленной сетью, что затрудняет контроль. В настоящее время не имеется возможности проведения балансовых измерений из-за отсутствия приборов учета у потребителей с небольшими расходами. Система учета технической воды, как единое целое – отсутствует, и представлена отдельными приборами. Этого недостаточно для реализации полноценного учета технической воды и текущего контроля за потреб-

лением. В рамках работы и дальнейшего развития АСТУЭ были определены места для установки приборов учета в количестве 62 единиц, которые позволяют контролировать потребление и составлять баланс по предприятию.

Анализируя полученные результаты можно говорить о том, что потенциал энергосбережения системы технического водоснабжения Гайского ГОКа подтвердился и необходимо продолжать работу в направлении совершенствования системы. Перечисленные в статье проблемы свойственны многим предприятиям не только горнодобывающей отрасли и варианты их решения могут отличаться. Но основные пути решения, такие как создание замкнутых систем водоснабжения, применение частотного регулирования, правильный выбор насосного оборудования должны быть основополагающими.

Таким образом, на основании полученных сведений был разработан пакет мероприятий, которые впоследствии могут быть взяты за основу при формировании стратегических планов развития предприятия или программ по энергосбережению и повышению энергетической эффективности.

### **Библиографический список**

1. **Осъкин С.В.** Эффективность применения преобразователей частоты в насосных установках. // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 1 (40). С. 173-176.
2. **Копырин В.С., Бородачкий Е.Г.** Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода. // Силовая электроника. 2006. № 2. С. 20-23.
3. **Багаев Ю.Г., Карпов Н.В., Усачев А.П.** Проблема параллельной работы насоса с частотным регулированием // Водоснабжение и санитарная техника ВСТ. 2014. № 4. С. 10-15.
4. **Сербин Ю.В., Прокопов А.А., Бугров В.П.** Параллельная работа насосных агрегатов при использовании технологии частотного регулирования. // Инженерный центр АРТ. Информационный бюллетень. 2007. № 2. С. 57-65.
5. **Лезнов Б.С.** Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуховодных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
6. **Лезнов Б.С.** Методика оценки эффективности применения регулируемого электропривода в водопроводных и канализационных насосных установках. М.: Машиностроение, 2011. 88 с.
7. Водное хозяйство промышленных предприятий: Справочное издание: В 2-х книгах. Кн. 1 / В.И. Аксенов, М.Г. Ладыгичев, И.И. Ничкова и др.; Под ред. В.И. Аксенова. Москва: Теплотехник, 2005. 640 с.

# АЛГОРИТМЫ МИНИМАЛЬНОГО ОСТОВНОГО ДЕРЕВА В СИСТЕМАХ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

аспирант Темников Д.О.

канд. техн. наук, доц. Суслов Д.Ю.

Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород

**Аннотация.** В данной статье рассмотрен метод трассировки газовых сетей с помощью алгоритма Краскала и алгоритма Штейнера. Продемонстрирован результат работы алгоритмов на примере биометановой сети между сельскохозяйственными предприятиями, расположенными на территории Белгородской области. Определен экономический результат при применении уточняющего алгоритма Штейнера.

В настоящее время при проектировании систем газоснабжения актуальной задачей является использование автоматической трассировки сетей. Автоматическая трассировка позволяет сэкономить время и деньги как на проектирование, так и на строительство сетей, так как задачей автоматической трассировки является сокращение протяженности труб [1].

Процесс автоматической трассировки разделяется на два этапа: глобальная трассировка и детальная трассировка. На этапе глобальной трассировки происходит создание предварительной трассы на основании удельной стоимости метра трубы или стоимости его прокладки, а также суммарная длина всей трассы [2].

Целью данной работы является определение экономически целесообразного способа проектирования газовых сетей на примере сравнения результата автоматической трассировки с помощью алгоритмов Краскала и Штейнера.

Для достижения поставленной цели необходимо произвести адаптацию алгоритмов и сравнение суммарной протяженности.

Построение минимального оставного дерева решается алгоритмизацией и имеет два принципиальных отличия.

1. Построение без дополнительных вершин:

- алгоритм Прима-Краскала;
- алгоритм Борувки;
- алгоритм Дейкстры.

2. Построение с дополнительными вершинами:

- деревья Штейнера (Евклидова плоскость);

- деревья Штейнера (Прямоугольная плоскость);
- алгоритм Мелзака;
- алгоритм Кокейна.

Алгоритм Штейнера для Евклидовой плоскости может найти своё применение в газоснабжении биометаном между сельскохозяйственными предприятиями или для трассировки межпоселковых или магистральных газопроводов, где нет жестко выделенных охранных зон для прокладки, как например в городе.

Алгоритм Штейнера для прямоугольной задачи может использоваться для внутридворовых сетей газораспределения, для которой характерна прямоугольная топология и жестко выделены зоны прокладки.

Е. Гилберт и Х. Поллак показали, что дерево Штейнера способно уменьшить минимальное оставное дерево до 13,4% [3].

Алгоритм Штейнера имеет четыре свойства:

1. Число ребер дерева на единицу меньше суммарного числа исходных вершин и точек Штейнера.

2. Любые два ребра, выходящие из одной вершины, образуют угол не менее  $120^\circ$ .

3. Из настоящей вершины может выходить одно, два или три ребра; если выходит два ребра, то угол между ними больше или равен  $120^\circ$ ; если три, то они образуют между собой углы в  $120^\circ$ .

4. Из каждой дополнительной вершины выходят три ребра с углами  $120^\circ$  (рис. 1).

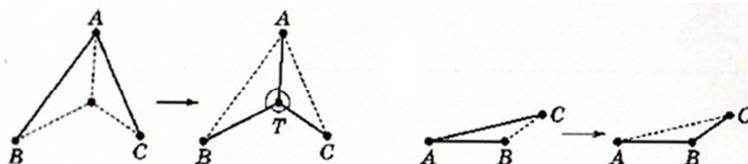


Рис.1. Этапы работы алгоритма Штейнера

Алгоритм Штейнера на основании исходных точек строит множество различных деревьев, удовлетворяющих выше условиям. Некоторые эти деревья называются локально минимальными деревьями. Не каждое локально минимальное дерево является кратчайшим из возможных решений задачи. Для преобразования сети в кратчайшее дерево, называемое глобально минимальным деревом Штейнера, могут

использоваться глобальные изменения перемещения точек. В итоге происходит полный перебор всех возможных локально минимальных деревьев Штейнера для поиска кратчайшего пути (рис. 2). Поскольку происходит постоянное изменение расположение точек Штейнера, время на создание всех минимальных локальных деревьев и их перебор может быть не ограничено.

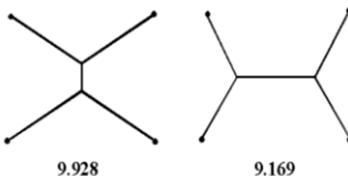


Рис. 2. Относительно минимальные деревья Штейнера

Дальнейшее развитие алгоритма Штейнера получилось у Мелзака, который множество всех точек подразделил на подмножества и в каждом подмножестве применил алгоритм Штейнера.

Задача Штейнера является NP-полной, поэтому алгоритмы этой задачи не могут использоваться в САПР из-за продолжительного времени вычисления. В результате чего разрабатывались эвристические алгоритмы. Одним из успешных является алгоритм последовательного введения дополнительных вершин в дерево Прима-Краскала [4].

Применим алгоритм Краскала и алгоритм Штейнера для проектирования биометанового газопровода между сельскохозяйственными предприятиями Белгородской области (рис. 3).

Общая площадь территории Белгородской области составляет 27 100 км<sup>2</sup>. На территории расположено 136 сельскохозяйственных предприятий. Их мы будем считать узлами графа.

Построим минимальное остовное дерево с помощью алгоритма Краскала (рис. 4). Протяженность построенной сети составляет 2 626,31 км.

Построим дерево Штейнера на основании алгоритма Краскала (рис. 5). Протяженность дерева Штейнера 2548,8 км, что на 77,5 км меньше или 2,95%.

В денежном выражении экономия на рабочей документации при проектировании составляет 37,66 млн.руб и 413,51 млн.руб. при рабочей [5].

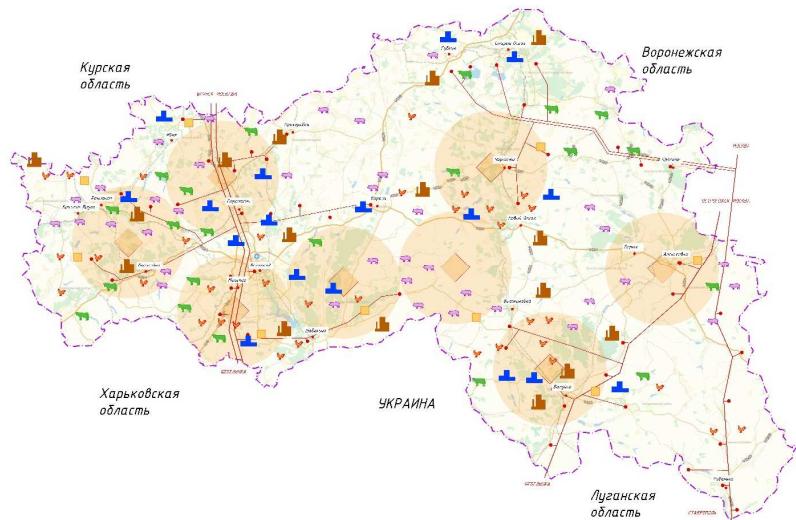


Рис. 3. Расположение сельскохозяйственных предприятий на территории Белгородской области

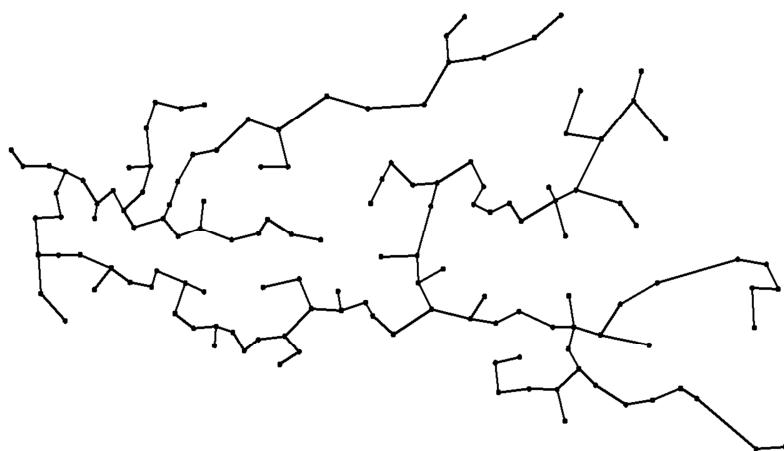


Рис. 4. Минимальное оставное дерево Краскала

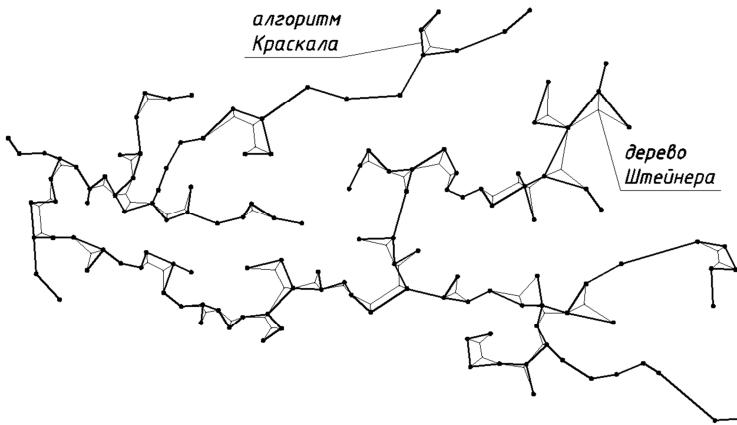


Рис. 5. Дерево Краскала и дерево Штейнера

Используя алгоритм минимально покрывающего оствовного дерева, построена биометановая газовая сеть между предприятиями агропромышленного комплекса Белгородской области. Затем биометановая сеть была уточнена с помощью алгоритма Штейнера.

Можно сделать вывод, что протяженность газовой сети, построенной по алгоритму Штейнера на 77,5 км короче. Таким образом, экономия на строительство сети составила 451,17 млн.руб.

### Библиографический список

1. Суслов Д.Ю., Выродов Г.К. Газодинамический расчет газовых сетей низкого давления с применением САПР // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С.114-119.
2. Н.В. Рыженко. Задача построения дерева Штейнера для этапа глобальной трассировки САПР // Высокопроизводительные вычислительные системы и микропроцессоры: Труды ИМВС РАН. Вып. 4. М., 2003. С. 96–105.
3. Gilbert E.N., Pollak H.O. Steiner Minimal Trees // SIAM Journal on Applied Mathematics. 1968. V. 16, No 1. pp. 1–29.
4. Toward a Steiner engine: enhanced and parallel implementations of the iterated 1-Steiner MRST algorithm / T. Barrera, J. Griffith, S. A. McKee and other // Proc. Great Lakes Symposium on VLSI, Kalamazoo, MI, March 1993. Pp. 90–94.
5. СБЦП 81-02-14-2001 Государственный сметный норматив «Справочник базовых цен на проектные работы в строительстве. Газооборудование и газоснабжение промышленных предприятий, зданий и сооружений».

# **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПНЕВМОСНАБЖЕНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

магистрант **Третьяков Н.В.**  
Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма

**Аннотация.** Настоящий доклад посвящен изложению результатов исследования системы пневмоснабжения металлургического предприятия, рассмотрены вопросы энергосбережения путем разработки мероприятий и рекомендаций с технико-экономическим обоснованием (ТЭО) при обеспечении сталеплавильного производства сжатым воздухом.

Предметом исследования является компрессорная станция с винтовыми компрессорами CompAir L250. Рассмотрен принцип действия автоматической системы регулирования производительности станции, выявлены существенные недостатки, представлены ряд технических решений по повышению эффективного использования электроэнергии при производстве сжатого воздуха.

Исследуемое предприятие относится к отрасли черной металлургии и предназначено для производства широкой номенклатуры углеродистых, легированных, конструкционных и арматурных марок стали для строиндустрии, предприятий нефтегазового сектора и машиностроения. Одной из приоритетных задач предприятия является деятельность, направленная на снижение потребления энергетических ресурсов, что непременно обеспечивает рост финансово-экономических показателей производства.

Актуальность исследования заключается в реализации задач, направленных на повышение эффективности использования применяемых энергоносителей в условиях различных технологических режимов работы сталеплавильного производства, и выявление возможных отклонений в работе оборудования для определения путей и методов оптимизации производственного процесса.

Основной целью работы является проведение анализа системы пневмоснабжения сталеплавильного производства и оценка эффективности использования потребляемой электроэнергии.

Реализация поставленной цели направлена на выявление потенциала энергосбережения, выявление участков с нерациональным расходом энергоресурсов, поиск возможности внедрения энергосберегающих проектов с оценкой их технико-экономической эффективности,

объединить в одну систему рекомендации и технические решения по рациональному использованию энергоресурсов и энергосбережению, создать предпосылки для подготовки комплексного долговременного плана реализации энергосбережения на предприятии [1]. Указанный системный подход и является основополагающей методикой энергетического исследования как предприятия в целом, так и системы пневмоснабжения сталеплавильного производства.

Для обеспечения потребителей осущененным сжатым воздухом на предприятии предусмотрена установка производства осущененного сжатого воздуха, расположенная в отдельном помещении, пристроенном к основному зданию (компрессорная станция).

Производительность компрессорной станции рассчитана для максимального одновременного расхода. Пик потребления обеспечивается наличием буферной емкости. Технические характеристики установки указаны в табл. 1.

Таблица 1  
Технические характеристики установки

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Сжимаемый газ	-	Атмосферный воздух
Температура окружающего воздуха	°C	28
Максимальная температура охлаждающей воды на входе	°C	30
Среднечасовая расчёчная производительность	м <sup>3</sup> /ч	7 000
Рабочее давление	кгс/см <sup>2</sup> (МПа)	6 (0,6)
Остаточное содержание масла в сжатом воздухе, не более	мг/м <sup>3</sup>	0,01
Максимальная концентрация частиц	мг/м <sup>3</sup>	0,1
Максимальный размер твёрдых частиц	мкм	0,01
Точка росы сжатого воздуха	°C	-50

В состав установки входят:

- 4 винтовых компрессора CompAir L250–7,5W, мощностью 257 кВт, производительностью 2465 м<sup>3</sup>/ч и рабочим давлением 7 кгс/см<sup>2</sup> (0,7 МПа) каждый;
- ресивер сжатого воздуха, вместимостью 15 м<sup>3</sup>;
- фильтр предварительной очистки от масла, выносимого из компрессоров;

– 4 холодильных осушителя для предварительной осушки сжатого воздуха CompAir CRD3850, потребляемой мощностью 5,62 кВт;

- фильтр тонкой очистки от масла;
- установка адсорбционной осушки воздуха;
- фильтр пыли.

Атмосферный воздух сжимается винтовыми компрессорами и пройдя через ресивер и фильтр предварительной очистки от масла, поступает на предварительную осушку в холодильные (рефрижераторные) осушители. Здесь часть атмосферной влаги конденсируется и отводится конденсатоотводчиками. Затем, пройдя через фильтр очистки от масла, сжатый воздух подаётся в установку адсорбционной осушки, где достигается осушка от влаги до проектной точки росы - 50°C. Пройдя очистку от пылевых частиц адсорбента в фильтре пыли осушенный сжатый воздух подаётся в заводской коллектор. Функциональная схема компрессорной станции сталеплавильного предприятия представлена на рис. 1.

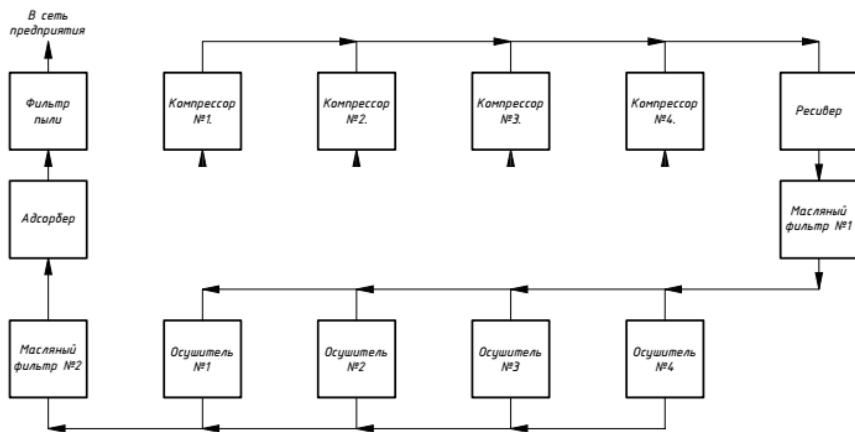


Рис. 1. Функциональная схема компрессорной станции сталеплавильного предприятия

В соответствии с проектом, в работе используется 3 компрессора (четвёртый компрессор в резерве (ТО)/ремонте). Потребление воздуха не равномерное и меняется в зависимости от режима работы сталеплавильного производства, а также от сортамента выпускаемой продукции.

ции и колеблется в диапазоне от 1 800 м<sup>3</sup>/ч до 6 500 м<sup>3</sup>/ч. Схема компрессора CompAir L250 представлена на рис. 2.

Техническая характеристика компрессора CompAir L250:

производительность, м <sup>3</sup> /ч.....	2400;
конечное рабочее давление, МПа.....	0,7;
потребляемая мощность, кВт.....	475;
напряжение, В .....	380;
уровень звукового давления ДБ(А) .....	80 + 3;

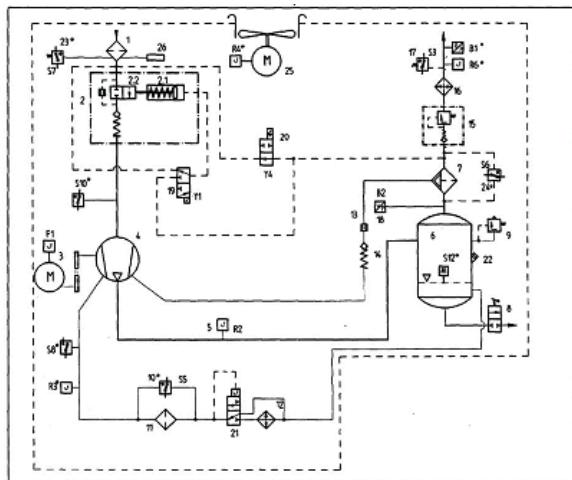


Рис. 2. Схема компрессора CompAir, модель L250

Всасываемый воздух, поступает через воздушный фильтр 1 и регулятор всасывания 2, в винтовую пару 4. Он охлаждается вспрыскиваемым маслом во время процесса сжатия.

Получившаяся воздушно-масляная смесь поступает в бак-сепаратор 6. После предварительного отделения в баке-сепараторе 6 и последующей очистки в фильтре тонкой очистки 7 чистый сжатый воздух поступает через редукционно-обратный клапан 14 в охладитель воздуха 15 и далее в сеть потребления.

Для оценки эффективного использования электроэнергии при производстве сжатого воздуха, проведен анализ режимов электропотребления, компрессорной станции за год. На рис. 3 представлена гистограмма годового удельного потребления электрической энергии с

указанием объема производства сжатого воздуха. Данные получены из существующей системы технического учета.

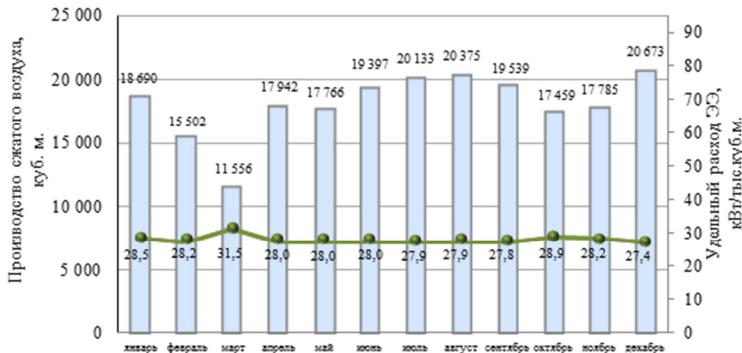


Рис. 3. График годового объема производства сжатого воздуха и удельного потребления электрической энергии

Из графика потребления видно, что величина удельного потребления электроэнергии приблизительно одинаковы средним значением 28,3 кВт·ч/тыс. куб. м. Исключением является март месяц с УЭП 31,5 кВт·ч/тыс. куб. м (на 11,1% выше среднего значения), что свидетельствует о существенном влиянии условно постоянного потребления ЭЭ, не зависящего от объема производства сжатого воздуха.

#### Анализ режимов работы оборудования по производству и подготовки сжатого воздуха в системе энергоснабжения ЭСП

Для проведения анализа режима работы оборудования по производству сжатого воздуха использованы фактические данные по объему производства сжатого воздуха, развиваемому давлению установкой и количеству включенного в работу компрессорного оборудования. Совмещенный график энергетических показателей работы установки представлен на рис.4. По представленным данным на графике, отметим следующие явно выраженные обстоятельства:

1. Величина выходного давления с короткой периодичностью изменяется в пределах от 6,25 кгс/см<sup>2</sup> (0,625 МПа) до 6,7 кгс/см<sup>2</sup> (0,67 МПа) с пиком максимального давления до 6,75 кгс/см<sup>2</sup> (0,675 МПа), что свидетельствует о срабатывании устройства разгрузки компрессора и перевод в режим холостого хода [2].

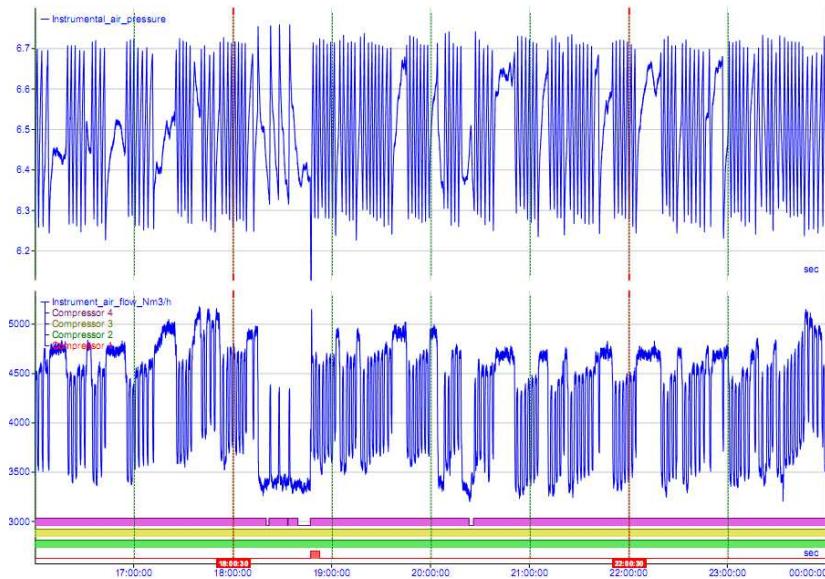


Рис. 4. Совмещенный график энергетических показателей работы установки

2. Величина выходного расхода с короткой периодичностью изменяется в пределах от  $3500 \text{ м}^3/\text{час}$  до  $4800 \text{ м}^3/\text{час}$  с пиком максимального расхода до  $5200 \text{ м}^3/\text{час}$ , что подтверждает свидетельство о срабатывании устройства разгрузки компрессора и перевода в режим холостого хода, при котором выработка сжатого воздуха полностью прекращается.

3. Количество компрессорного оборудования, находящегося в работе, изменяется, присутствует период устоявшегося режима, в котором в работе находятся три компрессора, и присутствует характерный переходный режим (период с 1820 до 1900), при котором система отключает один компрессор на непродолжительный период (от 1 до 10 мин). Далее после существенного падения давления включается третий компрессор и спустя короткий промежуток времени четвертый компрессор. По окончанию переходного процесса, система отключает один компрессор и переходит в установленившейся режим.

Существующая система АСУТП позволяет вести статистический учет режимов работы каждого компрессора с отображением информа-

ции о фактическом времени наработки оборудования, в том числе и режиме разгрузки (холостого хода). Обобщенная информация о фактическом времени наработки в различных режимах представлена в табл. 2.

Таблица 2  
Фактическое времяна наработки оборудования за год.

Режим работы	Номер компрессора				ИТОГО	
	1	2	3	4	час.	%
Под нагрузкой, час.	5 207	6 639	3 554	4 688	20 088	83,9%
В холостую, час.	887	1 245	460	1 252	3 844	16,1%
Общая, час.	6 094	7 884	4 014	5 940	23 932	100,0%

Существующая система автоматического регулирования производительности установки имеет существенные недостатки, обусловленные следующими обстоятельствами:

- при регулировании производительностью установки путем включения режима разгрузки, электрическая энергия потребляется без полезного использования (16,1% фактического времени работы) [3];
- каскадное регулирование (количеством включенных компрессоров) приводит к относительно частому включению и отключению компрессоров, что существенно снижает механический ресурс оборудования (ресурс безотказной работы).
- потребляется дополнительная энергия на поддержание заведомо повышенного значения давления установки в излишне широком диапазоне, при необходимом (достаточном) давлении потребителей в 6,0 кгс/см<sup>2</sup> (0,6МПа).

### Выводы

На основании проведённого исследования системы пневмоснабжения сталеплавильного производства предприятия предложено рациональное мероприятие по повышению эффективности использования электрической энергии в обследуемом объекте за счет:

- применения частотно-регулируемого привода для компрессора №4 с целью реализации возможности регулирования его производительности путем изменения частоты вращения вала электродвигателя [4, С. 127];

– реализация каскадного управления компрессорами, при котором компрессор №4 используется в качестве ведущего. Возможность выбора порядка включения компрессоров в каскаде. В системе управления предусмотреть ввод значений периода автоматической смены очередности включения оборудования;

– требуемая логика управления каскадом: при достижении границы диапазона регулирования частоты вращения вала компрессора №4, его система управления дает команду загрузки/разгрузки (верхняя/нижняя граница диапазона соответственно) одному из ведомых компрессоров в соответствии с приоритетом (очередностью) с возможностью изменения диапазона регулирования;

– руководствуясь сведениями о фактическом времени наработки оборудования за год, отраженными в табл. 2, с учетом планового объема производства сжатого воздуха с момента планируемого года внедрения мероприятия и фактически замеренным инструментальным значениям потребления ЭЭ в различных режимах, используя сведения о существующем тарифе ЭЭ и прогнозного коэффициента роста по годам, произведен оценочный технико-экономический анализ мероприятия по повышению эффективности использования электроэнергии при производстве сжатого воздуха электросталеплавильного производства с дисконтированным сроком окупаемости 3,8 года [5].

### **Библиографический список**

1. Зубарев А. М., Кузин И. А., Хабибова Н. З. Сравнительный анализ эффективности применения винтовых компрессоров // Успехи в химии и химической технологии. 2016. № 2.С. 94-95.
2. Хошимов Ф.А., Рахмонов И.У. Оценка эффективности работы компрессорных станций предприятий [Электронный ресурс] // Universum: технические науки. 2015. 7 с. URL: [https://elibrary.ru/elibrary\\_22966196.pdf](https://elibrary.ru/elibrary_22966196.pdf).
3. Бондаренко Г.А. Регулирование винтовых компрессоров переводом на холостой ход // Компрессорная техника и пневматика. 2004. № 2. С. 13-15
4. Трубаев П.А., Беседин П.В., Гришко Б.М. Проектирование систем воздухоснабжения промышленных предприятий: Учебное пособие. Белгород: изд. БелГТАСМ, 2002. 122 с.
5. Сергеева Д.П. Методы оценки эффективности инвестиционных проектов с учетом рекомендаций Минэкономики // Инновационная наука. 2015. № 9. С. 201-203.

# ОСОБЕННОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ ПОМОЩИ ПАРОВИНТОВЫХ МАШИН

канд. физ.-мат. наук **Худяков П.Ю.**<sup>1,2</sup>

канд. техн. наук **Кисельников А.Ю.**<sup>1,2</sup>

магистрант **Бурков А.В.**<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма;

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург;

<sup>3</sup>ООО «Медногорский медно-серный комбинат», г. Медногорск.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы выбора способа утилизации вторичных энергоресурсов предприятия цветной металлургии. Энергоресурсом с наибольшей удельной энергией является водяной пар, получаемый в установках испарительного охлаждения, который используется на собственные нужды и на теплофикацию. С целью повышения эффективности использования пара, в том числе в летний период, рассмотрены иные способы утилизации тепла, а именно применение паровинтовых машин для производства электрической энергии. Показано, что при неравномерном режиме производства пара, установка паровинтовых машин становится экономически не выгодным мероприятием по повышению энергоэффективности.

Процесс производства черновой меди состоит из множества физико-химических превращений протекающих с выделением и поглощением тепла. В классической технологии получения меди из медного концентрата используется две основных технологии, это варка штейна в шахтных печах и плавка в конверторах.

В результате работы металлургического оборудования выделяется большое количество тепла, которое необходимо утилизировать с целью повышения энергетической эффективности процесса производства цветного металла.

Для обеспечения допустимых с точки зрения температурного режима условий работы оборудования используются установки испарительного охлаждения (УИО), производящие пар средних и низких давлений. Еще одним способом получения вторичных энергоресурсов (ВЭР) является установка охладителей газов для шахтных печей.

Другим способом получения низкопотенциального тепла, в том числе и для целей повышения надежности оборудования, является охлаждение фурменного пояса горизонтальных агрегатов [1].

В классической схеме утилизации тепла металлургических агрегатов пар, полученный в УИО, используется на собственные нужды комбината и для нагрева воды в системах отопления зданий и сооружений. Подобный способ утилизации является наиболее простым с точки зрения технической реализации и позволяет в зимний период практически полностью отказаться от других источников теплоснабжения.

Вторым возможным вариантом использования пара является производство электрической энергии.

Рассмотрим подробно каждый из вариантов утилизации тепла пара. В случае использования пара только на собственные нужды и на теплофикацию возникают потери энергии связанные с необходимостью регулирования давления при помощи дросселирования. А также в летний период, когда теплофикационная нагрузка отсутствует, возникает необходимость сброса излишков пара в атмосферу. Использование же абсорбционных холодильных машин для производства холода из избыточного тепла пара в период использования систем кондиционирования экономически не выгоден по причине больших капитальных затрат на оборудование и низких тепловых показателей ВЭР.

Вода, используемая в УИО имеет невысокие требования по качеству водоподготовки и низкую стоимость, что делает невыгодным установку каких-либо систем охлаждения пара и возврата конденсата в цикл.

При таком количестве недостатков использование пара ВЭР на теплофикацию и собственные нужды по-прежнему остается наиболее предпочтительным вариантом работы комбинатов, т.к. не требует дополнительных вложений с большим сроком окупаемости.

Произведем технико-экономическую оценку еще одного способа утилизации тепла пара УИО, а именно, производство электрической энергии. В качестве исходных данных возьмем паспортные значения характеристик оборудования. Максимальное избыточное давление пара составляет  $P = 1,2$  МПа, максимальная температура  $T = 195^{\circ}\text{C}$ , расход составляет 30 т/ч.

Исходя из параметров пара, используя H-S диаграмму [2], можно сделать вывод, о том, что пар находится близко к линии насыщения, что делает не целесообразным использование паровых турбин в качестве привода генератора.

Проанализировав существующие технические решения по выработке электрической энергии из пара можно сделать вывод, что наибо-

лее приемлемым вариантом является использование паровинтовых машин, как теплового двигателя [3].

Для оценки сроков окупаемости установки паровинтовой машины (ПВМ) воспользуемся усредненными данными рабочих характеристик ПВМ приведенных в таблице 1.

В качестве оценочной стоимости внедрения и эксплуатационных затрат примем следующие значения, приведенные в таблице 2.

Таблица 1  
Рабочие характеристики ПВМ

Давление(абсолютное), кгс/см <sup>2</sup>		Расход пара, т/ч	Мощность, кВт
впуска	выпуска		
13	4,5	7–20	0–630
13	2	7–20	0–1000
12	4,5	7–17	0–500
10	4,5	7–14	0–370
8	4,5	7–13	0–240
6	4,5	7–9,5	0–150

Таблица 2  
Затраты на внедрение и эксплуатацию

Мощность ПВМ, кВт	Стоимость оборудования и работ по внедрению, тыс. руб.	Эксплуатационные затраты, тыс. руб./год
500	33500	820
630	35500	840
800	38500	870
1000	43500	890

Для оценки срока окупаемости примем усредненное значение за-купочной стоимости 1 кВт·ч электрической энергии на оптовом рынке равное 2,5 руб. Ежегодная наработка ПВМ принимается равной 8424 часа с учетом профилактических работ и прочих остановов.

Ежегодная выработка электроэнергии будет определяться по формуле:

$$W = P \cdot t \quad (1)$$

где:  $W$  – вырабатываемая электрической энергия за год, кВт·ч;  $P$  – мощность ПВМ, кВт;  $t$  – ежегодная наработка, час.

Простой срок окупаемости определяется для первых двух случаев рабочих характеристик ПВМ (табл. 1) при максимальном расходе будет равен 2,7 года и 2,1 года соответственно.

Полученные значения сроков окупаемости безусловно являются инвестиционно привлекательными, однако, учитывая реальные значения выработки и давления пара, полученные с приборов технического учета (рис. 1) можно провести более детальную оценку эффективности внедрения ПВМ.

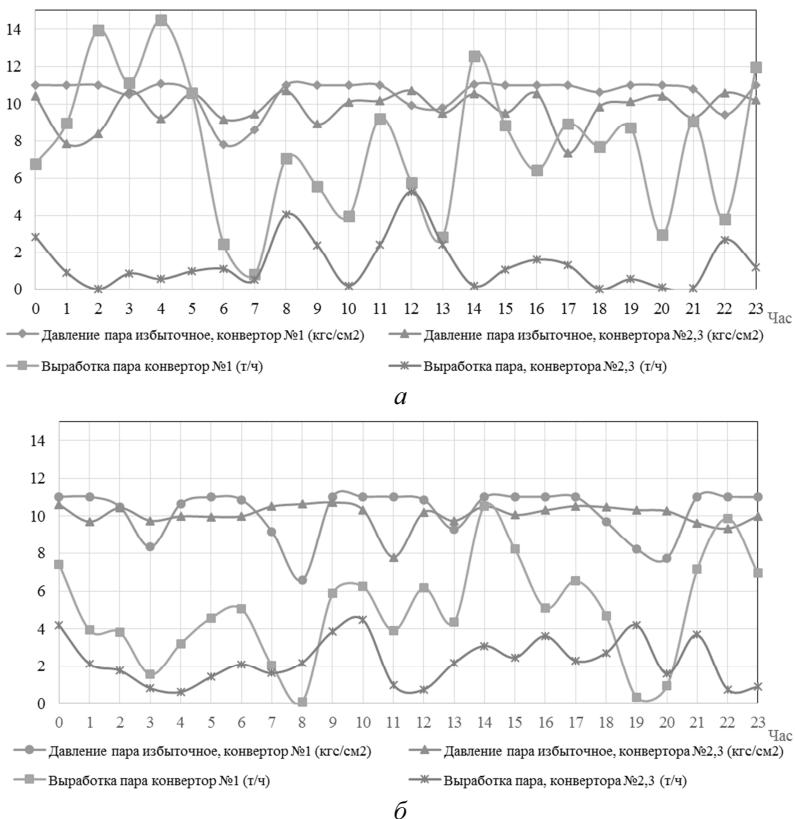


Рис. 1. Суточные графики изменения расхода и давления пара по конверторам  
(*a* – типовой график февраля 2017 г., *б* – типовой график марта 2017 г.).

Следует также отметить, что подобный неравномерный характер выработки и давления связан с особенностями технологического процесса выплавки меди, при котором возможны достаточно длительные остановы оборудования с нулевой выработкой пара.

Проинтегрировав кривую изменения расхода пара в условиях выборки минимума давления по трем конверторам (в случае наличия расхода) получим следующие значения среднесуточной выработки электрической энергии: для абсолютного давления выпуска  $4,5 \text{ кгс}/\text{см}^2$  –  $3612,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ , а для абсолютного давления выпуска  $2 \text{ кгс}/\text{см}^2$  –  $7551,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ .

Рассчитаем среднегодовую выработку из условий времени регламентных работ 14 дней в году, введя поправочный коэффициент невыработки пара по технологическим причинам 0,9. Среднегодовая выработка будет равна –  $1141199,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  и  $2385512,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  соответственно.

В этом случае простой срок окупаемости, с учетом необходимости проведения капитального ремонта через 60 000 часов эксплуатации, будет равен: 25 лет и 11 лет соответственно.

В случае внедрения дополнительных систем утилизации тепла, например охладителей газов шахтных печей можно сократить сроки окупаемости внедрения, но не более чем на 30% из-за ограничений по давлению впуска и максимальному давлению вырабатываемого пара.

В заключение хотелось бы отметить, что несмотря на простоту эксплуатации тепловых двигателей класса ПВМ, целесообразность установки подобного оборудования следует оценивать исходя из реальных графиков выработки пара технологической установкой, которая в отличии от парового котла может иметь резко неравномерную выработку.

### Библиографический список

- 1 Охлаждение фирменного пояса горизонтальных агрегатов / К.В. Булатов, С.А. Якорнов, Д.Ю. Скопин, Н.М. Барсуков // Металлург. 2016. № 1. С. 84-87;
- 2 Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
- 3 Паровая винтовая машина / С.Р. Березин, В.М. Боровков, В.И. Ведайко, А.И. Богачева // Современное машиностроение. 2009. № 1 (7). С. 34-36.
- 4 ООО «ВТ Технологии», Внедрение паровинтовых машин на объектах теплогенерации [Электронный ресурс]. URL: <http://wintoo.ru/docs/ru/presentation.pdf>.

---

## **5. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ**

---

### **ОБЩИЕ ПРИОРИТЕТЫ СОЗДАНИЯ МЕЖОТРАСЛЕВОГО «ГОРИЗОНТАЛЬНОГО» СПРАВОЧНИКА ПО НАИЛУЧШИМ ДОСТУПНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В РОССИЙСКОЙ ЭКОНОМИКЕ**

канд. техн. наук, доцент Гашо Е.Г.

*Национальный исследовательский университет МЭИ,  
Аналитический центр при Правительстве РФ, г. Москва*

**Аннотация.** Рассмотрены проблемы создания единой нормативной базы по повышению энергоэффективности, реализуемой в форме «Наилучших доступных технологий».

В соответствии с Федеральным законом от 21.07.14 № 219-ФЗ крупные предприятия ключевых отраслей промышленности, оказывающие серьёзное негативное воздействие на окружающую среду и потребляющие значительное количество природных ресурсов (они отнесены к категории I), обязаны будут демонстрировать соответствие требованиям наилучших доступных технологий (в том числе, и технологическим показателям) и получать на основе этого комплексные экологические разрешения (КЭР).

Условия КЭР и технологические нормативы будут определяться на основе информации, изложенной в информационно-технических справочниках по НДТ. Ожидается, что проекты модернизации, позволяющие достичь уровня НДТ, смогут получить поддержку Правительства РФ, и будут создаваться условия для локализации производства таких видов оборудования.

Наилучшая доступная технология представляет собой «технологию производства продукции (товаров), выполнения работ, оказания услуг, определяемую на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды при условии наличия технической возможности ее применения».

«Доступные» – это технологии, масштабы разработки которых позволяют их внедрить в соответствующей отрасли экономически и технически осуществимым способом. «Наилучшие» – позволяющие наиболее эффективно достичь высокого уровня защиты окружающей среды. «Технологии» в этом случае охватывают как собственно технологические, так и технические и управленические решения.

Качественное и количественное описание НДТ, характера использования ресурсов, а также выбросов, сбросов загрязняющих веществ, образования и размещения отходов содержится в справочных документах по НДТ, которые разрабатываются для ключевых отраслей экономики и будут пересматриваться не реже чем раз в 10 лет – информационно-технических справочниках.

Они разрабатываются техническими рабочими группами (ТРГ) в составе представителей промышленных предприятий и ассоциаций, федеральных органов исполнительной власти, высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов. Созданное Бюро НДТ координирует их деятельность, сформирована и специализированная платформа – [www.burondt.ru](http://www.burondt.ru).

Практический вектор собственно развитие НДТ получило в России с принятием Федерального закона №219-ФЗ, которым были внесены изменения в закон «Об охране окружающей среды» и введена схема разделения предприятий на разные категории по уровню влияния на окружающую среду с тем, чтобы стимулировать постепенный переход на НДТ, начиная с оказывающих наиболее значительное влияние. Таким образом были прописаны рамки механизма, которые необходимо дополнить собственно информационно-техническими справочниками как «вертикальными» (по отдельным отраслям), так и общеметодическими, «горизонтальными». «Горизонтальные» справочники, в частности, справочник наилучших доступных технологий энергетической эффективности, не носят отраслевой специфики и применимы для любых секторов и отраслей, имея дело с определенными технологическими аспектами, свойственными различным сферам деятельности.

Логика развития применения ИТС НДТ в России приведена на рис. 1. Если обратиться к новому экологическому законодательству и проанализировать предприятия с его позиций, интегральная доля предприятий I группы в общем потреблении ТЭР и загрязнении окружающей среды довольно значительна (табл. 1).

Обработка данных 4200 российских предприятий<sup>1</sup> позволила сгруппировать их по уровню технологической и энергетической эффективности.



Рис. 1. Эволюция применения наилучших доступных технологий в России

Таблица 1  
Интегральные характеристики предприятий I категории (219-ФЗ)

«На входе»	«На выходе»
17 % занятых	—
68,7 % воды	68,7 % стоков
18 % земли	79,8 % отходов
52 % топливно-энергетических ресурсов	75 % выбросов в атмосферу

Классификация российских предприятий по энергоресурсной эффективности позволяет определить величину основных групп, их точную отраслевую приписку, и предложить адекватную политику для перехода предприятий в более благоприятные группы по показателям энергоресурсной эффективности и экологической безопасности. В группу лидеров вошли порядка 20% компаний различных отраслей (рис. 2).

<sup>1</sup> Оценка на основе обработки базы данных 4200 предприятий: <http://interfax-era.ru/reitingi-predpriyatiu/fundamentalnaya-effektivnost/sredneotraslevye-znacheniya>

Примерно 20% предприятий имеют показатели энергоресурсной эффективности выше средних, около 36% – средние, и 44% – ниже средних. Таким образом, четко ясна ключевая задача государственной политики – подтягивать отстающих в ядро «середнячков», а оттуда далее наращивать группу лидеров. Согласно проведенным опросам Аналитического центра, около 30% предприятий называют ключевым барьером при покупке оборудования отсутствие уверенности в его эффективности. С этой точки зрения появление подобных справочных пособий особенно востребовано в качестве реферативных документов.

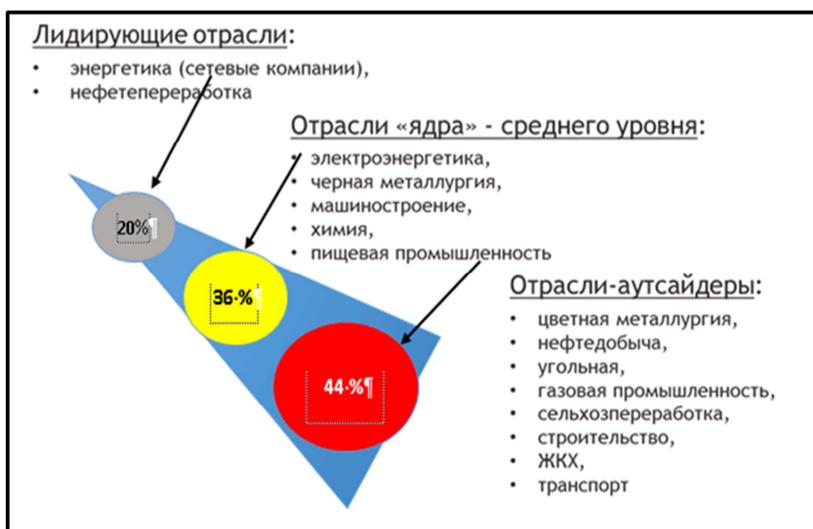


Рис. 2. Распределение отраслей по энергоресурсной эффективности

Экологическое регулирование (снижение негативного влияния предприятий на окружающую среду) весьма тесно связано с повышением энергетической эффективности; значительная доля положительных экологических эффектов достигаются именно за счет реализации мероприятий и программ снижения энергоемкости. Таким образом, горизонтальный справочник по наилучшим доступным технологиям повышения энергетической эффективности имеет и для хозяйствующих субъектов всех отраслей экономики, и для государственной промышленной и экологической политики в целом особое значение.

Впервые справочный документ из серии наилучших доступных технологий («best available techniques») обеспечения энергoeffективности был переведен на русский язык и адаптирован для применения в РФ в 2009 году. Затем он прошел предварительное обсуждение на ряде промышленных предприятий, с чиновниками Росприроднадзора, в экспертном сообществе и в 2012 г. дополнен в связи с выходом регламентирующих документов по энергоменеджменту.

Достаточно неожиданной для специалистов оказалась существенная доля в составе справочного документа нетехнических методов; информационно-мотивационных механизмов, планирования, обмена информацией, процедур энергетического менеджмента; планирование и определение целей и задач; энергoeffективное проектирование; повышение степени интеграции процессов; поддержание мотивации в процессе осуществления инициатив энергoeffективности; поддержание квалификации персонала; обмен информацией; эффективный контроль производственных процессов; техническое обслуживание; мониторинг и измерения; энергоаудит и энергодиагностика; анализ энтальпии и эксергии («пинч-анализ»); термоэкономика; энергетические модели; оптимизация параметров использования энергоресурсов и т.д.

Такая высокая доля «нетехнических» разделов заставляет задуматься о необходимости серьезной методологической проработки различных аспектов процессов энергосбережения, сбалансированности системы мер и базовых стимулов.

В 2015 и в 2016 г. были выпущены 26 ИТС, в том числе, для целлюлозно-бумажной промышленности, производства меди, алюминия, минеральных удобрений, цемента, извести, керамических изделий, стекла, а также справочник по обезвреживанию отходов термическим способом (сжиганию отходов). Впервые были разработаны ИТС, у которых нет международных аналогов – справочники «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях» и «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов». В 2017гг. работа завершается; всего планируется выпустить более 50 ИТС.

Наилучшими доступными технологиями являются те, которые уже показали свою действенность в российских условиях. По опыту нескольких ТРГ спектр НДТ определяется так, что установленным требованиям удовлетворяют 70-85% предприятий. Для остальных тре-

бования являются достижимыми, но предполагают разработку и реализацию программ поэтапной модернизации производства.

Регулирование через справочники по наилучшим доступным технологиям в России с одной стороны, в начале своего пути, а с другой, к этому закладывались предпосылки на протяжении ряда лет. Так, в 2009 г. были разработаны, а в 2010 году утверждены стандарты серии «Ресурсосбережение», направленные на идентификацию ключевых аспектов, планирование показателей (индикаторов) энергоэффективности, описывающие процедуры внедрения наилучших доступных технологий на предприятиях (табл. 2).

Таблица 2

Перечень разработанных стандартов в серии «Ресурсосбережение»

Номер	Название	Особенности и функционал
ГОСТ Р 54195-2010	«Руководство по определению показателей (индикаторов) энергоэффективности»	Стандарт определяет основные показатели (индикаторы) энергоэффективности при производстве продукции (удельные расходы топливно-энергетических ресурсов, КПД)
ГОСТ Р 54196-2010	«Руководство по идентификации всесторонних аспектов энергоэффективности»	Стандарт определяет всесторонние аспекты энергоэффективности как наиболее важные влияющие факторы с точки зрения энергетического баланса, удельных расходов топлива, иных показателей энергетической эффективности при производстве продукции
ГОСТ Р 54197-2010	«Руководство по планированию показателей (индикаторов) энергоэффективности»	Стандарт определяет принципы планирования показателей (индикаторов) энергоэффективности при производстве продукции
ГОСТ Р 54198-2010	«Руководство по применению наилучших доступных технологий для повышения энергоэффективности»	Стандарт определяет общие принципы, особенности и условия перехода на наилучшие доступные технологии при производстве продукции.

С подходом по внедрению наилучших доступных технологий в промышленном комплексе перекликаются и нормативные правовые акты по государственной поддержке энергоэффективных технологий и оборудования. При этом практика последних лет показывает, что далеко не многие предприятия смогли воспользоваться системой льгот, предусмотренной предыдущими поколениями указанных постановлений. В настоящее время продолжается совершенствование списка и механизма реализации постановления № 600 от 17.06.2015 г., которое призвано учесть уроки прошлых документов и дать, с одной стороны, бизнесу реальные стимулы для энергоэффективной модернизации, а с другой – стимулировать отечественных производителей к наращиванию производства энергоэффективного оборудования.

На справочники наилучших доступных технологий сегодня возлагаются оправданные надежды профессионального сообщества как в плане уровня комплексности и сбалансированности государственной позиции по НДТ, так и с точки зрения непосредственного участия всех заинтересованных сторон.

К примеру, не установив изначально четкие границы исследуемой системы, мы натыкаемся на первый важный методический вопрос, какие показатели взять за меру энергетической и экологической эффективности (табл. 3).

Таблица 3  
Перечень показателей энергоресурсной эффективности

Показатели эффективности	Способы определения показателей
Видимый расход топлива, к.п.д. установки (системы)	$B_{\text{вид}} = B_{\text{факт}} / G_{\text{прод}}$ , $\eta = Q_{\text{полезн}} / Q_{\text{полн}}$
Удельный расход с учетом регенерации и утилизации вторичных энергоресурсов	$B_{\text{уд}}^* = (B_{\text{вид}} - B_{\text{рег}}) / G_{\text{прод}}$
Удельные отходы и выбросы на единицу продукции (топлива)	$w = W_{\text{полн}} / G_{\text{прод}}$ $w = W_{\text{полн}} / B_{\text{уд}}$
Удельные отходы и выбросы на единицу топлива с учетом регенерации	$w^* = W_{\text{полн}} / B_{\text{уд}}^*$
Удельные отходы и выбросы на единицу основной продукции с учетом вторичной продукции (пар, электроэнергия, холод)	$w^* = W_{\text{полн}} / (G_{\text{прод}} + D_{\text{вторичн}})$

Прим.:  $B$  – расход топлива;  $G$  – производительность агрегатов;  $W$  – выбросы;  $\eta$  – коэффициент полезного действия;  $Q$  – выработка теплоты; символом « $*$ » обозначены значения этих показателей с учетом утилизации вторичной энергии

Возникают в процессе разработки справочника и другие немаловажные вопросы, как например, где, на какой цифровой отметке выбранных показателей, необходимо поставить границу «наилучших» технологий. От этого будет зависеть, насколько сложно и дорого обойдется предприятиям переход на НДТ, и какая их доля будут признаны, фактически, неэффективными на момент старта кампании.

Говоря о целях нового «горизонтального» справочника по НДТ обеспечения энергоэффективности, следует упомянуть, прежде всего, нахождение и реализацию различных резервов повышения энергетической эффективности в отраслях промышленности. Кроме того справочник послужит согласованию темпов энергосбережения и «средней линии» энергоэффективности в разных отраслях.

### **Библиографический список**

1. Практическое пособие по выбору и разработке энергосберегающих проектов / Под общ. ред. О.Л. Данилова, П.А. Костюченко. М.: Технопромстрой, 2006. 668 с.
2. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Изд-во МЭИ, 2007. 632 с. (Серия «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника». Книга 4)
3. Наилучшие доступные технологии и комплексные экологические разрешения: перспективы применения в России / Под ред. М.Бегака. М.: ЮРИнфоП-Пресс, 2010. 218 с.
4. Справочный документ по наилучшим доступным технологиям обеспечения энергоэффективности [Электронный ресурс]. М.: ЭкоЛайн, 2012. 458 с. URL: <http://ecoline.ru/energy-efficiency-2012/>.
5. Типовые мероприятия по энергосбережению и повышению энергетической эффективности систем энергоснабжения и энергопотребления в бюджетных учреждениях. Методические рекомендации. – Екатеринбург: ГБУ «ИнЭС», 2012. 78 с.
6. Щелоков Я. М., Лисиенко В. Г., Данилов Н. И. Наилучшие доступные технологии обеспечения энергоэффективности энергоемких производств: Уч.-спр. изд. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2014. 202 с.
7. Наилучшие доступные технологии. Применение в различных отраслях промышленности: Сборник статей [Электронный ресурс]. М.: Изд-во Перо. Том. 1 . 2014. 124 с.; Том. 2. 2015. 180 с.; Том 3. 2015 . 172 с.; Том 4. 2016 . 176 с.; Том 5. 2016. 68 с.; Том. 6. 2017 . 144 с. Том. 7. 2017 . 176 с. URL: <http://burondt.ru/informacziya/publikacziy.html?PublishingType=2/>.

# **СПОСОБЫ И АППАРАТЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СТАЦИОНАРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

доц. Губарев А.В.

студент Головков М.А.

студент Дьячук Д.С.

магистрант Бычихин С.А.

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г.Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** В статье обоснована актуальность использования когенерационных установок небольшой мощности для снабжения энергией объектов, не имеющих возможности получать централизованное энергоснабжение. Рассмотрены различные пути и способы утилизации тепла отработавших газов двигателей внутреннего сгорания, а также особенности, преимущества и недостатки различных типов теплоутилизаторов.

В России, как в главной наследнице СССР, весьма велика доля централизации энергоснабжения потребителей различного назначения. При всех своих достоинствах централизованные системы энергоснабжения обладают рядом недостатков. Самым главным из них является наличие дорогостоящих и периодически выходящих из строя систем транспорта энергии (тепловые и электрические сети). Необходимо отметить, что потери энергии в системах транспортировки составляют значительную долю всех потерь в энергосистеме [1]. Также существенными недостатками централизованных систем являются их низкая маневренность, сложность централизованного регулирования отпуска энергии, невысокая эффективность оборудования таких систем и систем в целом [2]. Указанные недостатки централизованных систем обусловливают наблюдающиеся в настоящее время тенденции к увеличению доли децентрализованных систем небольшой мощности [3].

Необходимо также иметь в виду, что в Российской Федерации велика доля районов, централизованное энергоснабжение и топливо-снабжение которых весьма затруднительно. В первую очередь это касается небольших населенных пунктов и исследовательских поселений, расположенных вдали от районов с развитой инфраструктурой.

Решением проблемы энергообеспечения таких объектов является использование местных альтернативных или возобновляемых источников энергии (при их наличии) или организация работы источника

энергоснабжения на тех традиционных видах топлива, доставка которых к указанным объектам является наименее затратной. В качестве таких топлив могут рассматриваться, например, жидкие углеводородные топлива (бензин, дизельное топливо) или сжиженные газы. В этом случае в качестве объектов, генерирующих тепловую и электрическую энергию, наиболее эффективными представляются когенерационные установки. Стоимость выработки электрической и тепловой энергии в таких установках невелика, они могут располагаться в непосредственной близости от потребителя, что позволяет отказаться от систем транспортировки энергоносителей большой протяженности, а также облегчает регулирование отпуска энергии [4].

Актуальным также является использование когенерационных установок в качестве резервных источников энергоснабжения для потребителей тепла первой категории и для потребителей электроэнергии первой и второй категорий.

Основными элементами когенерационной установки являются первичный двигатель, электрогенератор и система утилизации теплоты. В качестве первичного двигателя весьма эффективно и надежно используются поршневые двигатели внутреннего сгорания [5].

Отработавшие газы указанных двигателей обладают весьма высоким потенциалом: их температура в зависимости от типа двигателя, режима его работы и вида сжигаемого топлива может находиться в диапазоне от 350 до 800°C. Использование теплоты отработавших газов позволяет повысить эффективность энергосистемы, уменьшить ее негативное влияние на окружающую среду, а также, в некоторых случаях, приблизиться к созданию малоотходной технологии.

Рассмотрение, анализ и сопоставление различных путей, способов и аппаратов использования теплоты отработавших газов двигателей внутреннего сгорания для выбора наиболее актуального, функционального и дешевого варианта для конкретной мини-электростанции с такими двигателями и условий ее эксплуатации является целью данной работы.

Можно выделить два основных пути использования теплового потенциала отработавших газов двигателей внутреннего сгорания:

- 1) покрытие собственных нужд силового агрегата;
- 2) снабжение тепловой энергией внешних потребителей.

В первом случае за счет использования тепловой энергии отработавших газов при помощи различных устройств, например, паросиловой установки, совершается полезная работа, которая либо передается

непосредственно на коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания, повышая тем самым его мощность и КПД, либо используется для привода различных агрегатов и систем двигателя, например нагнетателей системы охлаждения. За счет рассмотренных выше вариантов использования теплоты отработавших газов мощность двигателя может быть увеличена на 15%, а его КПД повышен на 5...18% [6].

Однако, в контексте вопросов, рассматриваемых в данной статье, более важным представляется второй путь, то есть утилизация теплоты отработавших газов для подготовки теплоносителя, направляемого в последующем на нужды теплоснабжения внешних потребителей с целью покрытия сезонной нагрузки и для горячего водоснабжения.

В качестве теплоутилизаторов в когенерационных установках наибольшее применение нашли водотрубные и газотрубные котлы утилизаторы и газовые водонагреватели, которые могут работать в весьма широком диапазоне температур отработавших газов двигателей. Преимущества и недостатки, а также области применения указанных установок, определяются их конструктивными особенностями.

Так, достоинствами водотрубных котлов утилизаторов, в которых продукты сгорания движутся в межтрубном пространстве, а нагреваемый теплоноситель – в трубах, являются достаточно высокая интенсивность теплоотдачи со стороны обоих теплоносителей и относительно небольшие величины газодинамического сопротивления. Однако в таких агрегатах отсутствует возможность механической очистки поверхностей нагрева с газовой стороны, что значительно сужает область их применения. То есть, в первичных двигателях когенерационных установок с водотрубными котлами утилизаторами могут сжигаться только чистые топлива, не склонные к нагарообразованию.

При сжигании в цилиндрах двигателя топлив, склонных к образованию сажи, более предпочтительным представляется использование газотрубных котлов утилизаторов, в которых газы направляются в трубное пространство. В этом случае очистка поверхностей нагрева с газовой стороны возможна как механическими, так и химическими способами, а в труднодоступном для очистки межтрубном пространстве движется значительно более чистый теплоноситель – вода, прошедшая аппараты водоподготовки. Очистка же межтрубного пространства от накипи вполне эффективно может быть произведена химическими методами. Необходимо отметить, что такие котлы утилизаторы характеризуются низким коэффициентом теплоотдачи со стороны нагреваемого теплоносителя, обусловленными малыми скоростями

его движения. При этом в некоторых зонах возможен застой теплоносителя и интенсивное отложение накипи на наружной поверхности труб, результатом чего при высоких температурах газов может быть пережог таких труб и, как следствие, аварийное отключение котла утилизатора. В связи с вышеизложенным, конструкция таких котлов несколько усложняется из-за наличия элементов, способствующих повышению скорости нагреваемого теплоносителя, особенно в зоне высоких температур газов, например, перегородок, позволяющих организовать многоходовое движение воды в межтрубном пространстве. Еще одним недостатком газотрубных котлов утилизаторов являются обусловленные очень высокими значениями скоростей газов в трубках большие потери напора по газовой стороне, что может обусловить необходимость включения дымососа в состав оборудования когенерационной установки.

Весьма интересная система утилизации теплоты отработавших газов дизельных двигателей внутреннего сгорания, позволяющая повысить энергетическую эффективность и экологическую безопасность мини-электростанции, предложена сотрудниками Луганского машиностроительного института [7]. Согласно предлагаемому решению, в системе утилизации теплоты отработавших газов двигателя внутреннего сгорания на электростанции, включающей в свой состав несколько двигателей внутреннего сгорания и теплоутилизаторов, хотя бы один из теплообменников выполняется в виде каталитического реактора конверсии углеводородного топлива в водородсодержащий газ путем термохимической регенерации теплоты отработавших газов одного из двигателей. При этом более полно используется теплота отработавших газов, экономится углеводородное топливо нефтяного происхождения и снижаются токсичные газовые выбросы в окружающую среду. В качестве недостатков предлагаемого решения можно выделить невозможность применения такой схемы в когенерационной установке, включающей в свой состав один двигатель, а также повышенные требования к безопасности при эксплуатации такой установки, так как водород обладает весьма широкими пределами взрываемости в смеси с воздухом – от 4 до 75%.

Также весьма перспективным представляется использование в качестве утилизаторов тепла отработавших газов двигателей внутреннего сгорания конденсационных водонагревателей, позволяющих не только обеспечить глубокое охлаждение продуктов сгорания, но и их мокрую очистку, в частности, от сажевых частиц. В качестве сложно-

стей, возникающих при использовании таких теплоутилизаторов, можно выделить проблему загрязнения воды компонентами, содержащимися в отработавших газах двигателей. Эта проблема обуславливает необходимость применения промежуточных теплоносителей и дополнительных теплообменных поверхностей, что усложняет и делает более дорогой конструкцию водонагревателя.

Таким образом, при выборе конструкции котла утилизатора или водонагревателя для когенерационной установки, необходимо всесторонне оценить условия его работы, параметры и характеристики теплоносителей, а также произвести теплотехнические и технико-экономические расчеты, которые позволят подобрать наиболее дешевый и эффективный способ утилизации теплоты отработавших газов двигателя внутреннего сгорания и его конструктивное оформление.

### **Библиографический список**

1. Independent Heating Modules With Condensing Hot Water Boilers As Heat Generators As An Effective Alternative To Centralized Heat Supply / V.P. Kozhevnikov, V.A. Kuznetsov, A.A. Mochalin etc. // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2014. Т. 5, № 5. С. 1619–1624.
2. Kuleshov M.I., Gubarev A.V. On Effectiveness And Ways Of Ecological Characteristics Increase Of The Condensation Boiler For Heat Supply Independent Systems // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10, № 24. С. 44872–44878.
3. Перспективы развития рынка конденсационных котлов в России / Г.П. Гриненко, В.П. Кожевников, М.И. Кулешов, А.А. Погонин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 145–149.
4. Выбор схемы утилизации тепла отработавших газов поршневых ДВС и оценка полезного теплоиспользования в составе когенерационной установки / В.Р. Ведрученко, В.В. Крайнов, Н.В. Жданов и др. // Омский научный вестник. 2015. № 1. С. 114–119.
5. Гаврилов К.Л. Стационарные и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. М.: ФГБУ УМЦ АПК, 2017. – 320 с.
6. Коваленко Ю.Ф. Повышение эффективности двигателей внутреннего сгорания за счет утилизации теплоты их отработавших газов: Дис. .... канд. техн. наук. Челябинск: ЧВАИ, 2003. 203 с.
7. Пат. 2046979 Рос. Федерация, МПК 7 F 02 G 5/00. Система утилизации теплоты отработавших газов двигателя внутреннего сгорания / В.А. Звонов, В.И. Черных, В.Ю. Баранов и др.; заявитель и патентообладатель Луганский машиностроительный ин-т. № 5037595/06; заявл. 15.04.92, опубл. 27.10.95, Бюл. № 17/2000.

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ СЕРИЙ ЦИНКА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ**

магистрант **Мехонцев М.В.**  
Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма

**Аннотация.** На основе результатов анализа электромагнитных процессов показана линейная зависимость глубины регулирования от коэффициента мощности при фазовом управлении выпрямительных агрегатов электролиза цинка. Показан новый способ управления электрическим режимом работы электролизных серий, технический результат которого заключается в упрощении системы электроснабжения, снижении ее гармонического воздействия на питающую сеть и потребителя, а также оптимизации режима работы системы по потреблению из питающей сети реактивной мощности..

В настоящее время, когда каждая новая тонна первичных энергетических ресурсов обходится существенно дороже, чем ранее добывая, неизмеримо возросла роль энергосберегающей политики. Несмотря на первые успехи энергосбережения в развитых странах, мир в целом остается весьма энергорасточительным.

Одной из важнейших в политике энергосбережения является проблема снижения потерь и повышения качества электрической энергии в электрических сетях, питающих установки энергоемкой электротехнологии (электролиза цинка и др.), где потребление энергии осуществляется на постоянном токе.

Цель работы: исследование влияния способов управления выпрямительными агрегатами электролизных серий цинка на энергетические показатели преобразовательной подстанции.

Условием для электролизных серий цинка, как потребителя постоянного тока, является не только получение надлежащего количества электрической энергии, но и обеспечение управляемости технологического процесса. Поэтому и преобразовательная система должна быть управляемой.

В настоящее время для регулирования выпрямленного напряжения преобразовательных агрегатов широко применяется переключение отпаек первичной обмотки трансформатора (ПБВ и РПН) механическими, либо тиристорными переключателями (рис. 1), применение трансформаторов и автотрансформаторов с подмагниченными магни-

топроводами (рис.2), комбинированное РПН, сочетающее в себе два перечисленными выше способа, пофазное РПН и т.д.

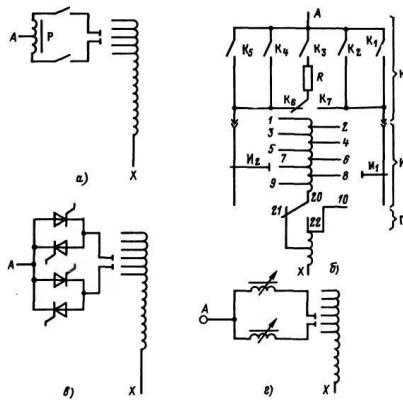


Рис. 1. Схемы устройств ступенчатого регулирования напряжения трансформатора: а) с переключателем реакторного типа; б) с быстродействующим переключателем с токоограничивающим резистором; в) с тиристорным переключателем; г) с управляемыми реакторами

Основными недостатками перечисленных выше способов регулирования напряжения являются:

- 1) дискретность регулирования (для РПН и ПБВ);
- 2) невозможность переключения под нагрузкой (ПБВ);
- 3) увеличение массы, габаритных размеров и стоимость преобразователей (трансформаторы с подмагничиванием и комбинированное РПН).

Широкое распространение в управляемых силовых выпрямителях получил способ фазового управления [1], осуществляяемого либо тиристорными вентильными блоками, либо дросселями насыщения. Применение фазового регулирования обеспечивает плавность управления режимом работы нагрузки. В то же время, фазовый способ регулирования влечет за собой значительное потребление реактивной мощности преобразовательным агрегатом вследствие создания временного запаздывания вентильного тока относительно напряжения питающей сети (рис.3 )[2].

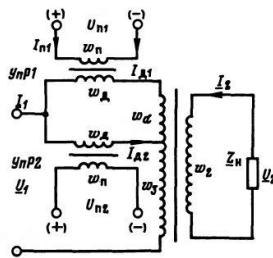


Рис.2 Принципиальная схема бесконтактного РПН с управляемым подмагничиванием реактором

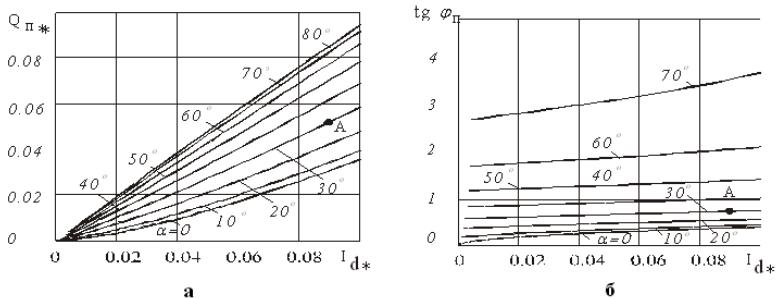


Рис.3. Зависимость реактивной мощности (а) и коэффициента реактивной мощности (б) выпрямителя в точке подключения к питающей сети от выпрямленного тока преобразовательного агрегата  $I_{d*}$  при различных значениях угла управления  $\alpha$

В качестве одного из перспективных средств создания гибких линий электропередач переменного тока (FACTS) можно отметить объединенные регуляторы потоков мощности (ОРПМ - UPFC), представляющий собой два преобразователя напряжения, соединенных последовательно посредством звена постоянного тока (рис.4)[3]. Возможность создания вносимого вольтодобавочным трансформатором напряжения практически произвольной формы, в сочетание с возможностью потребления подключенным параллельно к питающей сети преобразователем напряжения тока, компенсирующего пассивные составляющие потребляемой из питающей системы полной мощности, позволяет говорить о перспективности применения ОРПМ для реше-

ние различных задач в системах электроснабжения. Так в публикациях рассматривается создание на основе UPFC комплексной системы со-пряжения, применяемой в распределительных сетях низкого напряже-ния с автономными источниками электроэнергии.

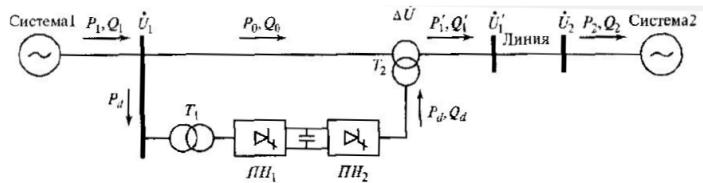


Рис.4. Применение объединенного регулятора потоков мощности для управления режимом высоковольтной гибкой линии электропередач переменного тока

На основе UPFC были разработаны способы управления многофазными симметричными выпрямительными агрегатами (векторное управление выпрямительным агрегатом) (рис.5)[4].

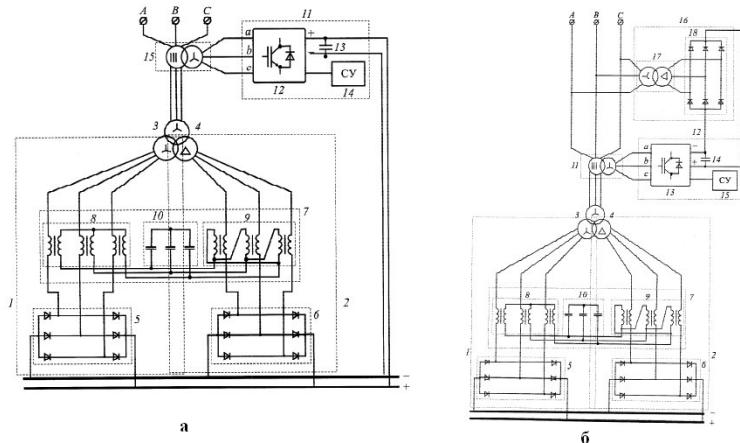


Рис. 5. Способы управления многофазными симметричными выпрямительны-ми агрегатами

Достоинством применения указанных способов управления выпрямительными агрегатами является плавность управления выпрямленным напряжением, возможность дополнительного компенсации

реактивной мощности, потребляемой выпрямительным агрегатом, за счет внесения преобразователями напряжения в силовую часть схему соответствующих составляющих напряжения и тока. Помимо сказанного, следует отметить, что установленная мощность устройств управления, представляющих собой преобразователи напряжения с ШИМ и сглаживающие фильтры, определяется необходимым диапазоном регулирования, что отличает данные способы управления от применения активных выпрямителей, силовое оборудование которых исходя из мощности, потребляемой нагрузкой постоянного тока.

Однако недостатком перечисленных способов векторного управления выпрямительными агрегатами является протекание по обмоткам вольтодобавочного трансформатора высших гармоник тока, потребляемого выпрямительным агрегатом от питающей сети. Это вынуждает вносить в напряжение, формируемого с помощью ШИМ и поступающего на вход фильтра устройства векторного управления (УВУ), дополнительные составляющие, что приводит к увеличению амплитуды задающего напряжения и, как следствие, ограничение диапазона регулирования замкнутой системы управления.

**Выводы.** С учетом всех достоинств и недостатков перечисленных выше способов управления выпрямительными агрегатами при электроснабжении электроприемников постоянного тока, требующих плавного регулирования режима их работы, рациональным является применение ступенчатого регулирования при помощи РПН, а внутри ступени применять плавное фазовое управление выпрямительными агрегатами электролизных серий цинка, так как глубокое регулирование ведет к увеличению потребляемой из сети реактивной мощности, либо применение более перспективного векторного способа управления.

### **Библиографический список**

1. **Хохлов Ю.И.** Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков. Челябинск: ЧГТУ, 1995. 355 с.
2. **Хохлов Ю.И.** Основные и глубокие режимы работы многофазных симметричных некомпенсированных выпрямителей систем электроснабжения. – Челябинск: ЮУрГУ, 2014. 104 с.
3. **Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г.** Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 360 с.
4. Патент 2333589 (Российская Федерация). Способ управления многофазным выпрямительным агрегатом / Ю.И. Хохлов // Бюл. изобр. – 2008. - № 25.

## **ВОЗМОЖНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЖИЛИЩНОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

аспирант **Найман Мих.О.**

канд. биол. наук, доц. **Найман С.М.**

магистрант **Найман М.О.**

*Казанский национальный исследовательский  
технический университет имени А.Н. Туполева,  
г. Казань*

**Аннотация.** Рассматриваются проблемы энергосбережения и энергоэффективности в жилищно-коммунальном секторе экономики. Анализируется существующее положение в областях электроснабжения жилых домов и тарифной политики. Определены перспективные направления для улучшения ситуации в сфере учета и контроля энергопотребления населением.

Процесс реформирования энергетической отрасли вступил в фазу, когда он начал затрагивать бытовой сектор и коммунальную энергетику. Сегодня доля населения в общем объеме потребления электроэнергии в кВт·ч – 13-15 % (в Республике Татарстан в 2015 г. – около 11% [1], в СССР она была не более 8%), а в балансе доходов энергетических компаний в целом по России, из-за существования «перекрестного субсидирования», – менее 8%. Но доля бытового сектора в балансе доходов энергокомпаний постоянно растет, что обусловлено:

- уменьшением объемов перекрестного субсидирования;
- ростом энергоооруженности индивидуальных потребителей;
- сокращением промышленного производства.

Целью данной работы было выявление путей энергосбережения в бытовом секторе экономики страны.

Федеральным Законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», 2009 г., прописывающим правовые, экономические и организационные основы энергосбережения, предусмотрено представление муниципалитетами программ по повышению энергоэффективности (в частности, жилищного фонда и систем коммунальной инфраструктуры), для реализации которых необходимо преодолеть барьеры – административные, поведенческие, институциональные, технологические.

При рыночной экономике впереди идут рыночные механизмы, в частности, конкуренция и материальное стимулирование. Но к кому они применимы, особенно в сфере обращения электроэнергии?

Рассмотрим субъекты розничных рынков электроэнергии для населения. К ним относятся [2] участники отношений по производству (генерирующая компания), передаче (транспортирующая компания), купле-продаже и потреблению электрической энергии на розничных рынках (энергосбытовая организация), а также по оказанию услуг (исполнитель коммунальных услуг), неразрывно связанных с процессом снабжения электрической энергией потребителей (населения).

В современных рыночных условиях целью практически любого вида хозяйственной деятельности является извлечение прибыли, желательно, максимальной.

Поставщики ресурсов не заинтересованы в сокращении расходов этих ресурсов, скорее, даже наоборот, так как сами ресурсы являются производимой ими продукцией. Они могут работать только над сокращением собственных издержек производства [3]. Энергопроизводящие и энергосбытовые организации также не имеют прямой экономической заинтересованности в энергосбережении, во-первых, из-за отсутствия конкуренции, а во-вторых, из-за того, что даже потери электрической энергии в сетях считаются технологическими (естественно, не все). Величина технологических потерь нормируется и включается в себестоимость продукции, тем самым увеличивая конечную цену энергии. В тариф закладывается и сбытовая надбавка поставщиков энергии.

Но потери в электросетях, кроме технологических (10-20 %), бывают и коммерческими, то есть это потери электроэнергии, отпущеной потребителям, но не выставленной к оплате вследствие неправильной работы систем учета, их отсутствия или очень, к сожалению, распространенных у нас хищений электроэнергии. Сюда относятся воровство, бездоговорное потребление и неоплата потребленных энергоресурсов. Доля коммерческих потерь сопоставима с технологическими или даже может превышать их.

Статистика показывает, что вместе с ростом отпуска электроэнергии растут и ее потери. Обязанность компенсации этих потерь лежит сейчас на сетевых организациях, но ведь они не конечное звено цепи, не могут работать в ущерб себе, а поэтому закладывают эту компенсацию в продажную цену электроэнергии другим покупателям, в частности, управляющим компаниям.

Управляющая компания получает электроэнергию в точку поставки и оказывает гражданам коммунальную услугу электроснабжения, то есть приобретает и тут же перепродает электроэнергию. Никак-

кие вопросы энергосбережения в данной ситуации ее не касаются, так как она ничего за это не имеет. Все потери, так же как и любая экономия, ложатся на плечи конечных потребителей, так как общедомовой прибор учета электроэнергии, по которому управляющая компания рассчитывается с энергопоставщиками и по которому берет плату с жильцов, один, и установлен на границе балансовой принадлежности электрических сетей сетевой организации и внутридомовых электрических сетей [4]. Согласно Постановлениям Правительства жильцы платят за электроснабжение, использование электроэнергии на общедомовые нужды (ОДН) – освещение и иное обслуживание с использованием электрической энергии межквартирных лестничных площадок, лестниц, лифтов и иного общего имущества в многоквартирном доме, а также покрывают расходы на компенсацию потерь электроэнергии во внутридомовых электрических сетях. На управляющей компании, как осуществляющей обслуживание внутридомовых инженерных систем, только лежит ответственность за надежность энергоснабжения и качество электрической энергии в пределах границ балансовой принадлежности внутридомовых электрических сетей.

Гражданин-потребитель в процессе выработки и транспортировки электроэнергии он не участвует, поэтому снижать издержки не может. Он также не может купить энергию у другого продавца, у которого цена меньше, – нет возможности, так как тарифы на электроэнергию для населения регулируются государством и цена едина по региону. Для того чтобы уменьшить свои расходы, сэкономить, он только может уменьшить потребление. Сэкономив свои деньги, он опосредованно экономит природные ресурсы. Как он может уменьшить потребление?

Новое законодательство снимает с сетевых компаний убытки, связанные с потерями в домовых сетях, и бремя оплаты потерь электроэнергии лежит теперь (как, впрочем, и прежде, но сейчас это просто более прозрачно) на собственниках и нанимателях жилых помещений либо на управляющих компаниях. И это частично верно, потому что любую услугу, также как и любой товар, в том числе и всю электроэнергию, пришедшую к дому, необходимо оплатить [2].

В состав потребленной энергии входит учтенная энергия, израсходованная жильцами согласно показаниям индивидуальных счетчиков либо нормативам ( $\mathcal{E}_{\text{учт}}$ ), и энергия, израсходованная на общедомовые нужды (ОДН).

Гражданин может платить как по показаниям индивидуального (своего) прибора учета, так и по нормативам потребления. В итоге,

способ экономить свои деньги каждый выбирает сам. Но лично потребляемую электроэнергию, под влиянием экономических стимулов (больше расходуешь – больше платишь), экономит только владелец счетчика.

В расходах на общедомовые нужды, кроме количества энергии, потраченной в местах общего пользования и на работу общедомового оборудования, «сидят» также и потери энергии во внутридомовых сетях и похищенная энергия.

Но если производители и поставщики энергии достаточно успешно борются с хищениями и благодаря наличию приборов учета на входе и выходе энергии, и благодаря наличию бухгалтерского учета, который выявит несоответствие между количеством полученной и отпущененной энергии, и благодаря возможности установить место утечки и нарушителя, и благодаря наличию собственной службы безопасности, то гражданин-потребитель не обладает ни одной из этих возможностей.

Потери электроэнергии во внутридомовых электрических сетях определяются исполнителем коммунальных услуг как разность между объемом электрической энергии, приобретенным на границе балансовой принадлежности электрических сетей сетевой организации и внутридомовых электрических сетей, объемом использования электрической энергии на общедомовые нужды и объемом оказанных потребителям коммунальных услуг

Жильцы не могут лично контролировать и регулировать потери в общедомовых сетях. Это может делать только управляющая компания, например, за счет смены изношившегося кабеля. Но она в этом, опять-таки, не заинтересована, во-первых, из-за дополнительных затрат на материалы, оборудование и проведение работ, и, во-вторых, из-за отсутствия материальной выгоды непосредственно компании – лишняя работа есть, дополнительной оплаты нет.

С хищениями электроэнергии жильцы самостоятельно справиться вообще не могут, так как не располагают никакой информацией о незаконно расходуемой энергии. Судить о ней они могут только косвенно, по непомерно возросшим счетам за электроэнергию. Кроме того, жильцы не имеют никаких рычагов воздействия на расхитителей, не имеют самой возможности выявить нарушителей, особенно среди арендаторов и владельцев нежилых помещений в многоквартирных домах.

Таким образом, несмотря на точнейшие приборы с законодательно установленными классами точности и компьютерный расчет платежей за энергию, строгие учет и контроль на данной ступени переда-

чи и потребления энергии не наложены, здесь существенен «человеческий фактор», что делает возможными значительные злоупотребления как с энергией, так и со счетами за нее. Жильцы остаются совершенно бесправными.

Чтобы создать условия для реализации политики энергоэффективности, провозглашенной в России, активного участия собственников квартир в управлении жилым фондом, эффективного энергосбережения в жилищно-коммунальном комплексе, необходимо улучшить ситуацию в сфере учета и контроля энергопотребления и осуществить следующие мероприятия:

- сформировать конкурентный розничный рынок в коммунальной энергетике;
- внедрять более объективные средства учета потребленной электроэнергии и эффективные средства выявления хищений электроэнергии;
- вводить автоматизированный учет потребленной электроэнергии;
- исключить из тарифа за электроэнергию, устанавливаемого органами государственной власти субъектов РФ, планируемые потери во внутридомовых сетях;
- определить величину потерь во внутридомовых электросетях каждого дома и заменить износившиеся кабель и проводку, чтобы довести технологические потери до нормативных 10%;
- брать плату за ОДН многоквартирных домов не только с граждан-потребителей, но и с владельцев нежилых помещений пропорционально показаниям их счетчиков;
- организации, управляющей многоквартирным домом, один раз в квартал (полгода, год) отчитываться перед потребителями о расходовании ими электроэнергии.

### **Библиографический список**

1. Республика Татарстан. Статистический ежегодник 2015. Казань: Татарстанстат., 2016 340 с.
2. **Найман С.М.** Проблемы энергосбережения в жилищном фонде. // Экономика природопользования, № 6, 2010, с. 47–57.
3. **Гродзенский С.Я., Еманаков И.В., Овчинников С.А.** Бережливое производство – прошлое и настоящее // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 204–207.
4. **Найман С.М.** Проблемы управления энергосбережением в жилищном фонде. // Энергобезопасность и энергосбережение. 2011. № 1. С. 28-31.

# **ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЦИКЛОНАХ ПРИ ОЧИСТКЕ ГАЗОВ ОТ ПЫЛИ**

канд. техн. наук, доц. **Орлов С.М.**

магистрант **Романенко Б.Р.**

Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры г. Макеевка

**Аннотация.** Проведен анализ работы циклона на вопрос повышения эффективности работы циклона с одновременной экономией энергоресурсов. В процессе затраты энергии на закрутку вихревого потока, установлено, что помимо возникновения центробежных сил происходит сильная электризация пыли. Помимо этого, как и в пыльной буре, мелкодисперсная пыль заряжена отрицательно, а крупнодисперсная пыль положительно. Как и в пыльной буре происходит разделение зарядов, в ядре вихря концентрируются мелкодисперсная пыль, заряженная отрицательно, а у стенок циклона, крупнодисперсная пыль, заряженная положительно. Таким образом, в циклоне создается сильнейшее электростатическое поле с четким разделением зарядов. Другими словами, циклон при очистке от пыли, представляет собой мощный трибоэлектрический генератор, энергию которого можно при соответствующей проработке направить на повышение эффективности циклона, без дополнительной затраты энергии.

Защита атмосферы - социальная и экономическая проблема, неразрывно связанная с задачей создания комфортных условий для жизни и работы человека.

Большинство технологических процессов в промышленности строительных материалов, сопровождается пылегазовыми выбросами. Большинство промышленных выбросов содержат ценные полупродукты, которые безвозвратно теряются. Поэтому очистка и обезвреживание промышленных выбросов имеют санитарное и экономическое значение.

Циклоны являются наиболее характерными представителями суших инерционных пылеуловителей, которые, как правило, имеют простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации. Ввиду этих преимуществ циклоны получили широкое распространение [1,2,3,4].

В настоящее время имеется большое количество исследований на вопрос повышения эффективности циклонов, а также создано большое количество видов циклонов, однако добиться, чтобы циклоны использовались, как самостоятельный аппарат очистки газа от пыли добиться

не удалось, поэтому циклоны, как правило, используются для предварительной очистки газа от пыли.

Для повышения эффективности циклонов ведутся работы по совмещению нескольких видов пылеулавливания в комбинированном аппарате.

В основном ведутся работы по совмещению действия центробежных и кулоновских сил. Такие аппараты называются центробежными электрофильтрами, или же электроциклонами.

По месту расположения коронирующих электродов, применяются два вида электроциклонов. В первом виде коронирующие электроды расположены в цилиндрической части циклона (рис. 1, а). Аппараты второго типа отличаются расположением коронирующих электродов в выхлопной трубе (рис. 1, б).

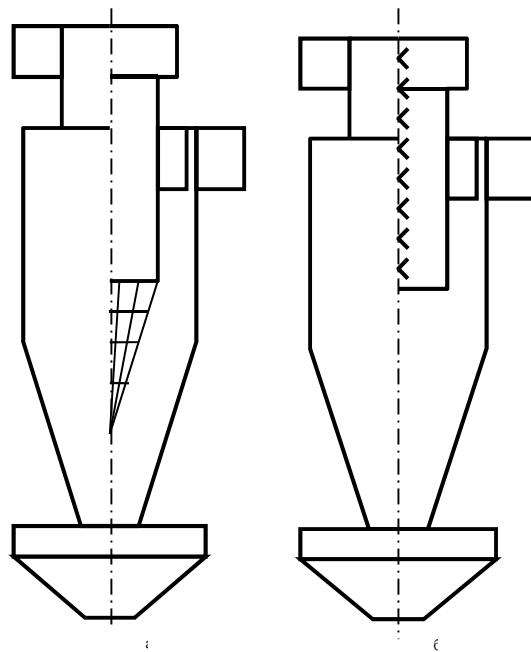


Рис. 1. Схема центробежных электрофильтров

В работе [5] предпочтения отдаются электрофильтрам второго типа.

Но, несмотря на существенные преимущества электроциклонов по сравнению с циклонами, электроциклоны широкого распространения не получили. Это объясняется значительным увеличением затрат на обслуживание и увеличение затрат энергоресурсов на создание электрического поля, что при росте цен на энергоресурсы в настоящее время не допустимо.

Настоящая работа посвящена поиску новых направлений повышения эффективности циклонов за счет более полного использования энергии закрученного потока. В настоящее время энергия, затраченная на закрутку газового потока, используется только в виде использования центробежных сил, действующих на частицу пыли в вихревом газовом потоке. Однако, частицы пыли, попадая в циклоне в мощный вихревой поток и взаимодействуя с молекулами газа и стенок циклона, получают достаточно сильный электростатический заряд.

Статическое электричество появляется в основном при контакте двух материалов и их разделении. Причем уровень электрического потенциала зависит от силы и скорости взаимодействия, удельного электрического сопротивления, диэлектрической проницаемости контактируемых материалов, влажности материалов и атмосферы и др. Причем замечено, что чем выше скорость движения пыли в атмосфере и выше дисперсность пыли, тем выше уровень электризации. Так заряд пыли каменного угля дисперсностью 200 мкм при скорости пылевоздушной среды 2,25 м/с составлял 6 кВ, а при 3,5 м/с уже 7,5 кВ [7].

В циклоне скорость может достигать до 20 м/с и более, поэтому степень электризации пыли в циклоне может достигать значительных величин, вплоть до 102 кВ.

Заряд пыли при транспортировании ее по трубопроводам не равномерный по сечению трубопровода. Наиболее высокий потенциал наблюдается на расстоянии 2 см от стенок заземленного трубопровода.

На способность пыли к электризации основное значение имеет удельное электрическое сопротивление. При удельном электрическом сопротивлении меньше  $10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  пыль практически не электризуется.

Пыль, получаемая при производстве строительных материалов, относится ко второй группе по величине удельного электрического сопротивления от  $10^4$  до  $2 \times 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , которая хорошо электризуется.

Для того, чтобы ориентировочно узнать насколько будет электризоваться пыль, полученная при производстве строительных материалов, существует трибоэлектрическая шкала.

Чем выше располагается материал на шкале, тем сильнее он заряжается. Так в верхней части шкалы располагается атмосфера и руки человека, а в нижней кремний, эбонит, т.е. максимально мощный заряд возникнет при контакте атмосферы и кремния. По электрическим характеристикам кремний наиболее близко стоит с материалами, применяемыми в строительстве. Таким образом, при взаимодействии пыли и атмосферы, пыль строительных материалов получает мощный электрический заряд, который тем выше, чем выше скорость вихревого потока в циклоне.

В циклонах производится процесс очистки газа от пыли, поэтому целесообразно проанализировать электрические процессы, протекающие в пыльных (песчаных) бурях [8, 9].

Пыльные (песчаные) бури возникают даже при слабом ветре, главное, чтобы почва была пересушена и сыпучая. Над поверхностью почвы происходит перемещение, а соответственно и электризация пылинок, причем мелкие частицы, сталкиваясь с более крупными частицами, отнимают у них электроны. Через какое-то время заряды частиц пыли разделяются по крупности. Мелкие частицы оказываются, заряжены отрицательно, а крупные положительно. В дальнейшем мелкие частицы ветром поднимаются выше, создавая отрицательно заряженную область. У поверхности почвы находится крупная пыль, заряженная положительно, следовательно, между этими двумя противоположными объёмными зарядами возникает электрическое поле, напряжённость которого имеет внушительное значение, вплоть до 100 кВ [8, 9].

После возникновения и роста напряженности электрического поля количество взвешенной пыли в атмосфере возрастает уже не за счет ветра, а за счет электрических сил. Причем, это явление происходит взаимосвязано, чем больше взвешенной пыли, тем выше напряженность электрического поля, чем выше напряженность электрического поля, тем больше взвешенной пыли. Такое явление, казалось бы, будет происходить до бесконечности, однако при достижении критического значения напряженности электрического поля, происходит грозовой разряд, который снижает напряженность электрического поля.

Джаспер Кок из университета Мичигана в лабораторных условиях смог при помоши создания электрического поля воспроизвести пыльную бурю [9].

Для современной науки явления такого рода представляют интерес, особенно для процесса сухой очистки газа от пыли.

Еще более мощное электростатическое поле возникает при извержении вулканов, настолько сильное, что выброс пепла сопровождается, как правило, сильными грозовыми разрядами. Здесь электризация в основном происходит за счет резкого перепада температур. Это явление нужно учитывать при обеспыливании газа после сушильных барабанов, обжиговых печей, печей спекания и других технологических процессов производства строительных материалов, где используется высокая температура.

При работе циклона, у внешних стенок присутствует крупнодисперсная пыль, заряженная как в пыльной буре, положительно. В ядре восходящего вихря присутствует мелкодисперсная пыль, заряженная отрицательно. Следовательно, в циклоне, как и в пыльной буре, происходит разделение зарядов. Разница состоит только в том, что в пыльных бурях разделение зарядов происходит в основном за счет сил гравитации, а в циклонах за счет центробежных сил. Таким образом, за счет сосредоточения в ядре вихря частицы пыли с отрицательным зарядом, а у наружных стенок частицы пыли с положительным зарядом, в циклоне образуется мощное электростатическое поле. Это обстоятельство очень важно, поскольку циклон при обеспыливании представляет собой мощный трибоэлектрический генератор, который работает от энергии, затраченной на закручивание вихревого потока в циклоне. Здесь сделаем небольшое отклонение. По мнению многих авторов в циклонах довольно часто происходит коагуляция частиц пыли. Это явление объясняют слипаемостью пыли, однако, если посмотреть на фотографии коагулированных частиц, то можно заметить интересное явление. Налипание в подавляющем большинстве случаев происходит мелких частиц на крупные частицы. Если же происходит слипание крупных частиц пыли, то между ними находятся мелкие частицы. Следовательно, можно сделать вывод, что коагуляция пыли происходит за счет разноименного заряда крупнодисперсной и мелкодисперсной пыли. Слипаемость частиц пыли влияет на стойкость коагулированных агломератов. При слабой слипаемости частиц, после уравновешивания зарядов коагулированные агломераты распадаются. Дальнейшие работы, по мнению авторов, в направлении использования электростатического поля циклона являются перспективными. При соответствующей проработке данного вопроса, можно попытаться электростатическое поле, выработанное циклоном, направить на по-

вышение эффективности циклона. Другими словами, без применения постороннего источника высокого напряжения, совместить в циклоне два вида очистки газа от пыли – центробежный и электростатический.

### **Выводы**

1. Установлено, что пыль, образованная при производстве, транспортировке по воздуховодам строительных материалов подвержена сильной электризации.

2. В циклоне за счет центробежных сил происходит разделение крупнодисперсной пыли, заряженной положительно, и мелкодисперсной пыли, заряженной отрицательно, а соответственно, возникновению внутри циклона мощного электростатического поля.

3. Показано, что циклон при обеспыливании за счет затраченной энергии на закручивание потока помимо создания центробежных сил, действующих на частицы пыли, является еще и мощным трибоэлектрическим генератором, который вырабатывает электрическое поле высокого потенциала, вплоть до 100 кВ.

### **Библиографический список**

1. Гурвиц А.А. Пылеулавливание в металлургии. М.: Изд. Металлургия, 1984. 336 с.
2. Луговский С.И., Дымчук Г.К. Совершенствование систем промышленной вентиляции. М.: Изд. Стройиздат, 1991. 136 с.
3. Русанов А.А. Справочник по пыле- и золоулавливанию. М.: Изд. Энергия, 1975. 296 с.
4. Алиев Г.М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок. М.: Изд. Металлургия, 1988. 368 с.
5. Кущев Л.А. Интенсификация процессов улавливания твердой и жидкой фазы аэрозолей при использовании силовых полей // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2004. 41 с.
6. Орлов С.М., Дмитренко Э.И. Исследование усовершенствованного циклона как первой ступени очистки газа от пыли // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. Горлівка: ДонНТУ, 2011. Вип. 1. С.188-195
7. Свойства, определяющие пожароопасность пылей [Сайт]. URL: <http://libraryno.ru/6-1-svoystva-opredelyayuschie-pozharopasnost-pyley-tegororandbax/> (дата обращения 15.08.2017).
8. Статическое электричество усиливает песчаные бури [Сайт]. URL: [naked-science.ru/Arxiv/Наука...elektrichestvo-usilivaet](http://naked-science.ru/Arxiv/Наука...elektrichestvo-usilivaet) (дата обращения 16.08.2017).
9. Причиной пылевых бурь оказалась электростатика [Сайт]. URL: <https://utro.ru/news/2006/08/18/575829.shtml> (дата обращения 17.08.2017).

## **К ВОПРОСУ СЖИГАНИЯ БИОГАЗА В ВИХРЕВЫХ ГОРЕЛКАХ**

аспирант Рамазанов Р.С.

канд. техн. наук, доц. Суслов Д.Ю.

аспирант Швыдкая М.А.

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** Внедрение биогаза в теплогенерирующей энергетике невозможно без разработки и модернизации основного и вспомогательного котельного оборудования, а также горелочных устройств. Рассмотрена возможность применения вихревой газовой горелки ГТВ-100 для сжигания биогаза с понижением содержанием метана. Определены основные параметры газового топлива: требуемые объемы кислорода и воздуха для полного сжигания биогаза, теоретические и действительные объемы продуктов горения, значение максимальной нормальной скорости распространения пламени.

В программном комплексе SolidWorks Flow Simulation разработана компьютерная модель вихревой газовой горелки ГТВ-100, в результате проведенного расчета были построены картины изменения скорости движения газо-воздушной смеси в продольно-вертикальной плоскости сечения участка газовой горелки – топка.

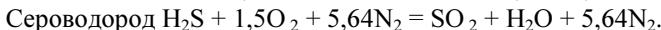
Природный газ – это наиболее эффективный и экологически чистый источник энергии, который является основным видом топлива для энергоснабжения огромного количества потребителей различного типа, в том числе и сельскохозяйственных предприятий. Одним из перспективных и эффективных направлений в энергообеспечении сельскохозяйственных предприятий является производство и применение возобновляемого источника энергии – биогаза. Биогаз состоит из 30-80% метана, 20-50% углекислого газа, а также незначительного количества других газов (сероводорода, азота, кислорода, водорода, аммиака) [1]. Так как содержание метана в биогазе начинается всего лишь с 40% от общего объема газовой смеси, а газовые горелки большинства приборов рассчитаны для горения природного газа с содержанием метана более 90%, то имеется необходимость в проведении исследований по разработке газогорелочных устройств для сжигания биогазового топлива.

Цель работы определение основных энергетических параметров биогазового топлива и исследование процесса образования газо-воздушной смеси в вихревых горелках низкого давления.

При использовании биогаза различного состава в газовых горелках необходима подача такого количества воздуха, которое обеспечивает оптимальное сгорание газо-воздушной смеси, образованной в результате смешения используемого газа с подаваемым воздухом.

Рассчитаем теоретический объём сухого воздуха для сгорания биогаза следующего условного состава: CH<sub>4</sub> = 45%, CO<sub>2</sub> = 52%, N<sub>2</sub>= 1%, H<sub>2</sub>S = 2%.

Расход кислорода и воздуха определяется на основе уравнений горения компонентов, входящих в состав биогаза [2].



На основе приведённых выше уравнений горения компонентов газообразного топлива, объём кислорода, необходимый для сгорания 1 м<sup>3</sup>, определяют по формуле:

$$V_{O_2}^0 = 0,01 \cdot \left[ 0,5CO + 0,5H_2 + 2CH_4 + 1,5H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] \quad (1)$$

$$V_{O_2}^0 = 0,01 \cdot [2 \cdot 45 + 1,5 \cdot 2] = 0,93 \text{ m}^3 \quad (2)$$

Объём воздуха V<sub>в</sub><sup>0</sup>, необходимый для горения газа, определим исходя из содержания в воздухе 21% кислорода по объёму, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа:

$$V_{\text{в}}^0 = \frac{100}{21} \cdot V_{O_2}^0 = 4,76 \cdot V_{O_2}^0, \text{m}^3 \quad (3)$$

$$V_{\text{в}}^0 = 4,76 \cdot 0,93 = 4,43 \text{ m}^3 \quad (4)$$

Теоретический объём образующихся в продуктах сгорания сухих трехатомных газов, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{CO_2}^0 = 0,01 \cdot (CO_2 + CO + \sum mC_m H_n) \quad (5)$$

$$V_{SO_2}^0 = 0,01 \cdot H_2S \quad (6)$$

$$V_{CO_2}^0 = 0,01 \cdot (52 + 45) = 0,97 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (7)$$

$$V_{SO_2}^0 = 0,01 \cdot 2 = 0,02 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (8)$$

Теоретический выход азота в продуктах сгорания:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_{\text{в}}^0 + 0,01 \cdot N_2 \quad (9)$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot 4,43 + 0,01 \cdot 1 = 3,51 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad (10)$$

Теоретический выход водяных паров при сжигании газового топлива:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot \left( H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124 \cdot d_e \right) + 0,0161 \cdot V_e^0 \quad (11)$$

где  $d_e$  – абсолютная влажность газообразного топлива,  $\text{г}/\text{м}^3$  (принимаем равной  $5 \text{ г}/\text{м}^3$  [3]).

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot (2 + 2 \cdot 45 + 0,124 \cdot 5) + 0,0161 \cdot 4,43 = 0,99 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (12)$$

Теоретический объём сухих газов состоит из объёмов трёхатомных газов и азота:

$$V_{c.e.}^0 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 \quad (13)$$

$$\text{Где } V_{RO_2}^0 = V_{CO_2}^0 + V_{SO_2}^0 = 0,97 + 0,02 = 0,99 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (14)$$

$$V_{c.e.}^0 = 0,99 + 3,51 = 4,5 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (15)$$

Суммарный теоретический объём продуктов сгорания равен:

$$V_e^0 = V_{c.e.}^0 + V_{H_2O}^0 \quad (16)$$

$$V_e^0 = 4,5 + 0,99 = 5,49 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (17)$$

Действительные объёмы продуктов сгорания рассчитываются с учетом коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,2$ .

Вследствие того, что процесс окисления горючих соединений топлива, в основном, завершается в топочной камере, объём трёхатомных газов  $V_{RO_2}$  остаётся неизменным по всему пути дымовых газов.

Увеличение объёма сухих газов возникает за счёт объёмов азота и кислорода избыточного воздуха:

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79(\alpha - 1) \cdot V_e^0 \quad (18)$$

$$V_{N_2} = 3,51 + 0,79(1,2 - 1)4,43 = 4,21 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (19)$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)V_e^0 \quad (20)$$

$$V_{O_2} = 0,21(1,2 - 1)4,43 = 0,19 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (21)$$

Следовательно, объём сухих газов может быть записан:

$$V_{c.e.} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad (22)$$

$$V_{c.e.} = 0,99 + 4,21 + 0,19 = 5,39 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (23)$$

За счёт избыточного воздуха также несколько возрастает объём водяных паров:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V_e^0 \quad (24)$$

$$V_{H_2O} = 0,99 + 0,0161(1,2 - 1)4,43 = 1 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (25)$$

Суммарный действительный объём продуктов сгорания

$$V_{\text{с.}} = V_{\text{с.э.}} + V_{H_2O} \quad (26)$$

$$V_{\text{с.}} = 5,39 + 1 = 6,39 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (27)$$

Максимальная нормальная скорость распространения пламени (м/с) в смеси газа с воздухом может быть определена по формуле:

$$U_h^{\max} = \frac{\sum C_m H_n \cdot U_{C_m H_n}}{\sum C_m H_n} \quad (28)$$

$$U_h^{\max} = \frac{45 \cdot 0,37}{45} = 0,37 \text{ м/с} \quad (29)$$

При известном содержании  $N_2$  и  $CO_2$ , % об., нормальную скорость распространения пламени  $U_h^\delta$ , м/с для забалластированных газов, корректируют по выражению:

$$U_h^\delta = U_h^{\max} (1 - 0,01N_2 - 0,012CO_2) \quad (30)$$

$$U_h^\delta = 0,37 (1 - 0,01 \cdot 1 - 0,012 \cdot 52) = 0,14 \text{ м/с} \quad (31)$$

Известно, что среднее значение теоретически необходимого объёма воздуха для полного сгорания природного газа составляет примерно  $9,85 \text{ м}^3$ , что в сравнении с определённым выше объёмом, необходимым для полного сгорания биогаза равным  $4,43 \text{ м}^3$ , в 2,2 раза меньше. Таким образом в газогорелочных устройствах для сжигания биогаза рассмотренного состава необходимо соблюдение данного соотношения.

Назначение газогорелочных устройств заключается в организации процесса сжигания топлива с целью обеспечения заданного экономически целесообразного режима работы котельного агрегата.

Достижение газовой горелкой данной цели происходит за счёт:

- обеспечения подвода и смешения между собой необходимого количества топлива и воздуха;

- организации полного сжигания топлива в пределах топочного пространства котла;

- сжигания топлива в режиме, позволяющем обеспечить требуемый по технологическим условиям уровень теплопередачи в рабочем пространстве топки котла.

Следовательно, весь цикл, составляющий процесс сжигания топлива (смешение-горение-теплопередача), должен производиться с наивысшей эффективностью полезного действия [4].

Способ смешения газа с воздухом является главным классификационным признаком горелочных устройств и разделяется на три группы:

По главному классификационному признаку – способу смешения газа с воздухом, горелочные устройства разделяются на группы:

- полного предварительного смешения газа с воздухом;
- частичного предварительного смешения газа с воздухом;
- без предварительного смешения.

Учитывая низкое содержание  $\text{CH}_4$  в биогазе целесообразным будет применение горелки вихревого типа с принудительной подачей воздуха и частичным предварительным смешением газа и воздуха.

К достоинствам вихревых горелок можно отнести:

- возможность работы на низкокалорийном газе;
- регулирование производительности может осуществляться в широком диапазоне;
- возможность работы на подогретом воздухе.

Для исследования процесса образования газо-воздушной смеси была разработана компьютерная модель вихревой газовой горелки низкого давления ГГВ-100 [5]. Модель построена по средствам программного комплекса SolidWorks, расчёты газодинамики производились модулем SolidWorks Flow Simulation.

Для расчета были выбраны следующие начальные значения параметров: габариты соответствуют размерам горелки ГГВ-100; расход газа на входе в горелку  $G_r = 0,027778 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ); расход воздуха на входе в горелку  $G_b = 0,123056 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $443 \text{ м}^3/\text{ч}$ ); шероховатость стенок принята  $\Delta = 100 \text{ мкм}$ ; начальное давление в топочном пространстве  $P_0 = 101325 \text{ Па}$ .

На рисунке 1 представлена компьютерная модель вихревой горелки ГГВ-100.

В результате проведенного расчета были построены картины изменения скорости движения газо-воздушной смеси в продольно-вертикальной плоскости сечения участка газовая горелка – топка, представленные на рис. 2 и 3.

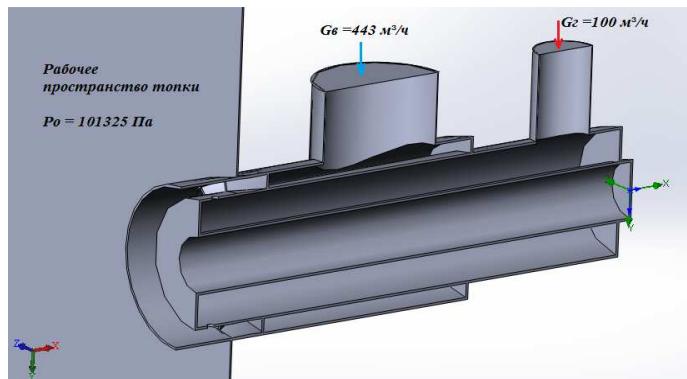


Рис. 1. Модель вихревой горелки

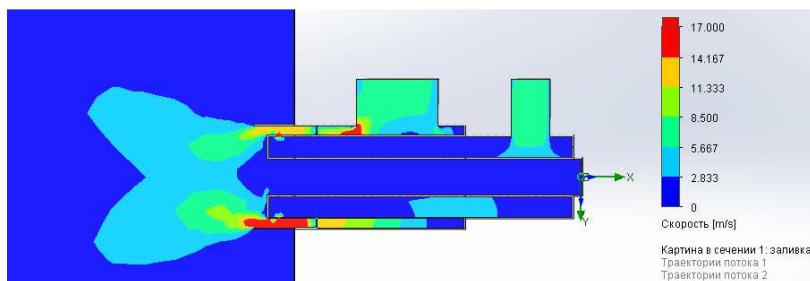


Рис. 2. Изоповерхность изменения скорости движения газо-воздушной смеси в сечении участка газовая горелка – топка

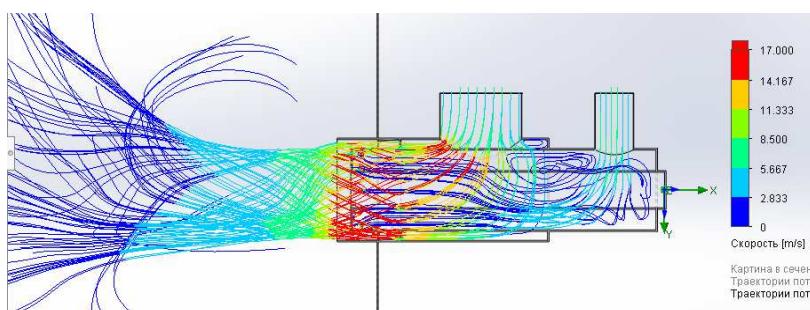


Рис. 3. Изолинии-траектории изменения скорости движения газо-воздушной смеси в сечении участка газовая горелка – топка

Анализируя полученные на графиках данные можно сделать вывод что, скорость газо-воздушного потока на выходе из горелки в точное пространство происходит со скоростью в пределах от 11 до 17 м/с. При этом для кинетического принципа сжигания применяемого данной горелкой скорость истечения из неё газо-воздушной смеси при сжигании низкокалорийного газа необходимо принимать не ниже 10-15 м/с. Данное условие должно выполняться чтобы избежать проскака пламени в горелку [4]. Однако, ввиду относительно малой длины участка с оптимальной скоростью, использование биогаза в исследуемом газогорелочном устройстве требует детального поддержания балансового режима газ-воздух.

**Выводы.** В результате проведенного исследования при помощи программного модуля Solidworks Flow Simulation была разработана модель распределения газо-воздушной смеси в вихревой газовой горелке с учетом выброса в пространство топки. Было определено распределение скорости газо-воздушного потока и построена сравнительная картина изменения величины скорости газо-воздушного потока на различных участках узла горелка – топка. На основе построенной компьютерной модели аэродинамики вихревой горелки ГГВ-100 можно проводить дальнейшее совершенствование и модернизацию газогорелочных устройств данного типа.

### **Библиографический список**

1. Суслов Д.Ю. Разработка системы газоснабжения сельскохозяйственного предприятия с использованием биогаза // Вестник БГГУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 183-186.
2. Комина Г.П., Шкаровский А.Л., Мариненко Е.Е. Газоснабжение. Горение газов: учеб. пособие. Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. 124 с.
3. Тимашев А.Н., Беркунова Т.А. Определение влагосодержания природных газов: Методические указания к проведению лабораторных работ. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. 23 с.
4. Сидельковский Л.Н., Юрьев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий: Учебник для вузов; 3-е изд, перераб. М.: Энергоатомиздат, 1988. 528 с.
5. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): Справочное издание / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусовский, А.Б. Усачёв. М.: Машиностроение-1, 2001. 496 с.

# ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПОНЕНТА ПО УПРАВЛЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ<sup>\*</sup>

д-р техн. наук, доц. Трубаев П.А.

Директор ОГБУ «Центр энергосбережения

Белгородской области» Буланин А.В.

аспирантка Ширриме К.Ж.

канд. техн. наук Кошлич Ю.А.

Белгородский государственный технологический

университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород

ОГБУ «Центр энергосбережения Белгородской области», г. Белгород

**Аннотация.** В статье рассмотрены современные действующие системы по повышению энергетической эффективности на муниципальном и региональном уровне. Приведены имеющиеся успешно применяющиеся практики в других регионах. Выявлены существенные отличительные особенности предлагаемой системы для Белгородского региона. Описаны, разработанные методы и алгоритмы для управления энергосбережением в бюджетном секторе. Предложена структура комплексного взаимодействия разработанных модулей, используемых в созданном программном компоненте.

Система городского управления энергетическими ресурсами — это совокупность стратегических и практических мероприятий, направленных на достижение устойчивого и эффективного потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и включает в себя как организационные, так и технические мероприятия на объектах, находящихся в городском управлении [1–3]. В настоящее время в России функционирует или разрабатываются несколько региональных систем, обзор которых приведен в табл. 1.

Таблица 1

Системы регионального и муниципального энергоменеджмента [1, 2, 4, 5]

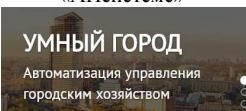
<p>ГИС Энергоэффективность</p> 	<p>Государственная информационная система в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.</p> <p>Недостатки:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Это системы статистического наблюдения – организована как база материалов в области энергосбережения и каталог отраслевых организаций, нет инструментов анализа.</li><li>2. Статистический период – год.</li></ol>
--	---

\* Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

Продолжение табл. 1

	<p>3. «Ручной» сбор данных.</p> <p>4. «ГИС «Энергоэффективность» – временное и несистемное решение» (Игорь Кожуховский, замдиректора РЭА, <a href="http://www.energy2020.ru/news/news10237.php">http://www.energy2020.ru/news/news10237.php</a>).</p>
<p>Информационно-аналитическая система топливно-энергетических балансов – ИАС ТЭБ (Ивановский государственный энергетический университет)</p>  	<p>Внедрено:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Оренбургская область.</li> <li>• Рязанская область.</li> <li>• Владимирская область.</li> <li>• Республика Татарстан.</li> <li>• Ивановская область.</li> </ul> <p>Недостатки:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ориентировано на предприятия, поставляющие энергоресурсы, а не на потребителей.</li> <li>2. Анализируемый период – год.</li> <li>3. Не учитываются технические особенности объектов (этажность, наличие утепления и т.д.).</li> <li>4. «Ручной» сбор данных.</li> </ol>
<p>Система городского управления энергоресурсами – СГУЭР (Проект ПРООН/ГЭФ 00074315 «Энергоэффективность зданий на Северо-Западе России», 2010-2015 г.)</p> 	<p>Разработана на базе платформы EMIS.</p> <p>Реализовано:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Псковская область.</li> <li>• Архангельская область.</li> <li>• Вологодская область.</li> </ul> <p>Недостатки:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Находится в стадии разработки концепции и проектных решений.</li> <li>2. Анализируемый период – год.</li> <li>3. Не учитываются технические особенности объектов (этажность, наличие утепления и т.д.).</li> <li>4. «Ручной» сбор данных.</li> </ol>
<p>Energy Management Information System – EMIS (Хорватия)</p>  	<p>Реализовано:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Хорватия (официальная система энергоменеджмента).</li> <li>• Словакия (официальная система энергоменеджмента).</li> <li>• Псковская область (пилотный проект из 485 объектов по программе ПРООН/ГЭФ).</li> <li>• Вологодская область (пилотный проект из 16 объектов).</li> </ul> <p>Недостатки:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Система создавалась для контроля оплаты счетов за энергоресурсы.</li> <li>2. Не содержит инструментов анализа – нет ранжирования, обобщения по группам, прогнозирования.</li> <li>3. Данные не приводятся к сопоставимым условиям.</li> <li>4. Весь анализ пользователь производит «вручную», используя выгрузку данных в формате Excel.</li> <li>5. Не адаптирована к условиям российского делопроизводства и административного управления.</li> </ol>

Окончание табл. 1

<p>Информационная система энергосбережения ООО «АНсистемс»</p>  <p><b>УМНЫЙ ГОРОД</b> Автоматизация управления городским хозяйством</p>	<p>Региональный сегмент ГИС Энергоэффективность. В стадии разработки.</p> <p>Недостатки:</p> <p>Система, как и ГИС Энергоэффективность, предназначена для сбора информации и ведение документации с добавлением функционала по учету энергосервисных контрактов и договоров с поставщиками топливно-энергетических ресурсов.</p>
<p>Системы диспетчеризации, мониторинга, АСКУЭ, АСУЭ, АИИС и т.п.</p>	<p>Являются надстройками над техническими средствами приборного учета.</p> <p>Имеются большое количество таких систем, их основной недостаток – только учет и контроль, без анализа и оценки эффективности энергопотребления.</p>

На основе анализа преимуществ и недостатков в существующих программных комплексах и системах, а также с учетом потребностей органов региональной и муниципальной власти предлагается следующая структура региональной информационно-аналитической системы «Системы управления энергетическими ресурсами Белгородской области (РИАС СУЭР)».

Цель разработки – сделать действующую систему, помогающую управлять энергосбережением и экономить на основе сбора данных, анализа, выявления проблем и эффективного контроля за их решением. Система должна: 1) контролировать эффективность распределения бюджетных средств на оплату коммунальных ресурсов; 2) выбирать направления вложения инвестиций в энергосбережение с точки зрения максимальной отдачи экономии; 3) быть основой при разработке энергосервисных контрактов и контролировать их выполнение.

Определены основные функции системы:

- хранение и анализ данных о потреблении энергоресурсов, выявление фальсификации показаний приборов учета;
- отслеживание качества поставляемых ресурсов в здании не зависимо от срока сбора данных о энергопотреблении;
- расчет индивидуальных норм потребления энергоресурсов зданиями;
- отслеживание изменений потребления объектов, прогнозирование возможных аварийных ситуаций;
- мониторинг и установление целевых показателей экономии ресурсов и денежных расходов (лимитов) по каждому зданию;

- прогнозирование потребления энергоресурсов на длительный период, формирование лимитов потребления энергоресурсов, контроль их выполнения;
- расчет фактических удельных показателей потребления энергоресурсов;
- контроль показателей потребления энергоресурсов;
- оценку потенциала энергосбережения по типовым энергосберегающим мероприятиям;
- оценку результатов выполнения энергосберегающих мероприятий;
- формирование распорядительной документации и контроль ее исполнения;
- формирование отчетной документации по фактическому исполнению энергосервисных контрактов.
- формирование рейтинга энергоэффективности;

В рамках настоящего проекта (РИАС СУЭР) предусматривается организация мониторинга и анализ показателей энергетической эффективности бюджетных потребителей ТЭР, подключенных к Единой автоматизированной информационно-измерительной системе учета энергоресурсов (ЕАИС), создаваемой в рамках областного проекта № 10081730 «Создание региональной автоматизированной единой автоматизированной информационно-измерительной системы учета энергоресурсов ЕИАСС».

Структурная схема системы представлена на рис. 1.

Исходные данные разделяются на три группы:

- мониторинг энергопотребления: фактическое и планируемое потреблении энергоресурсов и воды;
- технические данные: технические и функциональные характеристики объектов, их оснащенности приборами учетов;
- показатели энергосбережения: программы энергосбережения учреждений, данные энергосервисных контрактов и результатах их реализации.

После окончательной разработки РИАС СУЭР будет содержать данные по всем муниципальным бюджетным учреждениям и МКД Белгородской области.

Вся собранная информация будет храниться в едином хранилище данных с необходимым резервированием и обеспечения скорости работы, достаточной для функционирования системы.

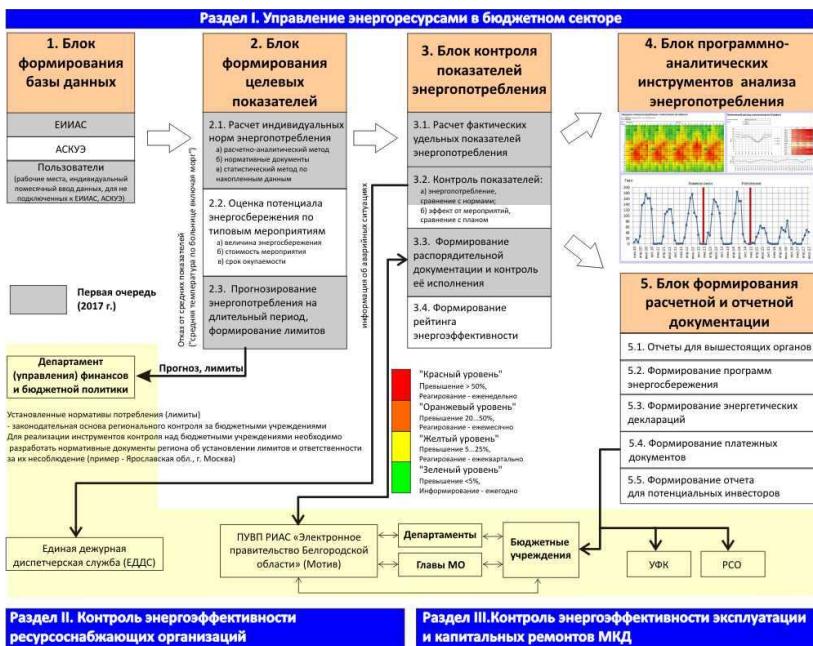


Рис.1. Схематическое изображение структуры пилотного проекта РИАС СУЭР

Для создания системы необходимо выполнить разработку новых методов и инструментов управления:

- разработку расчетно-аналитических методов определения затрат на отопление;
- разработку методологии определения индивидуальных норм энергопотребления;
- разработку методологии прогнозирования энергопотребления на длительный период;
- разработку методологии расчета фактических удельных показателей энергопотребления, контроль показателей энергопотребления на основании сравнения их с нормами.

Одной из важных задач системы является формирование и контроль лимитов. Установленные нормативы потребления (лимиты) – это законодательная основа регионального контроля за бюджетными учреждениями. Лимитирование предлагается производить на основе совокупности трех методов (рис. 2): а) статистического, по данным

потребления за прошедшее время для аналогичных объектов; б) расчетно-аналитического на основании технических данных объектов и режимах их функционирования; в) нормативного, используя действующие строительные нормы и правила (СНиП) и своды правил (СП).

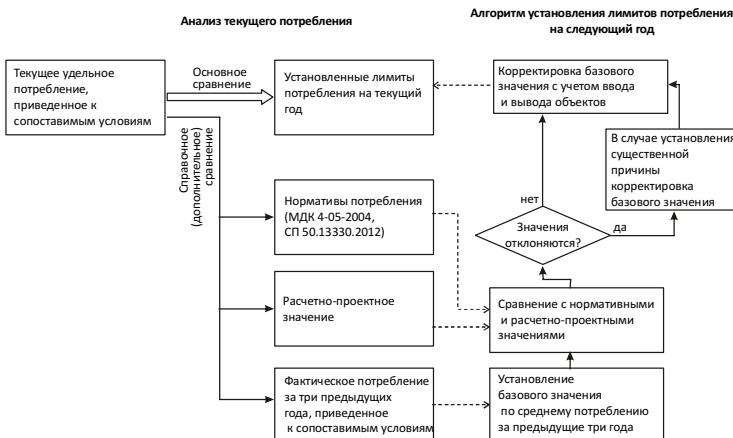


Рис.2. Взаимодействие блоков анализа и формирования лимитов

Таким образом, система направлена на постоянный мониторинг, контроль каждого из объектов городского управления по потреблению ТЭР на систематической основе, с учетом индивидуальных особенностей каждого объекта. При этом система дает возможность осуществлять оперативное реагирование на различные изменения энергопотребления и оценивать его в зависимости от времени суток, сезона и погодных условий. Новые методы и инструменты управления энергосбережением в бюджетном секторе, которые будут реализованы в информационной системе СУЭР, позволят обеспечить выполнение требований существующих нормативно-правовых актов в сфере энергосбережения, своевременную подготовку актуальной информации об энергосбережении и потреблении топливно-энергетических ресурсов и воды, а также ее представление для принятия решений органами исполнительной власти и местного самоуправления области.

Отличительными особенностями предлагаемой системы являются:

- возможность внедрения системы в любые учреждения (коммерческие, государственные) с учетом вида деятельности объекта;

- интеграция с уже имеющимися системами документооборота и оперативный ежемесячный анализ для корректировки в управлении;
- получение необходимой информации при минимальной бюрократической нагрузке;
- составление единого энергетического баланса всего муниципального образования и оценка наиболее инвестиционно-привлекательных мероприятий.

Ключевым преимуществом системы является базирование на успешных принципах анализа систем энергетического менеджмента, где главная задача – это анализ динамики и рациональное использование тепловой и электрической энергии на городских объектах. Таким образом, комплексная аналитическая обработка информации в рамках РИАС СУЭР позволяет выявить потенциал снижения потребления ТЭР в муниципитетах, обеспечивающий рациональное и эффективное использование ресурсов, а также обеспечить поддержку принятия обоснованных решений по развитию региона в целом.

В заключении стоит отметить, что подобное техническое исполнение, предусмотренное в рамках исполняемого программного модуля РИАС СУЭР дает возможность не только осуществлять эффективный оперативный анализ для реагирования на различные изменения энергопотребления и регулирования потребления, но и прогнозирование максимально эффективных мероприятий в дальнейшем.

### **Библиографический список**

- 1. Беккер В.Л. Додонов А.Н. Лукина-Лебедева М.А.** Практические шаги внедрения системы городского управления энергоресурсами // Метод. указания. – Санкт-Петербург, 2016. – 49 с.
- 2. Ратманова И.Д., Железняк Н.В.** Название Подход к организации информационной поддержки государственной политики в сфере управления топливно-энергетическими комплексами региона // Вестник ИГЭУ. 2006. Вып.4.
- 3. Кущев Л.А., Дронова Г.Л.** Пути снижения энергозатрат в жилищно-коммунальном хозяйстве // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2008. № 2. С. 24-25.
- 4. Ширриме К.Ж., Трубаев П.А.** Анализ проблем в реализации систем регионального энергетического менеджмента // Энергетические, управляющие и информационные системы: Сб. докл. I межд. научно-техн. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. С. 383-386.
- 5. Hooke J. H.** Energy Management Information Systems: Achieving Improved Energy Efficiency: A Handbook for Managers, Engineers and Operational Staff. Environment Canada, 2004. 93 p.

---

## **6. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

---

### **АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ**

магистрант **Елакина А.В.**

канд. техн. наук **Выборнов Д.В.**

Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры, г. Макеевка

**Аннотация.** В данной статье выполнен анализ тепловых схем реализации аккумулирования теплоты. Выделены основные виды тепловых аккумуляторов (АТ) с твердым теплоаккумулирующим материалом (ТАМ). Проанализированы тепловые схемы аккумулирования тепла. Проводится сравнение и анализ результатов, полученных расчетно-аналитических исследований применения данных схем в системе теплоснабжения.

**Введение.** Не так давно стоимость выработки тепловой энергии возобновляемыми источниками лежала за гранью экономической целесообразности, но в результате все более развивающейся деятельности человечества в сфере энергетики сегодня является фактом все более обостряющийся дефицит топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и значительное повышение их стоимости. Данная ситуация требует новых предложений по реконструкции отрасли энергетики, отвечающей за выработку тепловой энергии, которые были бы направлены как, на экономию ТЭР, так и на замену их другими источниками энергии.

В качестве систем с возобновляемыми источниками энергии, потенциал которых может быть использован для генерации теплоты в системах теплоснабжения зданий, относятся системы с тепловыми аккумуляторами, а также отчасти – гелиосистемы. В качестве греющего теплоносителя для систем с тепловыми аккумуляторами могут также использоваться различные низкопотенциальные среды (технологические и бытовые стоки, обратный теплоноситель системы отопления, теплота удаленного вентиляционного воздуха и др.). Работа гелиосистем отопления и теплоснабжения основана на улавливании солнечной радиации и преобразовании ее в тепловую энергию. Использование

солнечной энергии связано с разработкой мероприятий, превращающих здание в объект, активно воспринимающий внешнюю рассеянную низкопотенциальную энергию и использующий ее для теплоснабжения зданий и сооружений.

**Целью** статьи является изучение эффективности схем аккумулирования теплоты для нужд систем отопления, как жилых зданий, так и помещений сельскохозяйственного назначения.

**Содержательная часть.** Существует ряд классификаций ТАМ [1-5]. В контексте рассматриваемого вопроса можно предложить следующий вариант (рис. 1).

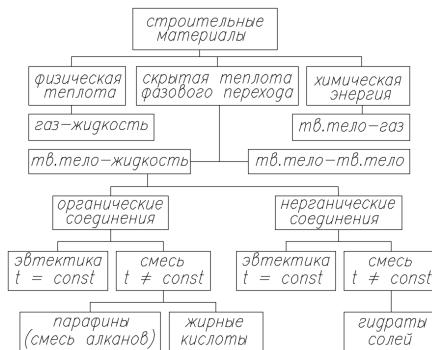


Рис. 1. Классификация теплоаккумулирующих материалов

Для реализации тепловых схем с аккумуляторами с целью увеличения их КПД в цикле теплоснабжения следует рассматривать, в первую очередь аккумуляторы теплоты, работающие по принципу фазового перехода. В качестве целесообразных следует рассматривать два типа теплоаккумуляторов: аккумуляторы теплоты, работающие по пассивному принципу и аккумуляторы теплоты, работающие по активному принципу. Аккумуляторы теплоты, работающие по пассивному принципу, как правило, представлены в более простом и надежном конструктивном исполнении, что обуславливает их высокую надежность. К главному недостатку такого типа АТ относят ухудшение процесса теплообмена в ходе кристаллизации ТАМ, следовательно, габаритные размеры таких теплоаккумуляторов в значительной степени будут зависеть от выбора теплоаккумулирующего материала.

Физические свойства некоторых отдельных ТАМ приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

## Основные свойства твердых ТАМ

ТАМ	Рабочая темпера-тура, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоёмкость, кДж/кг	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
Щебень	400	2500...2800	0,92	2,2...3,5
Феолит	400	3900	0,92	2,1
Бетон	400	1900...2000	0,84	1,2...1,3
Графит	3500	1600...2000	2,0	40...170
Кирпич красный	1000	1700...1800	0,88	0,7...0,8
Шамот	1700	1830...2200	1,1...1,3	0,6...1,3

Таблица 2

## Основные свойства жидких ТАМ

ТАМ	Температура, К			Плотность, кг/м <sup>3</sup> · 10 <sup>3</sup>	Удельная теплоёмкость, кДж/кг·К	Коэффициент	
	застывания	максимальная	кипения			Теплопроводно-стия, Вт/м·К	Вязкости · 10 <sup>6</sup> Па·с
Вода под давлением, 0,1 МПа	273	373	373	1	4,19	0,67	5,5
Тетрахлорди-фенил	266	-	613	1,44	2,1	0,17	1000
Дифенильная смесь	285	673	531	0,95	-	0,12...0,08	-
Полимети-лисило-ксан	213	593	-	0,9	1,5	0,1...0,14	5...20
Полиэтилси-локсан	203	563	-	0,9...1	1,6	0,13...0,16	3...40
Литий	455	1600	1623	0,48	4,36	52...66	8...13
Натрий	371	1150	1155	0,8	1,33	52...75	14..22

Исходя из вышеприведенных теплотехнических характеристик ТАМ соображений используемого источника низкопотенциальной теплоты, можно остановиться на следующих основных видах тепловых аккумуляторов: тепловые аккумуляторы с твердым ТАМ; тепловые аккумуляторы с плавящимся ТАМ; жидкостные аккумуляторы тепла. Некоторые типы ТА с твердым теплоаккумулирующим материалом приведены на рис. 2.

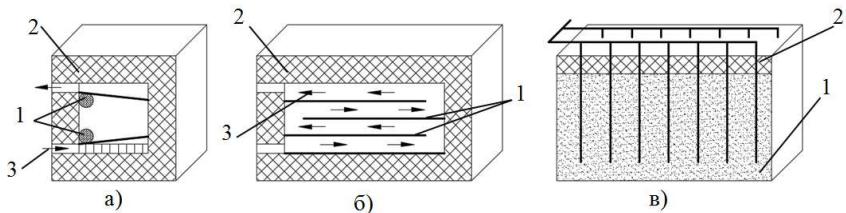


Рис. 2. Основные типы ТА с твёрдым ТАМ:  
 а) с пористой матрицей; б) канальный; в) подземный ТА с вертикальными каналами; 1 – ТАМ; 2 – теплоизоляция; 3 – направление движения теплоносителя

Наиболее перспективными из АТ пассивного типа с точки зрения эксплуатации в отдельных системах теплоснабжения являются капсульные и кожухотрубные (рис. 3). Размещение ТАМ в капсулах позволяет обеспечить высокую надежность конструкции из-за развитой поверхности теплообмена. При использовании гибких капсул можно добиться компенсации изменения объема в процессе фазовых переходов. Однако вследствие низкой теплопроводности ТАМ необходимо большое число капсул малого размера, что приводит к большой трудоемкости изготовления АТ, недостаточно рациональному использованию объема (для цилиндрических капсул), малой жесткости конструкции (для плоских капсул). Особенно целесообразно применение капсульных АТ в случаях малых тепловых потоков с теплообменной поверхностью [9].

К ТА активного типа относят различные типы устройств, где процесс теплообмена интенсифицирован, в большинстве случаев, за счет контакта теплоносителей. В данном случае к ТАМ выдвигается ряд довольно жестких требований: они должны быть химически стабиль-

ными, не образовывать с непосредственным теплоносителем растворов, кристаллизоваться отдельными крупными фракциями и т.д.

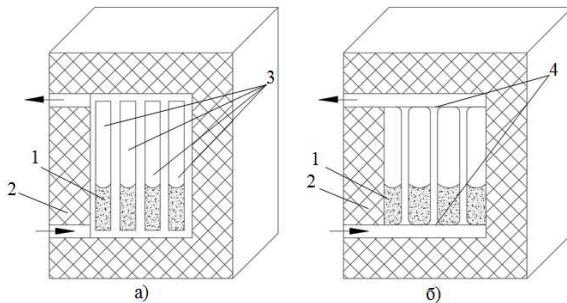


Рис. 3. Принципиальные схемы основных ТА пассивного типа

а) капсулный; б) кожухотрубный; 1 – ТАМ; 2 – теплоизоляция; 3 – капсулальная система; 4 – трубная решетка

В зависимости от того больше плотность теплоносителя плотности ТАМ или меньше, теплоноситель подается в верхнюю или в нижнюю часть АТ соответственно. В данном случае к основному и существенному недостатку следует отнести необходимость в дополнительном источнике энергии, расходуемом на подачу и прокачку теплоносителя через АТ. Этот недостаток отсутствует в АТ испарительно-конвективного типа, где движение теплоносителя обусловлено его нагревом, а раздел фаз с ТАМ происходит после его кристаллизации.

**Выводы.** Существует множество типов, видов и конструкций тепловых аккумуляторов. Среди АТ пассивного типа наиболее целесообразными и перспективными являются капсулные теплоаккумуляторы в силу их дешевизны из-за отсутствия дорогостоящих поверхностей нагрева и высокотеплопроводных металлических частей. АТ активного типа характеризуются большей сложностью и технологичностью процесса. Экономический эффект, который позволяют получать данные устройства сопоставим с АТ пассивного типа при том, что затраты на более сложные теплоаккумуляторы активного типа достигают 170% по сравнению с аналогичными по мощности АТ пассивного типа.

Таким образом, применение аккумуляторов теплоты в системах теплоснабжения позволит повысить эффективность использования топлива, шире применять вторичные энергоресурсы, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Окупаемость внедрения акку-

муляторов в работу систем теплоснабжения с котлами на органическом топливе будет зависеть от затрат на получение первичной теплоты, т.е. вида применяемого топлива.

### **Бібліографічний список**

1. **Корінчевська Т.В.** Перспективні методи акумулювання теплової енергії // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. 2010. №. 37. С. 236-241.
2. **Amar M. Khudhair, Mohammed M. Farid.** A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials // Energy Conversion and Management. 2004. 45 (2004) 263. p.275.
3. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications / Atul Sharma, V.V. Tyagi , C.R. Chen, D. Buddhi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. 13 (2009) 318. p.345.
4. A review on phase change energy storage: materials and applications / Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack b,Said Al-Hallaj // Energy Conversion and Management. 2004. 45 (2004) 1597 p.1615.
5. **Левенберг В.Д., Ткач М. Р., Гольстрим В. А.** Аккумулирование тепла. К.: Техника, 1991. С. 49–74.
6. **Бабаев Б.Д.** Сравнительные характеристики различных типов аккумуляторов тепла, перспективные направления разработок новых методов и устройств для аккумулирования тепловой энергии / материалы VI Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна, «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов». Махачкала. 2013. С. 125-137.
7. **Богословский В.Н.** Расчет аккумуляторов тепла с фазовым переходом в элементах канонической формы / В. Н. Богословский, Э. Л. Лихтенштейн, Р.Р. Манасыпов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1985. № 12. С. 78-79.
8. **Врине Е.** Исследование установки, работающей в периодическом режиме для аккумулирования тепла скрытой теплотой / Е. Врине // Revue Generale de Thermique. 1983. Т. 22, № 254. С. 183-188.
9. **Остапенко В.В.** Фазопереходной аккумулятор теплоты для нужд теплоснабжения: автореф. канд. техн. наук:05.23.03 / Остапенко, Виталий Валеревич. Макеевка, 2015. 23 с.
10. **Левенберг В.А.** Аккумулирование тепла / В.А. Левенберг, М.П. Ткач, В.А. Гольстрим. К.: Техника, 1991. 112 с.
11. **Сотникова О.А., Турбин В.С., Григорьев В.А.** Аккумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения: Журнал «АВОК». М.: 2003. №5. С.40-44.
12. **Alarlo Y.** Active Heat Exchange System Development for Latent Heat Thermal Energy Storage: Topical report. NASA CR-159726 / Y. Alarlo, R. Kosson, R. Haslett; Grumman Aerospace Corporation. Bethpage, New York, 1980. 60 p.

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

канд. техн. наук **Васильев П.Ф.**

аспирант **Корякина М.Л.**

*Северо-Восточный федеральный университет  
имени М.К. Аммосова, г.Якутск*

**Аннотация.** Разработка установки с термоэлектрическим генератором для питания уличного освещения в условиях Крайнего Севера. В качестве источника питания служит тепло от отопительного трубопровода (ГВС). Холодная сторона – трубопровод холодного водоснабжения (ХВС). Отличительная черта установки – не требует дополнительного врезания модуля ТЭГ внутри радиатора

В условиях Крайнего Севера существует проблема, связанная с электроснабжением, из-за сложности транспортировки электрических сетей. Поэтому мы предлагаем использование Термоэлектрических генераторов (ТЭГ). Они в настоящее время привлекают большой интерес в различных исследованиях, так как преобразовывают тепловую энергию в электричество без применения движущихся частей.

Целью данной работы спроектировать установку, используя термоэлектрические генераторы, для электроснабжения уличного освещения на Крайнем Севере. Данная установка поможет сделать анализ эффективности использования термоэлектрических генераторов, учитывая особенности климатических условий Крайнего Севера.

Термоэлектрические генераторы являются твердотельными устройствами, предназначенными для преобразования потока тепла в электричество посредством эффекта Зеебека [4]. Также считается, что ТЭГи не имеют подвижных частей, не требуют обслуживания и надежны в эксплуатации [6]. Схема устройства термоэлектрического генератора представлена на рис. 1. Термоэлектрические генераторы состоят из р-типа и н-типа термопар, которые соединяются электрически последовательно, термически – параллельно [2]. В настоящее время отсутствуют публикации, которые точно описывают тепловые и электрические процессы работы термоэлектрических генераторов.

В качестве источника тепла может служить тепло из любых источников. Например, Ким и его команда из Индии используют тепло от двигателя автомобиля, температура выхлопного газа у которого достигает 500°C и тепловой эффективностью 35% [3]. Команда Адама

Климанека из Польши в своей модели термоэлектрического генератора использовали в качестве источника тепла сжигание природного газа, где КПД генератора зависит от температуры охлаждающей стороны, то есть от разности температур между горячей и холодной стороны генератора [7].



Рис.1. Устройство термоэлектрического генератора.

Вырабатываемое напряжение модуля ТЭГ зависит от термоэлектрического материала, которое использовано при изготовлении данного модуля. Существует три главных требования к термоэлектрическим материалам относительно эффективной производительности преобразования [6]:

- коэффициент Зеебека  $\alpha$  должен быть максимально высоким;
- электрическое сопротивление  $\rho$  должно быть максимально низким;
- теплопроводность  $\lambda$  должна быть максимально низкой.

Эти три требования объединены в так называемом показателе добротности  $zT$  [6]:

$$zT = \frac{\alpha^2 \cdot T}{\rho \cdot \lambda},$$

где  $T$  – температура, К.

С помощью показателя добротности можно проанализировать КПД термоэлектрического материала [1].

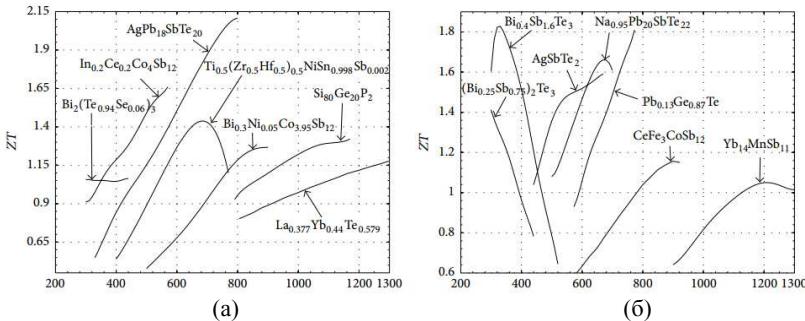


Рис. 2.Функции зависимости безразмерного показателя добротности от температуры для (а) *n*-типа и (б) *p*-типа материалов.

Чем больше показатель добротности материала, тем выше КПД генератора [7].

*Расчет тепловых и электрических параметров.* Максимальный КПД термоэлектрического генератора зависит от показателя добротности  $ZT$  и может быть вычислен следующей формулой:

$$\eta_{max} = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + T_c/T_h} \quad (1)$$

где  $\Delta T = T_h - T_c$  – разность температур между нагретой и охлаждающей частями генератора;  $T_h$  – температура горячей части, К;  $T_c$  – температура холодной части, К;  $ZT$  – показатель добротности.

Напряжение генератора находится по формуле [5]:

$$V = \alpha(T_h - T_c - IR_i) \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Зеебека;  $I$  – сила тока в схеме, А;  $R_i$  – внутреннее сопротивление, Ом.

Сила тока:

$$I = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R_i + R_L} \quad (3)$$

где  $R_L$  – сопротивление приемника (нагрузки), Ом.

Мощность, производимая термоэлектрическим генератором может быть вычислена по формуле:

$$P = IV = \frac{\alpha^2(T_h - T_c)}{(R_i + R_L)^2} \quad (4)$$

Термоэлектрические генераторы (в отличие от обычных электрогенераторов) - устройства, не имеющие подвижных и скользящих частей, малогабаритные, бесшумные, имеют долгий срок службы, не требуют постоянного технического обслуживания и ремонта.

Установка ТЭГ крепится на поверхности трубопровода (рис.2). Для генерации электрической энергии требуется установить ТЭГ между горячим и холодным трубопроводами системы теплоснабжения. Максимальное получаемое напряжение 6 В, что достаточно для питание уличного фонаря. Данная установка будет использоваться в ЖКХ, а именно в системе электроснабжения. Потенциальные потребители: уличное освещение (пешеходные пути, дворовая территория).

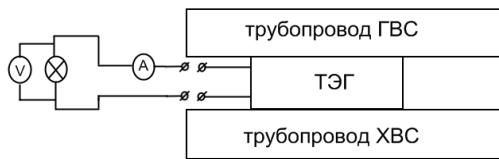


Рис. 2. Принципиальная схема

Наша установка отличается от других ТЭГ. Например, отличительные характеристики:

- от установки Виноградова С.В. [8], не требует крепление установки внутри дополнительного радиатора, который необходимо врезать на трубопровод;
- космические спутники – использование установки только в космосе [9], источник тепла двигатель. Наша установка будет использоваться на Земле и источником тепла будет отопительные трубопроводы;
- солнечные электростанции – источник тепла солнечное излучение, то есть в Крайнем Севере она может использоваться только в летний период (4 месяца). Наша установка будет использоваться в отопительный период, то есть 8 месяцев в году;
- бытовые нужды – источник тепла от газовой печи (внутри здания или сооружения), требует дополнительного способа охлаждения (а

именно насоса) для нагнетания воздуха или воды охлаждающей стороны. Наша установка не требует дополнительного насоса для охлаждающей стороны, так как по трубопроводу холодного водоснабжения протекает вода от насоса котельного.

В данной статье мы рассмотрели общее устройство термоэлектрического генератора. Действительно, термоэлектрические генераторы очень просты в исполнении, не требуют человеческого обслуживания и занимают мало места. Относительно высокий показатель добротности у термоэлектрических материалов, которые имеют соединение с висмутом (Bi) и теллуром (Te). Представлены расчетные формулы, которые необходимы для анализа и оценки параметров термоэлектрических генераторов.

#### **Библиографический список**

1. Alicki R. Unified Quantum Model of Work Generation in Thermoelectric Generators, Solar and Fuel Cells // Entropy. 2016. Number 18(6), 210. P 1-16.
2. Falota H., Ilie B.C., Comsa C. The experimental study of heat waste conversion into useful electronic power // Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2009. Vol. 2, Number 1. P 32-35.
3. Kim S., Park S., Rhish A. A thermoelectric generator using engine coolant for light-duty internal combustion engine-powered vehicles // Journal Electron Mater. 2011. Vol. 40, Issue 5. P 40-45.
4. Menon A.K., Yee S.K. Design of a polymer Thermoelectric generator using radial architecture // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 119, Issue 5 P 1-11.
4. Performance Evaluation of the Thermoelectric generator / P.A. Cotfas, D.T. Cotfas, O. Machidon, C. Civlau // Scientific research and education in the air force-aerases. 2016. Vol. 1. P 239-246;
6. Termoelectric generator on Satellites – An Approach for Waste Heat recovery in Space / M. Von Lukowicz, E. Abbe, T. Schmiel, M. Tajmar // Energies. 2016. Number 9 (7). P 1-14.
7. Influence of thermal environment on optimal working conditions of Thermoelectric generator / Y. Aperter, H.Ouerdane, C.Goupil, Ph.Lecoeur // Journal of applied physics. 2014. Issue 116, 144901. P 1-5.
8. Виноградов С.В., Халыков К.Р., Нгуен К.Д. Модельная экспериментальная установка с термоэлектрическим генератором // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2010. № 2. С. 66-70.
9. Новиков С.В., Парпарат Е.З., Федоров М.И. Надежные термоэлектрические генераторы для космических аппаратов // Механика, управление и информатика. 2014. №1 (46). С. 133-140.

## **АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ ТБО В ВОДОГРЕЙНОМ КОТЛЕ МАЛОЙ МОЩНОСТИ\***

ст. преп. **Корнилова Н.В.**

д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** В работе произведен анализ температуры горения ТБО в водогрейном котле малой мощности с колосниковой решеткой в зависимости от влажности ТБО, коэффициента избытка воздуха, температуры подаваемого на горения воздуха и количества отбираемой теплоты и определен диапазон параметров, обеспечивающих требуемую температуру горения – 900...1100°C, обеспечивающий полное полное разрушение находящихся в отходах органических вредных веществ, но не приводящий к расплаву золы и образованию спеков. Сделаны выводы, что необходимые температуры обеспечиваются при широком диапазоне режимных параметров и влажности ТБО. Но отбор теплоты в котле приводит к значительному снижению температуры горения. Поэтому в котлах для сжигания ТБО малой мощности необходимо конструктивно разделять зону горения и отбора теплоты.

В настоящее время не существует экономически эффективного и одновременно экологически безопасного решения для утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) [1, 2]. Существующая система управления отходами в России ориентирована преимущественно на их захоронение на полигонах. Это приводит к выводу из использования больших земельных площадей, загрязнению атмосферы биогазом и токсичными продуктами горения при самовозгорании отходов, а почвы и водоемов – токсичной жидкостью («фильтратом»), образующейся в слое отходов [3].

Сжигание бытового мусора является наиболее привычным и широко распространенным способом его утилизации. В мире действуют около 1500 мусоросжигательных заводов, из них около трети – в Европе, где сжигается около 16% отходов, в основном с выработкой тепловой энергии и незначительно – с выработкой электроэнергии [4]. В США объем сжигаемых ТБО после 2000-х годов стал сопоставим с объемом отходов, размещаемых на полигонах. Сжигание бытового мусора, помимо снижения объема и массы, позволяет получать дополнительные

---

\* Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

тельные энергетические ресурсы, которые могут быть использованы для централизованного отопления и производства электроэнергии. Кроме того, складирование оставшейся части твердых отходов после сжигания экологически безопасно и требует в 10 - 12 раз меньше площади.

Существуют три основных метода сжигания твёрдых отходов – слоевое (с неподвижной и подвижной колосниковой или цепной решёткой); пылевидное (во взвешенном или кипящем слое) и в пиролизных котлах. Первый метод более прост в реализации, не требует предварительной подготовки мусора, отличается высокой надежностью, но второй позволяет получить более полное сгорание отходов. По материалам ряда источников пиролиз наиболее экономически эффективен и оказывает наименьшее влияние на окружающую среду [6]. Однако об эффективность сухого пиролиза при сжигании твердых бытовых и некоторых промышленных отходов мнения специалистов расходятся [7].

Главный недостаток прямого сжигания – загрязнение атмосферы вредными выбросами при избытке кислорода в зоне горения и низкой температуре горения [8]. Но например в работе [7] утверждается, что захоронение отходов на свалках более опасно, чем переработка сжиганием. Опыт Швеции показывает, что, несмотря на рост в течение последних лет объемов бытовых отходов, выброс диоксинов в атмосферу с мусоросжигательных заводов составляет всего 5-6% от всех выбросов, т.е. столько же, сколько и при ранее имевших место пожарах на свалках [4].

Термическое обезвреживание отходов на современном уровне развития науки и техники гарантирует практически полное разрушение находящихся в отходах органических вредных веществ [8]. Но для этого необходимо обеспечить высокие температуры. Согласно Директиве Европейского Парламента и Совета 2000/76/ЕС «О сжигании отходов» экологическим требованиям удовлетворяют установки, в которых продукты горения находятся не менее 2 с при температуре не менее 850°C, или если сжигаются опасные отходы с содержанием более 1% галогенных органических соединений, выраженных как хлорин, температура должна быть минимум 1100°C.

Но при температуре выше 1100°C зола, образующаяся при сжигании ТБО, начинает плавится, что приводит к образованию спеков [1], которые забивают ячейки колосниковой решетки. Поэтому температура горения ТБО должна лежать в интервале 850-1100°C.

В работе произведен анализ температуры горения ТБО в водогрейном котле с колосниковой решеткой в зависимости от влажности ТБО, коэффициента избытка воздуха, температуры подаваемого на горения воздуха и количества отбираемой теплоты и определен диапазон параметров, обеспечивающих требуемую температуру горения – 900…1100°C. Для расчетов использовался состав ТБО согласно данным работ [1, 9] (табл. 1).

Таблица 1

Состав ТБО

Состав ТБО	Доля	Характеристики рабочие, %						
		A <sup>p</sup>	W <sup>p</sup>	C <sup>p</sup>	H <sup>p</sup>	O <sup>p</sup>	N <sup>p</sup>	S <sup>p</sup>
Пищевые отходы	0,3	3	76	11,26	1,62	7,16	0,84	0,13
Бумага	0,3	12	2	39,73	5,33	40,51	0,26	0,17
Дерево	0,05	1	67	16,32	1,95	13,63	0,06	0,03
Пластмасса	0,25	21	2	52,13	7,16	16,56	0,85	0,31
Негорючая часть	0,1	100	0	-	-	-	-	-
Рабочий состав ТБО	19,8	27,25	29,14	3,97	19,12	0,54	0,17	

Расчет произведен для котла по сжиганию отходов мощностью 200 кВт, эксплуатируемого в ООО «ТК "Эконтрас"» (Белгород, ул. Серафимовича, 72) и предназначенного для выработки горячей воды на нужды отопления административного и производственного здания. Данный твердотопливный котёл представляет цельносварную конструкцию из стали размерами 1230 м (ширина) x 1600 мм (глубина) x 2170 мм (высота). Топливо сжигается на колосниковой решётке, поддув воздуха может быть как естественный, так и дутьевым вентилятором. Стены котла теплоизолированы минеральной ватой Izovol CT-40, толщина теплоизоляции 0,2 м.

Был произведен расчет теплового баланса котла, включающий следующие статьи:

- приход теплоты: а) от сгорания топлива; б) физическая теплота топлива; в) теплота воздуха;
- расход теплоты: а) теплоты продуктов горения (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>); б) теплота золы; в) потери через стенки котла; г) потери от недожога; д) теплосъем (количество теплоты, отбираемое в теплообменнике для нагрева воды).

По полученной теплоте продуктов горения определялась их температура, которая принималась равной действительной температуре горения.

На рис. 1 представлена зависимость температуры горения от коэффициента избытка воздуха и влажности ТБО при различной температуре воздуха, подаваемого на горение и отсутствия в котле теплосъема. На рис. 2 по полученным данным построены изотермы, определяющие область необходимых температур. Согласно данным графиков, ТБО могут сжигаться при влажности до 20-30% без предварительного подогрева воздуха, идущего на горение. Более высокая влажность ТБО требует применения предварительного нагрева воздуха, которое может быть выполнено за счет теплоты продуктов сгорания.

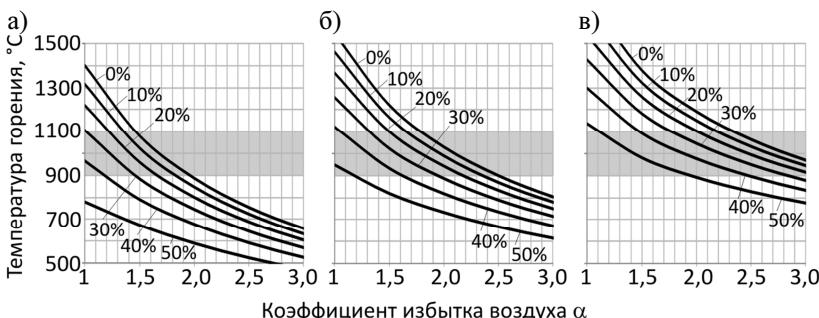


Рис. 1. Температура горения при разной влажности ТБО и температуре воздуха, подаваемого на горение: а) 20°C; б) 200°C; в) 400°C

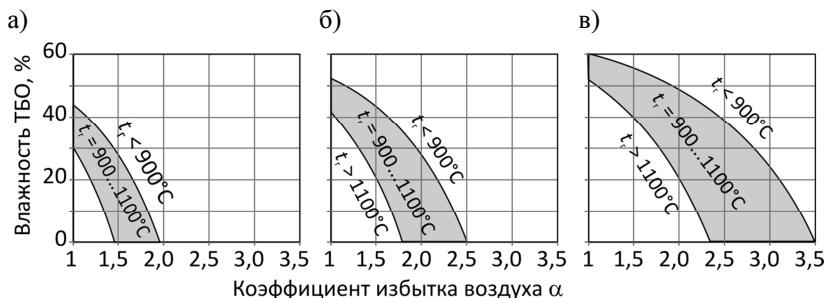


Рис. 2. Изотермы температуры горения ТБО при температуре воздуха, подаваемого на горение: а) 20°C; б) 200°C; в) 400°C

В отличие от котлов большой мощности, где зоны горения и отбора теплоты пространственно разделены, в котлах небольшой производительности отбор теплоты происходит непосредственно в камере

сгорания, что приводит к снижению температуры горения. Расчет температуры горения при наличии теплосъема в котле показал, что даже незначительная часть теплоты, отбираемая в топке, приводит к невозможности получения требуемых температур (рис. 3).

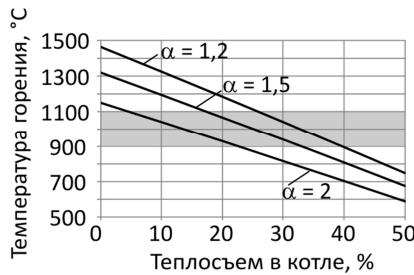


Рис. 3. Изменение температуры горения в котле при различной величине отбора теплоты (теплосъема)

Полученные данные согласуются с результатами испытаний котла при сжигании отходов, при которых пирометром измерялась температура слоя топлива в котле ( $t_r$ ), а газоанализатором – состав и температура газа ( $t_{or}$ ) после котла (рис. 4). Мощность котла при этом составляла около 50 кВт, или около 25% теплосъема.

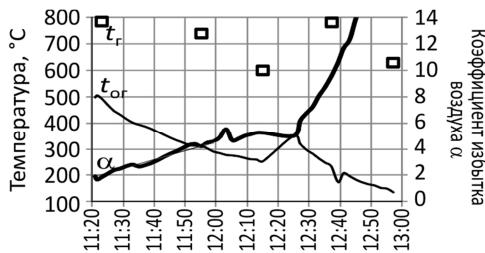


Рис. 4. Данные замеров температуры горения  $t_r$ , выходящих из печи газов  $t_{or}$  и коэффициента избытка воздуха при теплосъеме в котле около 25%

Таким образом несмотря на относительно высокую температуру горения, температура отходящих газов гораздо ниже значений, определяемых экологическими требованиями. Хотя измерения состава отходящих газов, приведенные в работе [8], показали отсутствие превышение ПДК по анализируемым газам, но по результатам испытаний

можно сделать вывод, что экологические требования вызывают необходимость обеспечения требуемых режимов горения в котле при отсутствии отбора теплоты на для нагрева воды.

### **Выводы**

При сжигании ТБО могут быть получены необходимые температуры, обеспечивающие полное сжигание вредных веществ, при широком диапазоне режимных параметров и влажности. Но отбор теплоты в котле приводит к значительному снижению температуры горения. Поэтому в котлах для сжигания ТБО малой мощности необходимо конструктивно разделять зону горения и отбора теплоты. С учетом требований о нахождении продуктов горения не менее 2 с при температуре не менее 850°C, топка и теплообменник должны быть разделены газоходом необходимого размера.

### **Библиографический список**

1. **Левин Б.И.** Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
2. **Кожевников В.П., Токач Ю.Е., Огнев М.Н.** Современные решения по переработке твердых бытовых отходов в БГТУ им. В.Г. Шухова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 1. С. 172–174.
3. **Порожнюк Л.А., Василенко Т.А., Порожнюк Е.В.** Роль экологического аудита в обращении с отходами в Белгородской области // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 177–180.
4. Европейская практика обращения с отходами: проблемы, решения, перспективы. С.Пб.: НП РЭП, 2004. 73 с.
5. **Тугов А.Н.** Перспективы энергетической утилизации ТБО [Электронный ресурс] / А. Н. Тугов // Энергосовет. 2014. № 4 (35). С. 31–35. URL: [http://www.energosovet.ru/bul\\_stat.php?id=473](http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?id=473).
6. **Коровин И.О.** Исследование пиролизной утилизации углесодержащих твёрдых бытовых отходов. Дис ... канд. техн. наук. Тюмень, 2003. 159 с.
7. **Kasakura T., Hiraoka M.** Pilot plant study on sewage sludge pyrolysis // Water Research. 1982. Vol. 16. Part I: Issue 8. P. 1335-1348; Part II: Issue 12. P. 1569-1575.
8. **Корнилова Н.В., Трубаев П.А.** Определение вредных выбросов водогрейного котла при сжигании твердых отходов различного вида // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 10-2 (52). С. 62-66.
9. **Ильиных Г.В., Слюсарь Н.Н., Коротаев В.Н.** Морфологический состав отходов: основные тенденции изменения // Твердые бытовые отходы. 2011. № 8. С. 38–41.

# **ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ В СИСТЕМАХ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ**

канд. техн. наук, доц. **Муровский С.П.**

студент **Купленный В.О.**

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,  
г. Симферополь*

**Аннотация.** В работе рассмотрены перспективы развития децентрализованных систем электроснабжения промышленных предприятий на базе мини-ГЭС и электрохимических генераторов в качестве накопителя энергии. Разработанное схемное решение децентрализованного электроснабжения промышленного объекта на базе мини-ГЭС и электрохимических генераторов в качестве накопителя излишков вырабатываемой электроэнергии позволит перераспределять энергию между потребителями внутри предприятия или накапливать ее в системе электрохимической генерации в период минимального потребления.

В настоящее время сложившаяся энергетическая ситуация на Крымском полуострове требует незамедлительного изменения электропроизводства, направленного на ресурсосбережение и повышение экологичности существующих электрогенерирующих объектов. Внедрение объектов децентрализованного энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и комбинированных систем аккумуляции избыточной энергии на фоне устаревания основных генерирующих и передающих мощностей гарантирует устойчивую работу предприятий и независимость от цен на отпускаемую энергию [1].

Целью работы является разработка схемных решений для децентрализованного электроснабжения промышленного объекта на базе мини-ГЭС и электрохимических генераторов в качестве накопителя излишков вырабатываемой электроэнергии.

Для разработки технических решений по применению мини-ГЭС и электрохимических генераторов (ЭХГ) в качестве накопителя излишков вырабатываемой электроэнергии в системе децентрализованного электроснабжения промышленного предприятия, был проведен анализ гидрологических параметров горных рек Крыма по данным многолетних наблюдений; обоснован выбор рациональной конструкции мини-ГЭС и ЭХГ с учетом особенностей территории размещения объекта. Предлагаемые технические решения являются весьма актуальными

для децентрализованного электроснабжения промышленных предприятий Крымского региона учитывая требования госпрограммы, направленной на энергосбережение традиционных энергоносителей.

Малая гидроэнергетика для децентрализованного электроснабжения удаленных объектов является весьма актуальной. Анализируя показатели среднегодового расхода рек Крыма, можно обосновать выбор мест установки мини-ГЭС с учетом территориального развития различных производств. Наиболее перспективными в гидроэнергетическом плане являются реки: Коккозка, Альма, Кача, Черная и Бельбек [2]. Данные водотоки преимущественно находятся в горной местности и в случае отсутствия достаточного напора, есть возможность создания деривационной мини-ГЭС с целью получения необходимых параметров водотока. Расход воды в данных реках в среднем от 1 до  $2,75 \text{ м}^3/\text{s}$ , что достаточно для создания достаточно мощных деривационных мини-ГЭС. Их особенностью является наличие напорного бассейна, который позволяет подавать на турбину поток воды с постоянным напором и расходом.

На основании данных о среднемесячном расходе и параметрах реки Бельбек рассчитана электрическая мощность одной мини-ГЭС. По результатам расчетов построена графическая зависимость среднемесячной выработки электроэнергии на мини-ГЭС (рис. 1).

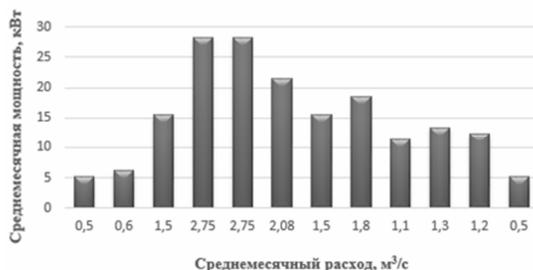


Рис. 1. График среднемесячной выработки электроэнергии одной мини-ГЭС

Анализ полученной графической зависимости среднемесячной выработки электроэнергии говорит о преимуществах применения мини-ГЭС для автономного электроснабжения промышленных предприятий в горных районах Крыма.

В качестве объекта для разработки технических решений децентрализованного электроснабжения промышленного предприятия был

выбран завод по производству пенобетонных блоков установленной мощностью 50 кВт, расположенный в с. Танковое Бахчисарайского района. В качестве основного источника электроэнергии принят каскад мини-ГЭС, так как протекающая рядом река Бельбек обладает хорошими гидрологическими показателями, а местный горный ландшафт дает возможность создания деривационной мини-ГЭС [2].

С целью разработки технических решений децентрализованного электроснабжения промышленного предприятия первоначально необходимо произвести расчет электрических нагрузок по узлам питания и по цеху в целом методом коэффициентов использования. По результатам проведенных расчетов построен график нагрузки предприятия (рис. 2).

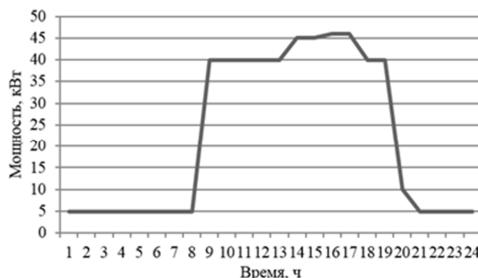


Рис. 2. График суточной нагрузки предприятия

Анализируя полученную графическую зависимость (рис. 2) можно сделать вывод, что для стабильной работы предприятия необходимо установить три мини-ГЭС мощностью 25 кВт каждая.

С целью выравнивания режима электропотребления предприятием, предлагается аккумулирование излишков электроэнергии в ночное время. Проведенные теоретические исследования систем электрохимического преобразования энергии показывают эффективность их применения в течение значительной части года как приставка к генерирующему мини-ГЭС [3]. С целью подтверждения гипотезы по повышению надежности системы, использующей энергию ВИЭ, был разработан экспериментальный стенд на основе макетного образца ЭХГ состоящего из: электролизера, емкостей хранения газов ( $H_2$  и  $O_2$ ), топливного элемента. Принципиальная схема макетного образца ЭХГ представлена на рис. 3.

Пик потребления предприятием составляет всего четыре часа и приходится на вторую половину дня. Следовательно, мини-ГЭС в период малой воды, может не обеспечить необходимое энергопотребление, и в это время в процесс включается электрохимический накопитель энергии. Во время пика генерации и провала потребления – будут заряжаться аккумулирующие емкости. Во время провала генерации и пика потребления – они будут разряжаться через ЭХГ и после преобразования направляться в общую сеть предприятия.

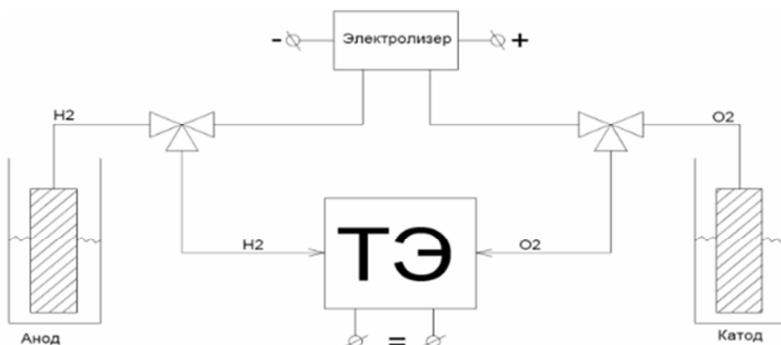


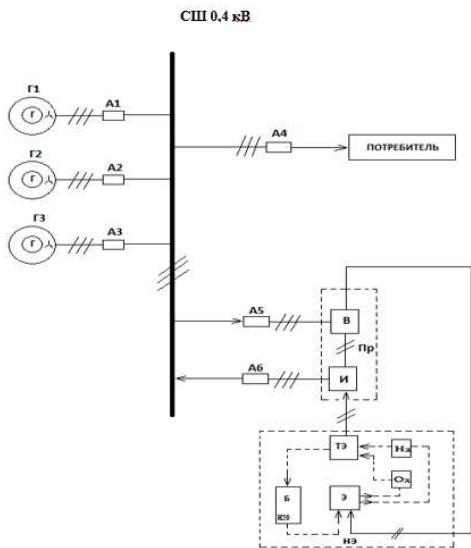
Рис. 3. Принципиальная схема разработанного макетного образца ЭХГ

Водород для ЭХГ получают прямым электролизом воды за счет избыточной электрической энергии от мини-ГЭС, таким образом решается проблема аккумулирования электроэнергии. Такая схема хранения электрической энергии может быть использована для регулирования работы электростанций на основе ВИЭ в силу высокой маневренности электролизера реакционной воды [4].

Проведенные теоретические исследования и испытания лабораторно-исследовательской установки ЭХГ позволили разработать схемное решение децентрализованного электроснабжения промышленного объекта на базе ВИЭ в составе мини-ГЭС и ЭХГ в качестве накопителя излишков вырабатываемой электроэнергии (рис. 4).

#### **Выводы:**

1. Рассмотрена возможность внедрения ВИЭ для децентрализованного электроснабжения промышленных объектов, которые позволяют существенно снизить потребление традиционных энергоресурсов.



Обозначения:

Г1-Г3 – асинхронный, трехфазный генератор;  
 А1-А6 – автоматический выключатель;  
 Пр – полный управляемый полупроводниковый 3-х фазный преобразователь в составе выпрямителя (В) и инвертора (И);  
 НЭ – накопитель энергии в составе блока топливных элементов (ТЭ), электролизера (Э), баллонов с  $H_2$  и  $O_2$  и емкости сбора реакционной воды (Б)

Рис. 4. Схемное решение децентрализованного энергоснабжения промышленного предприятия в составе мини-ГЭС и ЭХГ

2. Предложенная схема децентрализованного энергоснабжения промышленного предприятия в составе мини-ГЭС и ЭХГ в качестве накопителя избыточной электроэнергии повышает надежность системы и полностью обеспечивает бесперебойным электропитанием потребителей завода.

### Библиографический список

- Курзо А.Н.** Система автономного электроснабжения удаленных потребителей на базе возобновляемых источников энергии. / А.Н. Курзо, С.П. Муровский // Успехи современной науки: Сб. статей Межд. научно-практ. конф.. Белгород: Эпицентр, 2017. С. 54-58.
- Поверхностные водные объекты Крыма. Справочник. Симферополь: Рескомводхоз АРК, 2004. 113 с.
- Андреев В.М., Забродский А.Г., Когновицкий С.О.** Интегрированная энергоустановка с накопителем энергии на основе водородного цикла / Международный журнал «Альтернативная энергетика и экология» АЭЭ №2 (46), 2007. С. 99-105.
- Коровин Н.В.** Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Издательство МЭИ, 2005. 280 с.

# **ВНЕДРЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ**

канд. техн. наук, доц. **Муровский С.П.**

магистр **Кушнаренко Д.С.**

студент **Купленный В.О.**

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,  
г. Симферополь*

**Аннотация.** В работе рассмотрена перспектива развития нетрадиционной энергетики на Крымском полуострове с учетом роста потребления электроэнергии. Предложен вариант схемного решения автономного электроснабжения удаленного населенного пункта на базе энергоустановок возобновляемой энергетики.

Действующая политика Крымского правительства, направленная на внедрение перспективных технологий в развивающийся энергосектор полуострова, требует незамедлительной реконструкции морально устаревших генерирующих мощностей и линий электропередач (ЛЭП). На данный момент множество ЛЭП неспособны обеспечить достаточной мощностью активно развивающиеся удаленные населенные пункты, к тому же срок их эксплуатации подошел к концу и вскоре потребуется либо капитальный ремонт, либо полная замена [1].

Удаленные населенные пункты на территории Крыма по экономическим показателям целесообразно сделать энергонезависимыми от централизованных электросетей. В качестве электрогенерирующих мощностей целесообразно выбрать ресурсосберегающие объекты на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Целью работы является внедрение перспективных технологий для обеспечения автономного электроснабжения удаленного от основной электросети населенного пункта путем разработки комбинированной энергосистемы на базе возобновляемых источников энергии.

С учетом метеоклиматических условий для Крыма наиболее перспективным является развитие солнечной энергетики. Суммарный годовой приход солнечной радиации в некоторых районах полуострова превышает  $5200 \text{ МДж}/\text{м}^2$ , что является перспективным показателем для строительства солнечных электростанций (СЭС). Использование фотопреобразователей совместно с аккумуляторными батареями могло бы полностью удовлетворить потребность в электричестве удаленного

населенного пункта в солнечную погоду. Основным недостатком гибридной СЭС является потребность достаточного количества свободной и непригодной под сельскохозяйственные нужды земли, что ограничивает их повсеместное применение на полуострове [2].

Ветроэнергетика является вторым перспективным направлением развития ВИЭ, так как среднегодовая скорость ветра в Крыму находится в диапазоне от 4 до 6,5 м/с. Действующие ветроэлектростанции (ВЭС) обладают коэффициентом использования установленной мощности не менее 0,35-0,4. В качестве недостатка повсеместного внедрения ВЭС отмечается затратность их строительства в труднодоступной местности [2].

Гидроэнергетика для автономного электроснабжения удаленных населенных пунктов на территории полуострова является весьма актуальной. В Крыму наиболее перспективными в гидроэнергетическом плане, являются реки: Коккозка, Альма, Кача, Черная и Бельбек. Данные водотоки преимущественно находятся в горной местности, и в случае отсутствия достаточного напора, есть возможность создания деривационной мини-ГЭС для получения необходимых параметров водотока. Расход указанных рек в среднем от 1 до 2 м<sup>3</sup>/с, что достаточно для создания достаточно мощных деривационных мини-ГЭС [3]. Их особенностью является наличие напорного бассейна, который позволяет подавать на турбину поток воды с постоянным напором и расходом. В случае малых потребляемых мощностей достаточно установить несколько гидротурбин в русле реки на определенном расстоянии друг от друга таким образом, чтобы турбина не занимала все русло. Если требуются достаточно большие мощности, то строительство деривационной мини-ГЭС становится актуальным.

При использовании для автономного энергоснабжения удаленного населенного пункта всего одного вида ВИЭ, получаем слишком низкую надежность электроснабжения. В отличие от традиционных электростанций, у ВИЭ имеется цикличность выработки, СЭС эффективна днем, но ночью ее выработка равна нулю. Также негативно на выработку электроэнергии влияет облачная погода. Гидростанция эффективна в период половодья, но летом малые реки мелеют. Ветроэлектростанции эффективны при определенных скоростях ветра. Необходимость проведения технического обслуживания или вывода в ремонт, требует наличие резервного источника генерации. К плюсам электроснабжения от одного источника можно отнести более простые распределительные схемы. К минусам – низкую надежность и, как следствие,

необходимостью резервации аналогичных мощностей традиционных энергообъектов (ТИЭ).

Чтобы повысить надежность энергостанции с минимальным использованием ТИЭ необходима установка двух и более ВИЭ, тип которых будет зависеть от метеоклиматических особенностей территории размещения и специфики объекта. Поскольку рассматривается круглогодичная автономность, то имеет смысл выбирать ВИЭ таким образом, чтобы они компенсировали сезонные провалы генерации друг друга. В качестве примера представлено осредненное поступление солнечной и ветровой энергии на территории Крыма в течение года (рис. 1) [2].

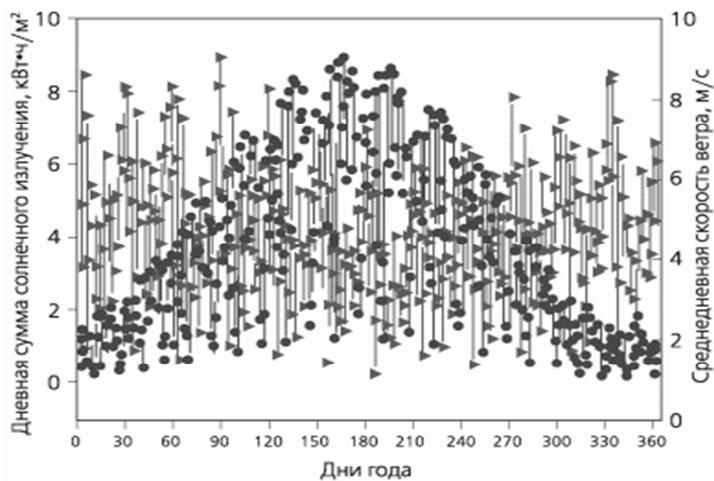


Рис. 1. Годовые среднедневные распределения сумм солнечной радиации (круги) и скорости ветра (треугольники)

На рис. 2 представлен типовой осредненный сезонный график потребления электроэнергии удаленным населенным пунктом. Пик потребления приходится на вечернее время. Следовательно, СЭС в это время не сможет обеспечить энергопотребление, но смогла бы днем. В зависимости от циклов других энергоисточников, мощности может не хватить.

Чтобы решить эту задачу, необходимо использовать дополнительный аккумулятор. Во время пика генерации и провала потребле-

ния – будут заряжаться аккумуляторные батареи (АБ). Во время пропала генерации и пика потребления – они будут разряжаться.

При нехватке выработки электроэнергии на объектах ВИЭ в системе необходимо предусмотреть резервный источник для обеспечения в первую очередь потребителей первой и второй категории.

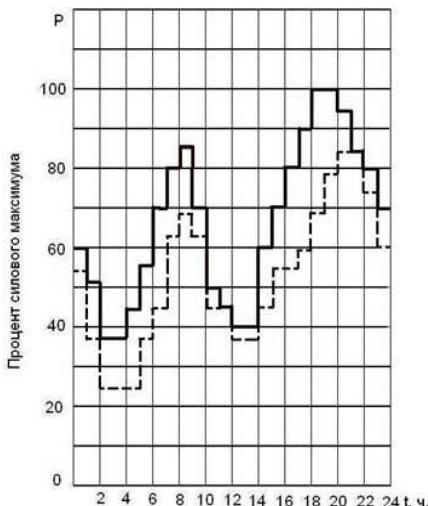


Рис. 2. Типовой осредненный сезонный график потребления электроэнергии удаленным населенным пунктом (пунктирной линией указан летний период, сплошной – зимний)

Использование в схеме нескольких источников генерации энергии требует синхронизации по напряжению, роду тока, фазе и частоте [4]. Для решения поставленной задачи необходимо использовать схему подключения, когда источники генерации подключены к шине постоянного тока, энергия которой преобразуется с помощью инвертора и поступает потребителю (рис. 3). В выбранном варианте источники достаточно просто синхронизируются с помощью преобразовательной электроники и конверторов напряжения [5]. КПД таких устройств очень высок, а рыночная стоимость с каждым годом все ниже.

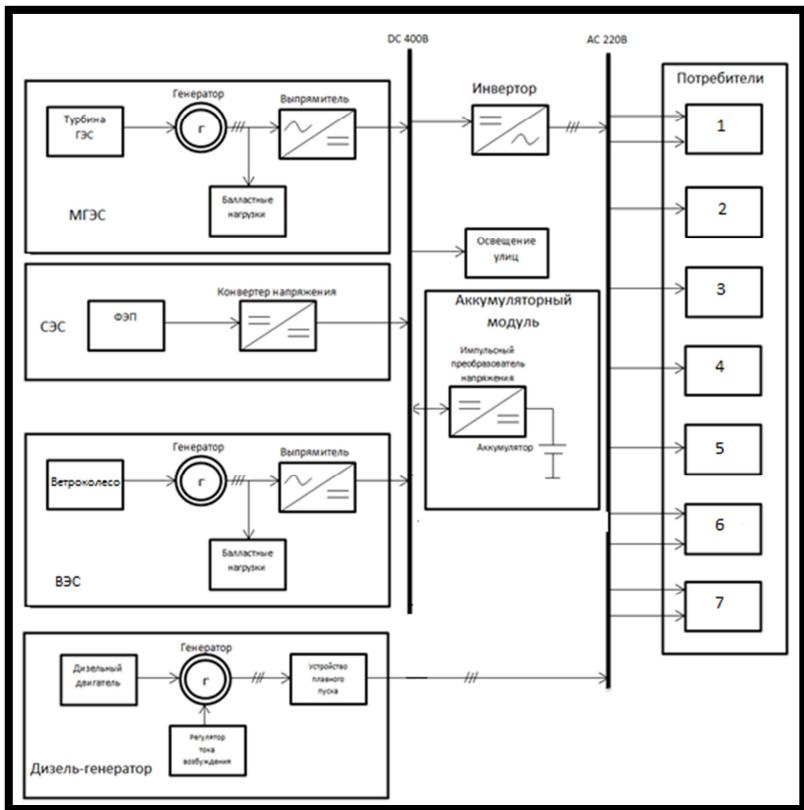


Рис. 3. Блок схема комбинированной энергоустановки автономного электроснабжения удаленного населенного пункта

Конвертор следит за тем, чтобы СЭС выдавала необходимое напряжение на шину постоянного тока. По тому же принципу работает импульсный преобразователь напряжения аккумулятора. Балластные нагрузки необходимы, чтобы поддерживать генераторы в заданном режиме работы.

Предложенная схема легко масштабируется. Общие питающие инверторы обеспечивают высокое качество электроэнергии. При этом

питание потребителей первой категории продублировано. В схеме предусмотрена защита от коротких замыканий и внезапных перенапряжений. Таким образом, возможно создание системы автономного электроснабжения удаленного населенного пункта на базе экологически чистых источников энергии с подпиткой от резервного ДГ, что позволит сохранить экологическое благополучие территории Крыма.

#### **Выводы:**

1. Рассмотрена возможность внедрения перспективных технологий на базе ВИЭ для автономного электроснабжения удаленных населенных пунктов, которые позволяют существенно снизить потребление традиционных энергоресурсов.
2. Предложенная схема системы автономного электроснабжения удаленного населенного пункта на базе ВИЭ с резервным источником позволяет полностью обеспечить бесперебойным электропитанием всех потребителей.

#### **Библиографический список**

1. Сокут Л.Д., Муровская А.С., Курзо А.Н. Возможности повышения эффективности солнечных электростанций в объединенной электрической сети за счет применения накопителей энергии // Роль науки в развитии общества: Сб. статей Межд. научно-практ. конф. Уфа: Омега Сайнс, 2017. С. 70–73.
2. Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма / Н.В. Багров, В.Н. Боков, С.П. Муровский, Э.А. Бекиров. Симферополь: Доля, 2009. 294 с.
3. Поверхностные водные объекты Крыма. Справочник. Симферополь: Рескомводхоз АРК, 2004. 113 с.
4. Муровский С.П., Сокут Л.Д. Оптимизация состава и структуры автономных систем энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии // Строительство и техногенная безопасность. 2012. № 44. С. 115–124.
5. Модуль 6-3. Автономные энергосистемы на базе альтернативных источников энергии. Тема 5. Автономные электростанции и системы на базе альтернативных источников энергии [Электронный ресурс]. URL: [http://eef.misis.ru/sites/default/files/lectures/M6\\_3\\_Lecture5.pdf](http://eef.misis.ru/sites/default/files/lectures/M6_3_Lecture5.pdf).

## **ПРИМЕНЕНИЕ БИОМЕТАНА ДЛЯ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ\***

канд. техн. наук, доц. **Суслов Д.Ю.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** Работа посвящена проблеме использования биогазового топлива в системах газоснабжения. Проведен анализ работы биогазовых станций и биометановых заводов в странах Европейского союза, рассмотрены пути использования производимого биогаза. Изучены возможность и перспективы применения биогаза в централизованных системах газоснабжения. Установлено, что общий потенциал производства биометана из сельскохозяйственных отходов Белгородской области составляет 465 млн м<sup>3</sup>/год, что составляет 14% от годового объема газопотребления области.

В последнее время в развитых странах мира наблюдается устойчивая тенденция к сокращению потребления исчерпаемых источников энергии и использованию альтернативных видов топлива. В большинстве стран приняты и работают государственные программы и законы, направленные на развитие малой энергетики и использование экологически чистых возобновляемых источников энергии [1].

В странах Евросоюза (ЕС) принята Единая экологическая стратегия до 2020 года «Стратегия 20-20-20». Согласно этой стратегии к 2020 году уровень выбросов углекислого газа в атмосферу должен сократиться на 20% (по сравнению с уровнем 1999 года), доля энергии из возобновляемых источников в общей структуре энергопотребления – вырасти до 20%, а общие энергозатраты – сократиться на 20% [1]. Одним из важных секторов возобновляемой энергетики в мире является производство и энергетическое использование биогаза. Доля биогаза в общем балансе потребления энергии в странах Европы составляет 13%.

Цель работы заключается в оценке возможности и перспективы использования биогаза в централизованных системах газоснабжения.

Биогаз – это газообразный источник энергии, получаемый в результате анаэробной ферментации органических веществ различного происхождения и состава. Биогаз состоит в основном из метана (CH<sub>4</sub>) и углекислого газа (CO<sub>2</sub>), а так же содержит незначительное количество других газов: сероводород (H<sub>2</sub>S), азот (N<sub>2</sub>), водород (H<sub>2</sub>) [2].

---

\* Работа выполнена в рамках реализации стипендии Президента Российской Федерации СП – 1716.2015.1

Суммарное количество энергии, полученной из биогаза в странах ЕС в 2015 году составило 15,612 млн. т н.э. При этом основная часть этой энергии (77%) была произведена в трех странах: Германии (7,9), Великобритании (2,3) и Италии (1,9 млн. т н.э.) [3].

В настоящее время в странах Европы функционируют 17 240 станций производства биогаза (рис. 1) [3]. На большинстве станций получаемый биогаз используется в когенерационных установках для производства тепловой и электрической энергии с подачей ее в централизованные электрические сети. При этом малая часть тепловой энергии используется для нужд работы биогазовой станции, а остальная часть тепла не используется и утилизируется. Это приводит к снижению экономической эффективности работы биогазовой станции и повышению срока окупаемости.

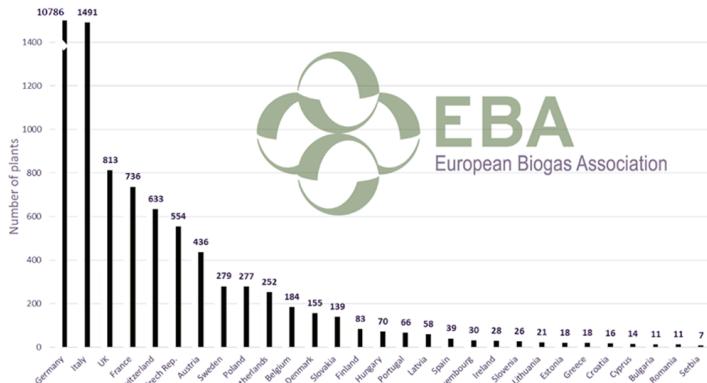


Рис. 1. Количество биогазовых станций в странах Европы

В последнее десятилетие активно развивается направление по использованию биогаза в виде биометана. Биометаном называют биогаз, доведенный до качества природного газа. Однако, для этого необходимо предусмотреть очистку биогаза от углекислого газа, сероводорода и других примесей, что ведет к увеличению затрат на его производство. Установки по производству биогаза с повышенным содержанием метана получили название биометановые заводы. В 2016 году количество биометановых заводов в странах ЕС составляет 367 единиц. Наибольшее количество заводов работают в Германии (178 ед.), Швеции (59 ед.) и Великобритании (37) (рис. 2) [4].



Рис. 2. Количество биометановых заводов в странах Европы

В Швеции большинство биометановых заводов подают биометан в автомобильные газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС) для дальнейшей заправки автотранспорта компримированным биометаном.

Необходимо отметить, что в странах Европы производимый биометан в основном используется для подачи в централизованные системы газоснабжения (более 200 заводов) [4].

Получение и использование биометана наиболее перспективно в регионах с высоким уровнем развития сельскохозяйственного сектора. Наиболее актуальна эта проблема для Белгородской области, которая производит около половины всей мясной продукции Центрального Федерального округа РФ. В Белгородской области ежегодное количество производимых отходов агропромышленного комплекса составляет более 15 млн. тонн. Общий потенциал производства биометана из образующихся отходов оценивается в 465 млн м<sup>3</sup>/год, что составляет 14 % от годового объема газопотребления Белгородской области.

Действующие и строящиеся на территории РФ биогазовые станции используют производимый биогаз в когенерационных установках для выработки электрической и тепловой энергии. При сжигании биогаза в когенерационных установках его предварительно очищают от механических примесей, влаги и сероводорода.

Основной проблемой, сдерживающей, рост производства биометана является необходимость очистки от углекислого газа и, соответственно, установки дорогостоящего оборудования.

В РФ на природные газы, используемые в промышленности и коммунально-бытовом секторе, действует ГОСТ, регламентирующий состав газа и допустимое содержание негорючих примесей (табл.1) [5].

Таблица 1  
Физико-химические показатели ГГП промышленного и коммунально-бытового назначения

Наименование показателя	Норма
Компонентный состав, молярная доля, %	Не нормируется. Определение обязательно
Низшая теплота сгорания при стандартных условиях, МДж/м (ккал/м)	не менее 31,80 (7600)
Область значений числа Воббе (высшего) при стандартных условиях, МДж/м (ккал/м)	От 41,20 до 54,50 (от 9840 до 13020)
Массовая концентрация сероводорода, г/м	не более 0,020
Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м	не более 0,036
Молярная доля кислорода, %	не более 0,050
Молярная доля диоксида углерода, %	не более 2,5
Массовая концентрация механических примесей, г/м	не более 0,001

Учитывая данные требования для подачи биометана в системы газоснабжения необходимо добиться снижения содержания углекислого газа менее 2,5 мол. %.

В странах Европы для удаления углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) применяются следующие способы очистки [6]:

- адсорбция при переменном давлении;
- абсорбция водой под давлением;
- абсорбция амином;
- абсорбция другими веществами;
- мембранный способ отчистки;
- криогенный способ отчистки.

Наиболее широкое применение получили абсорбция водой, адсорбция при переменном давлении и абсорбция аминами.

В Российской Федерации накоплен значительный практический опыт в области очистки природного газа от двуокиси углерода. Оборудование для удаления  $\text{CO}_2$  широко применяется на газовых промыслах при добыче природного газа и нефти. Однако, учитывая высокое содержание  $\text{CO}_2$  в производимом биогазе, достигающее 20-30%, необходимо провести комплекс исследований, направленных на доработку оборудования для достижения требуемой степени очистки.

После очистки биометан можно подавать в газотранспортную сеть для распределения и подачи потребителям. В зависимости от объемов производимого биометана необходимо определить метод и место подачи в централизованные газовые сети. Для подачи биометана в магистральные газопроводы необходимо обеспечить большие объемы газа с высоким избыточным давлением (3-5 МПа), что потребует установки дополнительной компрессорной станции и приведет к увеличению капитальных затрат. Учитывая, что при очистке биометана давление газа выходящего с очистных сооружений достигает 0,3 МПа, более целесообразным является подача биометана в распределительные газопроводы среднего и низкого давления.

Можно сделать вывод, что применение биоагаза в виде биометана для централизованных систем газоснабжения является перспективным направлением развития газовой отрасли. Установлено, что в регионах с высоким уровнем развития сельскохозяйственного сектора применение биометана наиболее целесообразно. Так, потенциал производства биометана из сельскохозяйственных отходов Белгородской области составляет 465 млн м<sup>3</sup>/год, что составляет 14% от годового объема газопотребления области.

### **Библиографический список**

1. Развитие рынка биотоплива в мире и в Российской Федерации [Электронный ресурс] // Российское энергетическое агентство. 2012. URL: <http://www.biogas-rcb.ru/files/helpful/Biofuels-Market-Development-in-Russia-and-Worldwide.pdf>.
2. Кущев Л.А., Суслов Д.Ю. Теоретическое описание процесса анаэробной ферментации в биогазовых установках // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С.227–230.
3. Biogas Barometer [Электронный ресурс] // A study carried out by EurObserv'ER. URL: [http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat\\_baro/observ/baro224Biogas\\_en.pdf](http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro224Biogas_en.pdf).
4. Клинкмюллер Л. Изучение немецкого опыта производства и использования биогаза/биометана в качестве альтернативных видов топлива [Электронный ресурс] // Мат-лы семинара НАК Навтогаз Украины. Киев. 17.02.2015. URL: <http://uabio.org/img/files/news/pdf/2-fachverband-biogas-part-2.pdf>.
5. ГОСТ 5542-2014 Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.
6. Гелетуха Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б. Перспективы производства и использования биометана в Украине [Электронный ресурс] // Аналитическая записка БАУ №11. 2014. URL: <http://uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-11-ru.pdf>.

## **ОТХОДЫ НАСЕЛЕНИЯ И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ**

аспирант **Шамсиева Г.Ш.**

канд. биол. наук, доц. **Найман С.М.**

аспирант **Найман Мих.О.**

магистрант **Найман М.О.**

*Казанский национальный исследовательский  
технический университет имени А.Н. Туполева,  
г. Казань*

**Аннотация.** Население городов – один из источников загрязнения окружающей среды различными химическими веществами. В данной работе рассматривается сложившаяся практика обращения с твердыми коммунальными отходами и обосновывается экономическая возможность создания системы раздельного сбора отходов.

Интенсивное развитие мегаполиса неизбежно сопровождается ростом объемов образования отходов производства и потребления. Сложившаяся практика обращения с отходами производства и потребления [1] приводит как к росту санкционированных городских свалок, так и к образованию огромного количества мест несанкционированного размещения отходов, непрерывно возникающих в самых разных частях города.

Целью данной работы была оценка возможностей использования ГИС-технологий для установления их распределения по территории города Казань.

С территории города Казани, согласно информации Росстата, в 2016 году было вывезено спецтранспортом свыше 2 млн. м<sup>3</sup> бытового мусора, или, исходя из средней плотности мусора 200...220 кг/м<sup>3</sup>, примерно 450 000 т. В этих объемах скрыт колоссальный резерв вторичных материальных ресурсов (ВМР), являющихся потенциальным сырьем для различных отраслей промышленности [2] и подлежащих сбору в РТ: макулатуры в составе твердых коммунальных отходов (ТКО) – до 41%, древесных отходов – 2%, черного и цветного металла – до 6%, отходов полимерных материалов – 6%, отходов резинотехнических изделий – 1%, текстиля – 5%, стеклобоя – 3%. Морфологический и количественный состав твердых коммунальных отходов является индикатором уровня жизни населения и зависит от множества факторов [3]. Но эти ресурсы остаются практически невостребован-

ными: почти все собираемое в г. Казани количество ВМР приходится на производственный сектор, и лишь незначительная их часть извлекается из ТКО. Это обусловлено не только отсутствием раздельного сбора, но и тем, что смешанный сбор определенных фракций ТКО без их разделения в начале жизненного цикла отходов приводит к перекрестному загрязнению отходов и необходимости сортировки и дополнительной очистки вторичных материальных ресурсов.

Таким образом, сбор отходов, предусматривающий разделение по видам и составу в целях дальнейшей утилизации, на сегодня в Казани в полной мере не реализован. Это происходит ввиду ряда организационных и экономических причин:

- отсутствие развитой инфраструктуры сбора и транспортировки отходов;
- отсутствие законодательной базы, регламентирующей обращение с отходами как с вторичными материальными ресурсами;
- отсутствие экономического стимулирования предпринимательской деятельности по сбору, транспортировке и переработке ВМР;
- отсутствие четкой структурированной информации об источниках и объемах образования вторичных ресурсов;
- низкая заготовительная стоимость вторичных ресурсов;
- отсутствие «чистого» сырья. Отходы, отсортированные на полигоне, как правило, загрязненные и требуют дополнительной очистки. Для получения чистого сырья необходима организация сбора отходов непосредственно в месте их образования, чтобы не допустить перекрестного загрязнения;
- отсутствие мотивации населения к раздельному сбору вторичных ресурсов с целью улучшения экологической обстановки, среды обитания данного населения;
- высокие расходы на транспортировку отходов.

Следовательно, система обращения с отходами в населенных пунктах, в том числе и в г. Казани, нуждается в существенных усовершенствованиях [4]. На рис. 1 показаны различные варианты обращения с твердыми коммунальными отходами.

Включение в схему мусороперегрузочной станции, состоящей из стационарных прессов и автоматически меняющихся контейнеров большой емкости, сократит расходы времени и топлива на доставку отходов до конечного пункта. Прессование снижает объем отходов в 5-7 раз. Использование мусороперегрузочных станций, расположенных в разных районах города, позволит уменьшить количество мест

несанкционированного размещения отходов, возникающих в результате сброса отходов грузовым транспортом в ближайших оврагах, лесах из-за нежелания перевозчиков совершать дальние поездки на полигоны.

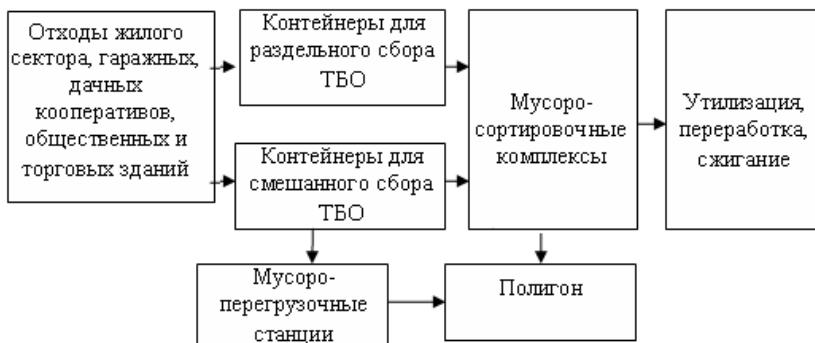


Рис. 1. Граф возможных вариантов обращения с ТКО

Для надлежащего обращения с отходами требуется таким образом организовать сбор, транспортировку, утилизацию и размещение отходов, чтобы, во-первых, минимизировать затраты на эти операции и воздействие отходов на окружающую среду, во-вторых, увеличить долю извлекаемых ВМР, и в-третьих, сделать невозможным появление несанкционированных свалок. Для этого необходимо, с одной стороны, получать информацию и управлять процессом в режиме реального времени, и, с другой стороны, проводить анализ имеющихся данных для принятия перспективных решений в сфере обращения с отходами [5].

Экономическая эффективность системы сбора, транспортировки и переработки ТКО зависит от плотности распределения отходов по территории [6].

Для анализа распределения отходов по территории одного из районов города использовались данные управляющих компаний о много квартирных жилых домах. Обработана информация о 734 домах, в которых проживают около 187 тыс. жителей. Рассчитан объем образования ТКО по домам из расчета нормы накопления отходов 225 кг/год на человека. В работе не учитывались индивидуальные жилые дома.

Плотность образования отходов на 1 кв.м площади территории определяли по формуле

$$\rho = \frac{V}{S} \cdot \frac{1}{F} p = \frac{V}{S} * \frac{1}{F},$$

где  $V$  – норма накопления отходов, кг, принимается из расчета 225 кг на человека;  $S$  – жилая площадь дома, м<sup>2</sup>;  $F$  – этажность дома.

Результаты расчета для Приволжского района города Казани представлены на рис. 2.

Как видно из рисунка, распределение объемов образования отходов по территории района крайне неравномерно. Фактор неравномерности распределения ресурсов необходимо учитывать при создании эффективной системы сбора, транспортировки и переработки твердых коммунальных отходов.

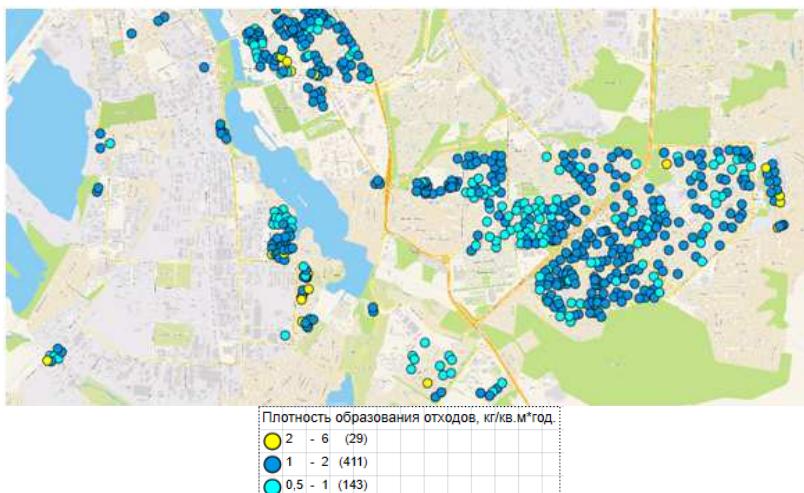


Рис. 2. Распределение отходов на территории Приволжского района города Казани

При анализе пространственного положения и взаиморасположения объектов системы незаменимым инструментом служит геоинформацион-

онная система, основным преимуществом которой, по сравнению с другими автоматизированными информационными системами, является наличие геоинформационной основы – цифровой карты.

Для создания ГИС нужна и семантическая информация, чтобы любому графическому объекту соответствовала его атрибутивная характеристика, состоящая из наборов чисел, текстов и т.п. Источники образования отходов имеют следующую атрибутивную информацию: тип источника, наименование, адрес, виды образуемых отходов. Атрибутивная информация для предприятий по переработке отходов: наименование, адрес, перерабатываемые ВМР, используемые процессы переработки, мощность, получаемое изделие

Использование геоинформационной системы для структурирования информации о расположении источников образования вторичных материальных ресурсов и их объемах, для планирования мероприятий по сбору отходов, извлечения из них ВМР, контроля и сопровождения деятельности по их транспортировке позволит повысить эффективность принятия управленческих решений в области обращения со вторичными материальными ресурсами и найти оптимальную схему организации сбора и транспортировки отходов.

### **Библиографический список**

1. Найман С.М. Первичный учет отходов при статистическом наблюдении // Экология промышленного производства. 2015. № 4. С. 8–13.
2. Бабаев В.Н., Коринько И.В., Шутенко Л.Н. Полимерные отходы в коммунальном хозяйстве города. Харьков: ХНАГХ, 2004. 375 с.
3. Вайсман Я.И. Тенденции и перспективы управления твёрдыми бытовыми отходами на урбанизированных территориях // Вестник ПГТУ. Урбанистика. 2011. № 1. С. 81–99.
4. Вайсман Я.И., Пугин К.Г. Ретроспективный анализ и перспективы развития систем управления обращением с отходами производства // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 70–84.
5. Основные направления использования информационных технологий в сфере управления движением твердых бытовых отходов / Я.И. Вайсман, Ю.В. Куликова, О.А. Тагилова, Я.С. Хохрякова // Вестник ПНИПУ. Урбанистика, 2013, № 1. С. 147–164
6. Найман С.М., Шамсиева Г.Ш., Найман М.О. Использование возможностей геоинформационных систем в управлении вторичными материальными ресурсами в городе Казань // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева, 2014. Т. 70, № 3. С. 247–250.

---

## 7. ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

---

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ НА СОСТОЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

канд. техн. наук, проф. Амосов Н.Т.

инженер Сабурова Д.А.

Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

**Аннотация.** Одним из показателей эффективной экологической политики современного государства является система управления твёрдыми бытовыми отходами (ТБО). Низкая степень переработки мусора, образующегося в результате жизнедеятельности населения городов, оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Выполнен анализ сферы обращения с отходами Санкт-Петербурга и экологической ситуации на территории города. Рассмотрены проблемы накопления мусора и потери вторичных ресурсов. Для оценки энергетического потенциала отходов Санкт-Петербурга рассчитана величина теплоты сгорания отходов для различных морфологических составов ТБО.

Рассмотрены предложения по утилизации ТБО на основе процессов пиролиза и газификации.

Неблагоприятная экологическая обстановка в современных мегаполисах отрицательно сказывается на самочувствии населения и приводит к постоянному росту различных заболеваний. По состоянию окружающей среды Санкт-Петербург не является исключением. Северная столица регулярно занимает лидирующие места в рейтингах самых экологически неблагополучных городов страны. Динамика показателей загрязнения окружающей среды в городе стабильно растет.

**Цель работы.** Анализ экологической обстановки на основе статистических данных в г. Санкт-Петербург; анализ проблем в сфере обращения с отходами; сравнительная характеристика отходов и оценка их энергетического потенциала; анализ альтернативных методик утилизации отходов с возможностью производства тепловой энергии или переработки ТБО во вторичную продукцию; оценка предполагаемого эффекта от реализации рассмотренных проектов.

В течение нескольких последних десятилетий утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов является предметом особого внимания

ния. Швеция, Германия, Дания, Нидерланды и другие страны за это время полностью пересмотрели свою политику в сфере обращения с ТБО и достигли значительного положительного эффекта. Например, в Швеции, которая является лидером по обращению с ТБО, на полигоны для захоронения вывозится не более 2% всех бытовых отходов и даже практикуется закупка отходов для переработки из соседних стран.

Согласно статистическим данным в настоящее время в нашей стране 95-97% образующихся ТБО подвергаются захоронению без какой-либо переработки или сортировки. В Санкт-Петербурге эта цифра несколько ниже: захоронению на полигонах подвергается 85% отходов. Образование отходов в северной столице составляет 11 млн. куб. м/год (по прогнозам, к 2025 году эта цифра возрастёт до 13,3 млн. куб. м) [1]. Ежегодно на полигоны Санкт-Петербурга и Ленинградской области вывозится 1800 тыс. т мусора. Ввиду отсутствия технологии раздельного сбора мусора и низкого уровня экологической сознательности населения, возможные для переработки продукты ТБО становятся непригодными для повторного использования. Кроме того, в общем составе отходов, поступающих на переработку, регулярно встречаются включения, представляющие повышенную опасность для окружающей среды (ртуть и тяжёлые металлы, содержащиеся в термометрах, люминесцентных лампах, аккумуляторах, оргтехнике и т.д.). Постоянный рост потребления и, соответственно, рост объема бытовых отходов, в совокупности с сокращением доступного пространства для их размещения все сильнее обостряет проблемы в сфере обращения с отходами.

В настоящее время на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области размещены четыре полигона: ПТО «Новосёлки», ЗАО «Завод комплексной переработки отходов (КПО)», ООО "Новый Свет-Эко", Красный Бор. Официально открыт для приёма отходов и не исчерпал свой ресурс лишь ООО "Новый Свет-Эко", проектной мощности которого хватит только до 2021 года [2].

Несмотря на полное исчерпание ресурса и острую необходимость в рекультивации, на остальных полигонах приём отходов продолжается с нарушением законодательства. Вместе с тем, значительное количество мусора аккумулируется на несанкционированных свалках. В сумме эти колоссальные площади, занятые под отходами жизнедеятельности города, представляют серьёзную угрозу для окружающей среды и здоровья населения.

Экологическая обстановка Санкт-Петербурга, как и многих других мегаполисов с развитой промышленностью, оставляет желать

лучшего. В атмосферу, поверхностные воды и почвы города регулярно поступают загрязняющие вещества с выбросами промышленных объектов и выхлопными газами автотранспорта.

Согласно оценкам экологов, загрязнение атмосферного воздуха в Санкт-Петербурге квалифицируется как высокое. Регулярно фиксируются случаи превышения норм ПДК таких опасных веществ, как оксиды азота и серы, фенола, бенз(а)пирена и т.д. Пробы, отбираемые из водотоков города, в подавляющем большинстве случаев свидетельствуют о высокой степени загрязнения; периодически повторяются случаи высокого и экстремально высокого загрязнения вплоть до семидесятикратного превышения ПДК (загрязнение р. Каменка марганцем в 2015 г.). Значительная территория города, преимущественно исторический центр и промышленные зоны, характеризуется высоким уровнем загрязнения почв тяжёлыми металлами вплоть до необходимости рекультивации. Одним из доминирующих факторов, повлиявших на создавшуюся экологическую обстановку, стали бытовые отходы.

При несанкционированном размещении, а также при сжигании, ТБО становятся источником вредных веществ. Вредные вещества сначала поступают в почву, а оттуда вымываются поверхностными водами и поднимаются в атмосферу (важно также отметить, что вплоть до 2014 года тариф на переработку отходов в Петербурге в 3 раза превышал тариф на полигонное захоронение, что не способствовало увеличению доли переработки ТБО).

По результатам экологического мониторинга, на одного жителя Санкт-Петербурга приходится более 300 кг мусора в год. До 80% из этих отходов представляют собой вторичное сырьё и вторичные энергетические ресурсы, полезное использование которых полностью отсутствует. В соответствии с Региональной целевой программой по обращению с твердыми бытовыми отходами в Санкт-Петербурге установлен усреднённый морфологический состав ТБО (рис.1).

Исходя из данных о морфологическом составе и процентном соотношении компонентов, общую низшую удельную теплоту сгорания можно определить по следующей формуле:

$$Q_p^h = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{pi}^h \cdot C_i}{100},$$

где  $Q_p^h$  и  $Q_{pi}^h$  – низшая теплота сгорания отходов и  $i$ -го компонента, кДж/кг;  $C_i$  – содержание  $i$ -го компонента, %. (табл. 1) [3].



Рис. 1. Морфологический состав ТБО в г. Санкт-Петербург

Таблица 1

Оценочный расчёт удельной низшей теплоты сгорания бытовых отходов г. Санкт-Петербург (для потока, не подвергавшегося сортировке)

Тип отходов	$C_i, \%$	$Q_{p,i}^h, \text{МДж}/\text{кг}$	$Q_{p,i}^h \cdot C_i/100$
Поливинилхлорид (ПВХ)	0,1	14,31	0,014
Чёрные металлы	0,8	0,05	0,0004
Полипропилен	0,8	45,67	0,365
Пластик высокого давления	1	46	0,46
Другие пластики	2,5	22	0,55
Дерево	2,5	13,8	0,345
Прочие материалы	2,8	12	0,336
Полиэтилентерефталат (ПЭТ)	3,4	22,55	0,767
Цветные металлы	3,8	0,71	0,027
Текстиль, кожа, резина	4,3	22,33	0,96
Полиэтиленовые пленки	7,4	47,14	3,488
Стекло	8,9	0,15	0,013
Инертные материалы	12,8	0	0
Бумага и картон	21,5	13,4	2,881
Органические отходы	27,4	5,3	1,452
Суммарная низшая теплота сгорания ТБО, МДж/кг			11,66

Учитывая, что расчёт величины теплотворной способности проводился для потока, не подвергавшегося сортировке и включает высококалорийные компоненты (макулатура, полимеры), полученная величина (табл. 1)  $Q_p^h = 11\,660$  кДж/кг, превышает реальные значения, получаемые в подобных расчётах [4].

На практике подобный морфологический состав не подлежит прямому сжиганию без сепарации по двум причинам: многие входящие в его состав компоненты не целесообразно сжигать, так как их можно рентабельно переработать и вторично использовать, а так же, при сжигании несортированного потока образуется большое количество крайне вредных веществ.

Необходимо учитывать, что такие фракции, как чёрные и цветные металлы, макулатура, текстиль, стекло и различные полимеры подлежат сепарации и дальнейшей переработке. Прошедший сортировку поток отходов обладает значительно меньшей теплотой сгорания ( $Q_p^h = 4\,694$  кДж/кг) (табл.2), однако вместе с тем появляются новые возможности его утилизации – от компостирования до переработки в биогаз.

Таблица 2

Оценочный расчёт удельной низшей теплоты сгорания бытовых отходов г. Санкт-Петербург (для потока, прошедшего сортировку)

Тип отходов	$C_i$ в пересчёте на новый состав, %	$Q_{pi}^h$ , МДж/кг	$Q_{pi}^h \cdot C_i / 100$
Дерево	5,5	13,8	0,759
Прочие материалы	6,2	12	0,744
Инертные материалы	28,1	0	0
Органические отходы	60,2	5,3	3,191
Суммарная низшая теплота сгорания отходов, МДж/кг			4,694

Теплота сгорания потока ТБО в зависимости от его морфологического состава ниже, чем у всех основных видов используемого на сегодняшний день топлива. Однако важно отметить, что экономический эффект от утилизации также включает в себя сокращение экологического ущерба от захоронения отходов и экономию традиционныхскопаемых топлив. В пересчёте на условное топливо в Петербурге ежегодно образуется 288,34 тыс. т.у.т. для прошедшего сортировку потока

с теплотворной способностью  $Q_p^h = 4,694 \text{ МДж/кг}$ , и 716,3 тыс. т.у.т. для потока, не подвергавшегося сортировке,  $Q_p^h = 11,66 \text{ МДж/кг}$ .

Анализ опыта обращения с отходами в различных странах позволил выделить следующие основные технологии:

- 1) захоронение на полигонах;
- 2) компостирование;
- 3) термические методы переработки.

Захоронение на полигонах представляет собой самый простой и дешёвый метод. В развитых странах применяется только для несгораемой части остатков ТБО после их сепарации.

Компостирование используется при утилизации органической части отходов. Технология основана на биологическом разложении органических соединений естественным путем. Также метод может быть использован и для не разделённых на фракции отходов. Компост, полученный в результате такой переработки, широко применяется в сельском хозяйстве.

Термические методы переработки включают прямое сжигание и пиролиз.

Технология прямого сжигания бытовых отходов имеет как ряд серьёзных преимуществ, так и ряд недостатков. Это наиболее апробированная из технологий, которая позволяет значительно снизить объём ТБО, а также попутно получить тепловую и электрическую энергию. Следует отметить, что при использовании этого метода образуется большое количество токсичных веществ – тяжёлых металлов, диоксинов, бифенилов и т.д. Процесс детоксикации продуктов горения требует установки дорогостоящих очистных сооружений. Усложнение технологической схемы требует привлечения дополнительных финансовых средств, что значительно снижает рентабельность процесса.

При использовании технологии пиролиза - термического разложения ТБО без доступа кислорода, часть проблем, возникающих при прямом сжигании отходов, минимизируется. Процесс газификации протекает при  $1200^\circ\text{C}$ , что предотвращает первичное образование диоксинов и фуранов. Охлаждение пиролизного газа до  $150^\circ\text{C}$  на выходе из реактора препятствует вторичному образованию токсичных соединений, которое происходит при температуре  $250\dots450^\circ\text{C}$ . При температурах выше температуры образования шлаков процесс газообразования сводится к нулю, что приводит к уменьшению объема выхода вредных газов. В результате использования этой технологии продуктом переработки являются газ и твёрдый остаток. Полученный синтез-

газ представляет смесь водорода, окиси и двуокиси углерода, азота, водяного пара с включениями углеводородов и пиролизных смол. Этот газ может использоваться для сжигания в паровом котле, в камере сгорания ГТУ или в водогрейном котле [5].

В условиях Санкт-Петербурга утилизация около 2 млн. т ТБО ежегодно, позволит уменьшить расходы топлива на теплоснабжение от 280 до 500 тыс. т.у.т. и значительно улучшить экологическую обстановку.

#### **Выводы по работе.**

1. Выполнен анализ системы обращения с твердыми бытовыми отходами в г. Санкт-Петербург.
2. На основе данных о морфологическом составе определена теплотворная способность прошедших и непрошедших сортировку потоков ТБО.
3. Предложена технология утилизации ТБО с возможностью использования пиролизного газа (синтез-газ) для производства тепловой и электрической энергии.
4. Термическая переработка ТБО позволит резко сократить площади полигонов для захоронения отходов.
5. Использование ТБО в качестве альтернативного топлива позволяет сократить расходы органического топлива до 500 тыс. т.у.т.
6. Увеличение объёма вторичной переработки ТБО позволит снизить нагрузку на окружающую среду г. Санкт-Петербург.

#### **Библиографический список**

1. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2014 году / Под ред. И. А. Серебряцкого. СПб.: ООО «Сезам-принт», 2016. 168 с.
2. О Программе "Региональная целевая программа по обращению с твердыми бытовыми и промышленными отходами в Санкт-Петербурге на период 2012 - 2020 годов": постановление Правительства Санкт-Петербурга от 29 мая 2012 г. №524: принято Правительством Санкт-Петербурга 29 мая 2012 г./ Правительство Санкт-Петербурга. 2012.
3. Ильиных Г.В. Оценка теплотехнических свойств твердых бытовых отходов исходя из их морфологического состава // Вестн. ПНИПУ. Урбанистика. Пермь. 2013. № 3 (11). С. 125-137.
4. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения / Справ. изд. А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. М.: Химия, 1990. 384 с.
5. Иванов В.Л., Скибин Д.А. Твёрдые бытовые отходы как топливо для газотурбинной установки // Вестник ПНИПУ. Пермь. 2015. № 15. С. 42–59.

# **ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК ПУТЕМ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ**

канд. техн. наук **Выборнов Д.В.**

магистрант **Кляус Б.В.**

Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры, г. Макеевка

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность снижения влияния выбросов технологических процессов производства огнеупорных материалов на экологическую безопасность окружающей среды. В результате проведенного анализа предлагается использовать в качестве утилизатора теплоты и второй ступени очистки дымовых газов для промышленных вращающихся печей установку контактно-поверхностного теплообменного аппарата, использующего в качестве теплоносителя щелочной раствор едкого натра для нейтрализации образующихся азотной и угольной кислот, улавливания мелкодисперсной пыли, а также уменьшения концентраций выбрасываемых в атмосферу оксидов азота и углекислого газа.

**Введение.** В крупных промышленных городах атмосфера подвергается тепловому загрязнению, т.к. в нее попадают выбросы со значительно большей температурой, нежели температура окружающей среды. Температура выбросов превышает среднюю многолетнюю температуру приземного слоя воздуха. В свою очередь среднегодовая температура атмосферного воздуха крупных промышленных городов на 6...7 градусов выше температуры воздуха прилегающих территорий[1].

Тепловое загрязнение окружающей среды в наибольшей мере связано с работой теплогенерирующих и теплотехнологических установок. К теплогенерирующими установкам относятся ТЭС, ТЭЦ и крупные котельные, а к теплотехнологическим – различные установки для нагрева, сушки, плавления, выпарки, спекания, обжига материалов. В свою очередь тепловое загрязнение также может возникать и как вторичный результат изменения химического состава атмосферы (парниковый эффект), на который влияет перечисленное техногенное оборудование [1].

**Содержательная часть.** Целью данной статьи является исследование возможности повышения эффективности экологических показателей, а именно определения методики, позволяющей снизить воздействие теплового загрязнения на окружающую среду, а также снижения

выбросов в атмосферу оксидов азота, углекислого газа и твёрдых частиц в виде пыли.

Одним из самых эффективных путей по решению проблем тепловых и химических загрязнений является глубокая утилизация теплоты уходящих газов от теплогенерирующего оборудования путем их охлаждения до температур ниже точки росы (50...55°C), другими словами технология конденсации водяных паров продуктов сгорания [2].

Специфика данного метода заключается в следующем:

– обеспечение условий реализации процесса глубокой утилизации теплоты;

– выбор вида и типа теплоутилизирующего оборудования, обладающего малой металлоемкостью и большой удельной теплообменной поверхностью;

– обеспечение безопасной очистки и защиты теплоутилизирующего оборудования;

– создание условий, при которых не будет возникать конденсация водяных паров на стенках тягодутьевых устройств, газоотводящего тракта, а также дымовой трубы.

Основываясь на мировой практике известно, что на текущем этапе развития технологий глубокой утилизации теплоты продуктов сгорания более перспективным является их использование в оборудовании работающем на природном газе.

Среди ископаемых видов топлива природный газ в своём составе имеет самый низкий уровень содержания углерода, при его сжигании образуется меньше CO<sub>2</sub> на единицу энергии. Он горит чисто и эффективно, с наименьшими показателями эмиссии CO<sub>2</sub>. Также большим достоинством природного газа является отсутствие в его составе сернистых соединений в отличие от твердого и жидкого топлив. При сжигании последних в дымовых газах содержится SO<sub>2</sub> (двуокись серы), которая в условиях конденсации водяных паров приводит к сернокислотной коррозии поверхностей нагрева теплогенерирующего оборудования. В отличие от мазута, природный газ в целом требует значительно меньше стадий очистки перед его конечным использованием.

Так, в США около 32% от всего объёма природного газа потребляется в промышленном секторе, где его используют в качестве котельного топлива и для производственных процессов, а 35% используется в жилых и коммерческих секторах для отопления помещений [3].

Достоинства природного газа в сравнении с другими видами топлив можно проследить по данным табл. 1 [4].

Таблица 1  
Характеристики топлив

Вид топлива	Низшая теплота сгорания $Q_n$ , МДж/м <sup>3</sup>	Высшая теплота сгорания $Q_v$ , МДж/м <sup>3</sup>	$Q_v/Q_n$ , %	Температура точки росы продуктов сгорания $t_p$ , °C	Значения pH конденсата
Высококалорийный природный газ (Н)	37,26	41,46	111,3	55,6	2,8...4,9
Низкокалорийный природный газ (L)	31,79	35,21	110,6	55,1	2,8...4,9
Пропан	93,20	101,23	108,6	51,4	2,8...4,9
Бутан	123,80	134,06	108,3	50,7	2,8...4,9
Жидкое топливо (EL)	42,84	45,79	106,9	47,0	2,3...4,5
Мазут	37,90	39,46	104,1	50,0	1,8...3,7

Природный газ группы Н (т.н. высококалорийный газ) в связи с высоким содержанием метана (от 87% до 99%) является самым высококачественным. К данной группе относятся месторождения газа расположенные на территории России [5].

Природный газ группы L (т.н. низкокалорийный газ) – это природный газ с менее высоким содержанием метана – от 80% до 87%. Если требования по качеству не выполняются (39,96 МДж/м<sup>3</sup>), то в большинстве случаев газ нельзя поставлять непосредственно конечному потребителю без дополнительной переработки [5].

Жидкое топливо EL является лёгким котельным топливом европейского стандарта [6].

Исходя из вышеизложенного, предлагается к рассмотрению пример глубокой утилизации теплоты производства огнеупорной про-

мышленности вырабатывающей вращающимися печами, работающими на природном газе.

При производстве огнеупоров от промышленных печей выбрасываются большие объёмы дымовых газов, включающих в себя оксиды углерода и азота, а также пыль от обрабатываемого сырья.

В работах [7, 8] рассмотрены составы и характеристики пылегазовых потоков от обжига глины, известняка, доломита и магнезита. В результатах их анализа было выявлено, что пыли данных материалов относятся к хорошо смачиваемым и для их улавливания эффективно использовать мокрый способ очистки газов. Результаты анализа теплового потенциала уходящих газов указывают на то, что при технологическом процессе обжига в значительной мере преобладают потери тепла с дымовыми газами.

Потери тепла с дымовыми газами от производственного процесса, состоят из тепла, которое невозможно использовать внутри печи. Например, печь нагревает продукты до 815°C, при этом дымовые газы не могут быть охлаждены ниже этой температуры без использования теплоутилизирующего оборудования. При температуре 815°C уходящие газы содержат около 50% тепловой энергии, вырабатываемой в печи при сжигании топлива. Это делает очевидным, что температура технологического процесса, а точнее, его дымовых газов определяет энергоэффективность процесса утилизации теплоты [10].

В рамках рассматриваемого примера рекомендуется в качестве второй ступени очистки газов использовать мокрую очистку совместно с глубокой утилизацией скрытой теплоты конденсирующихся водяных паров за счет установленного за циклоном контактно-поверхностного теплоутилизатора для нагрева воды используемой на предприятии.

В качестве теплоутилизатора обычно применяется пакет оребреных змеевиковых труб, внутри которых перемещается промежуточный теплоноситель, благодаря оребрению достигаются компактные размеры с большими удельными теплообменными поверхностями. За счет отсутствия прямого контакта с дымовыми газами химический состав воды остается неизменным и ее можно использовать потребителям.

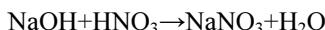
По периметру газохода над теплоутилизатором установлено несколько рядов форсуночных устройств, которые в свою очередь разбрызгивают щелочной раствор (разведенный в воде едкий натр NaOH), обладающий такими свойствами:

– при смачивании поверхности теплообменника в силу своих теплофизических качеств, а также меньшего поверхностного натяжения по сравнению с водой, водный раствор NaOH уменьшает слой налипающей пыли на теплообменной поверхности, что в свою очередь облегчает её очистку и создает лучшие условия теплопередачи к промежуточному теплоносителю;

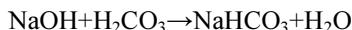
– позволяет нейтрализовать кислотную среду образовавшихся в результате конденсации водяных паров азотной и угольной кислот, тем самым увеличивает срок службы теплообменного аппарата;

В виду запыленности газового потока мелкодисперсной пылью за счет недостаточной эффективности циклона особое внимание уделяется очистке наружной поверхности теплоутилизатора, скоагулированную пыль на наружной поверхности предлагается очищать периодической гидродинамической промывкой, которая позволит удалить все загрязнения. Данная операция является экологичным и безопасным способом очистки, так как в качестве рабочего тела используется вода, подающая на поверхность под большим давлением. Это щадящая очистка, так как оператор, работающий на ГУВД (гидроустановке высокого давления) имеет возможность регулировать величину давления.

Образовавшийся шлам в шламоприемнике проходит процессы обезвоживания и осушки для дальнейшего его включения в технологический процесс изготовления стройматериалов. В результате реакции едкого натра и азотной кислоты образуется нитрат, в строительстве может использоваться в качестве добавки в бетонные смеси для повышения морозостойкости [10].



При реакции едкого натра и угольной кислоты образуется гидрокарбонат натрия, который в строительстве имеет широкое применение для производства гидроизоляции, приготовления водостойких, жаростойких и кислотостойких бетонов, повышает их долговечность, прочность, огнеупорность, атмосферостойкость [10].



Для исключения конденсации водяных паров за теплоутилизатором на стенах тягодутьевого оборудования, газоходов и дымовой трубы необходимо к уходящим газам подмешивать горячий воздух, позволяющий обеспечить требуемый режим их удаления через газоотводящий тракт, а также за счет увеличения объемов продуктов сгорания

ния и, следовательно, их скорости движения, повышает величину динамического подъема над устьем трубы, что важно из соображений улучшения условий рассеивания [2]. Для этих целей предлагается использовать горячий воздух из холодильной установки где охлаждаются уже обожженные материалы.

Принципиальная схема теплоутилизирующей установки приведена на рис. 1.

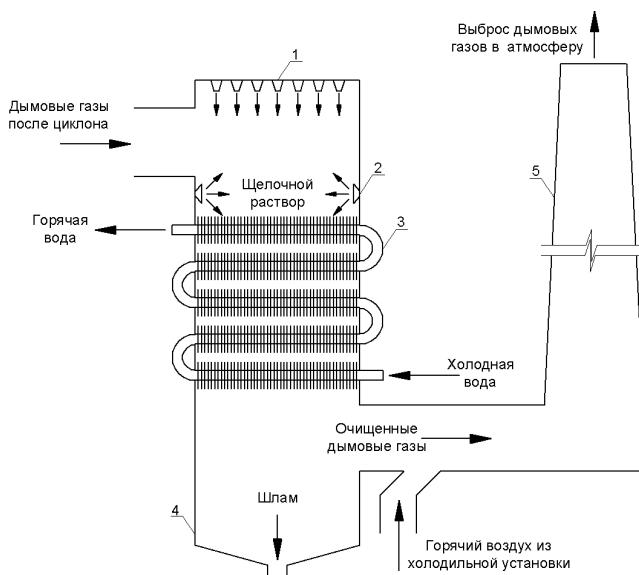


Рис. 1. Принципиальная схема теплоутилизирующей установки 1 – устройство гидроустановки высокого давления; 2 – форсунки; 3 – контактно-поверхностный теплообменник; 4 – шламоприёмник; 5 – дымовая труба

**Выводы.** При внедрении предложенной технологии глубокой утилизации теплоты дымовых газов появляется возможность улучшения экологических показателей при производстве оgneупорных материалов за счет снижения выбросов теплоты уходящих газов, уносимой пыли, оксидов азота и углекислого газа в атмосферу.

Уловленная пыль может быть вторично использована в качестве добавок при производстве бетона, а также для возврата в цикл обжига

сырья образовавшегося шлама после смачивания газового потока щелочным раствором.

Отсутствие непосредственного контакта теплоносителя с дымовыми газами позволяет использовать его теплоту для нужд отопления и горячего водоснабжения административно-бытового комбината.

Использование метода глубокой утилизации теплоты дымовых газов позволяет увеличить КПД топливопотребляющей установки на 2...3%, что соответствует снижению расхода топлива приблизительно на 8...10% [2].

### **Библиографический список**

1. Введение в защиту окружающей среды / В.Ф. Панин, С.В. Романенко, А.А. Сечин, А.И. Сечин. Томск: изд. ТПУ. 2011. 175 с.
2. **Єфімов О.В.** Вдосконалення і оптимізація моделей, процесів, конструкцій і режимів роботи енергетичного устаткування АЕС, ТЕС і опалювальних котельних. Харків: Підручник, 2013. 409 с.
3. **Gregory S. M., Carolyn R.** The future of natural gas. An interdisciplinary mit study [Электронный ресурс]. 2010. 170 p. URL: <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2011/06/MITI-The-Future-of-Natural-Gas.pdf>
4. Электронный журнал «ЭСКО» № 3 [Сайт] / информационный проект энергосервисной компании "Экологические Системы". Запорожье. 2010. URL: [http://journal.esco.co.ua/2010\\_3/index.htm](http://journal.esco.co.ua/2010_3/index.htm) (Дата обращения 02.04.2017).
5. Электронный справочник TehTab.ru [Сайт] / Свойства рабочих сред. URL: <http://tehtab.ru/Guide/GuideMedias/NaturalGas/NaturalGasOverview/> (Дата обращения 02.04.2017).
6. Электронный журнал «С. О. К. Сантехника Отопление Кондиционирование» [Сайт] / Производители горелок для отопительных котлов. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/194/> (Дата обращения 02.04.2017).
7. **Удовиченко З. В., Савич Д.В.** Исследование характеристик отходящих газов сушильных барабанов Часовоярского огнеупорного комбината // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Вып. 3. 2014. С. 37-40.
8. **Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г.** Вращающиеся печи теплотехника, управление и экология. Книга 2. М.: Теплотехник, 2004. 588 с.
9. Waste heat reduction and recovery for improving furnace efficiency, productivity and emissions performance. DC 20585-0121 [Электронный ресурс]. Washington: U.S. Department of Energy. 2004. 9 p. URL: <https://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/35876.pdf>.
10. Неорганическая химия. Пер. с румын.; Под ред. В.И. Спицина, И.Д. Колли. Т. 1. М.: Мир, 1989. 784 с.

## **ОБЕЗВОЖИВАНИЕ ОСАДКА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БИОГАЗА**

студент Груньюшкина В.В.

канд. техн. наук, ст. преп. Кузнецова Г.М.

д-р техн. наук, проф. Ягафарова Г.Г.

канд. техн. наук, доцент Насырова Л.А.

Уфимский государственный нефтяной  
технический университет, г. Уфа

**Аннотация.** В статье приведены сведения о проблеме образования, накопления, хранения и утилизации твердых бытовых отходов, о способе их переработки с получением биогаза. Приведен состав твердых бытовых отходов. Представлены сведения о результатах исследований по обезвоживанию осадка, образующегося при производстве биогаза. Для обезвоживания образующегося осадка предлагается применять метод гравитационного отстаивания с использованием флокулянта. В качестве флокулянта предлагается добавлять поликариламид. Исследования проведены в университете прикладных наук г. Мерзебург Hochschule Merseburg University of Applied sciences на факультете технических и естественных наук под руководством доктора технических наук, профессора Диттмера Хайненса.

В связи с недостатком углеводородных топливно-энергетических ресурсов, в настоящее время растет необходимость развития альтернативной энергетики. Одним из направлений развития является производство биогаза. Биогаз можно использовать в качестве топлива для двигателей транспортных средств, для производства электрической энергии, для покрытия собственных энергетических нужд, для производства тепловой энергии (котельные, сушильные установки, установки термического обезвреживания отходов) [1]. Учитывая, что по прогнозам Всемирного банка к 2025 г. «мусорное производство» возрастет до 2,2 млрд. тонн, или 1,4 кг в день на жителя, целесообразным является производство биогаза из твердых бытовых отходов [2]. Проблема образования, накопления, хранения и утилизации отходов является для Российской Федерации крайне острой. К настоящему времени количество не утилизированных отходов по стране оценивается приблизительно в 82 млрд. тонн. При этом если в Европе перерабатывается более 50 % отходов, то в России средний уровень вторичного использования промышленных отходов составляет 35 %, а твердых бытовых – не более 4 %. Скорость

прироста образования отходов ежегодно увеличивается, и за последние несколько лет составила 15-16 % [3]. В республике Башкортостан в 2015 году образовалось 1560 видов отходов в количестве 19,923 млн.т. [4]. Состав твердых бытовых отходов представлен на рис. 1.

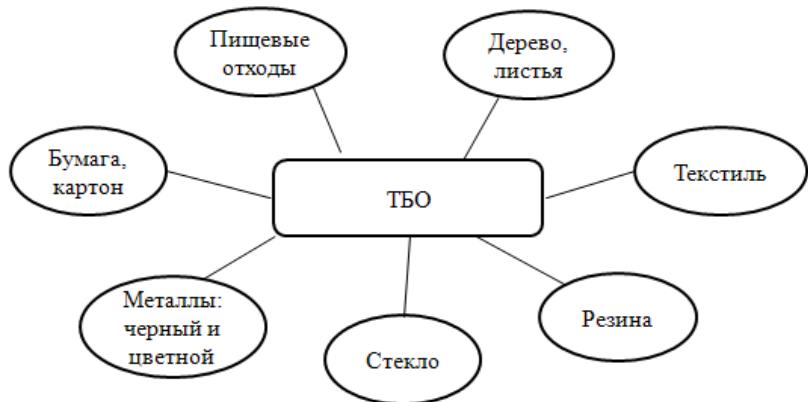


Рис. 1. Состав твердых бытовых отходов

Важность проблемы утилизации ТБО, в частности пищевых отходов, возникает по ряду причин, к которым относятся следующие пункты:

- изменение в худшую сторону здоровья населения и экологической обстановки из-за выбросов в атмосферу вредных газов, которые являются продуктами разложения отходов, загрязнение водоемов, уничтожение плодородного слоя почвы;
- появление несанкционированных и санкционированных свалок с нарушением экологических и санитарных норм и правил;
- увеличение объема производимых отходов, многообразие видов отходов, сложность и непостоянство их состава;
- утрата содержащихся в отходах ресурсов, с вторичным использованием;
- выделение под свалки и полигоны больших земельных участков [5].

При бесконтрольном размещении отходов на свалках, оказывается негативное воздействие на окружающую среду, так как отходы являются источником поступления вредных биологических и химических веществ в почву, атмосферный воздух, поверхностные и грунтовые воды, тем самым создавая угрозу здоровью и жизни населения [6]. Поэтому предотвращение попадания вредных веществ из отходов в окружающую среду является важнейшей задачей экологической безопасности при обращении с твердыми бытовыми отходами. Переработка отходов производства и потребления, которые накапливаются на полигонах и представляют собой техногенное сырье является также одним из направлений реализации концепция устойчивого развития, учитывающей интересы нынешнего и будущих поколений.

При разложении одной тонны твердых бытовых отходов может образовываться 100-200 м<sup>3</sup> биогаза. На кафедре «Прикладная экология» Уфимского государственного нефтяного университета разработан способ увеличения выхода биогаза в процессе сбраживания органосодержащих отходов. Метод заключается во внесении в сбраживаемые органосодержащие отходы комплексной стимулирующей добавки, состоящей из измельченной фитомассы амаранта багряного и аэробно стабилизированного активного ила с последующей обработкой полученной смеси ультразвуком. Ультразвук оказывает химическое, физическое и механическое воздействие на биологические системы. Амарант багряный – это однолетняя культура из семейства амарантовых. Фитомасса амаранта представляет собой источник биологических активных веществ и природных соединений. К ним относятся: витамины группы Е, В, природные стиролы, тиамин, рибофлавин, хлорофилл, а также такие минеральные составляющие, как: кальций, железо, цинк, магний, медь, фосфор, калий, незаменимые жирные кислоты, пектинов [7].

Однако при получении биогаза образуется большое количество сбраживаемой массы, которую необходимо утилизировать.

Целью данной работы является поиск эффективного флокулянта для обезвоживания осадка после анаэробного сбраживания при производстве биогаза.

Исследовательская часть работы проводилась в университете прикладных наук г. Мерзебург Hochschule Merseburg University of Applied sciences на факультете технических и естественных наук (The Department of Engineering and Natural Sciences) на кафедре химической

и экологической инженерии (Chemical and Environmental Engineering) под руководством доктора технических наук, профессора Дитмера Хайненса.

Для обезвоживания образующегося осадка применяется метод гравитационного отстаивания с использованием флокулянта. В качестве флокулянта использовали полиакриламид в дозах 0,1, 0,3 и 0,5 г/кг соответственно. Контролем служил осадок без добавления полимера. Об эффективности обезвоживания судили по результатам отстаивания в течение 2-х часов.

В результате исследований установлено, что наибольший эффект обезвоживания наблюдается после 30 минутного гравитационного отстаивания. При этом наиболее эффективная доза флокулянта составляет 0,5 г/кг.

Осадок, обработанный предложенным способом в дальнейшем рекомендуется использовать в качестве удобрения.

### **Библиографический список**

1. **Ветошкин А.Г.** Процессы и аппараты защиты окружающей среды: Учебное пособие. М.: Изд-во «Высшая школа экономики», 2008. 639 с.
2. **Шаймова А.М., Насырова Л.А., Фасхутдинов Р.Р.** Изучение факторов метангенерации в условиях полигона твердых бытовых отходов // Башкирский химический журнал. 2011. № 2. С. 172-176
3. **Ягафарова Г.Г., Леонтьева С.В., Федорова Ю.А., Сафаров А.Х.** Микробная трансформация экотоксикантов. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. 211 с.
4. Доклад Министерства природопользования и экологии Республики Башкортостан «Об экологической ситуации на территории Республики Башкортостан в 2015 году». Уфа, 2016. 176 с.
5. **Панов С.Ю., Чернецкая А.А., Жучков А.В., Рязанов А.Н.** Разработка научных основ технологии утилизации пищевых отходов методом анаэробного сбраживания // Вестник ВГУИТ. 2013. № 4. С. 200–204.
- 6 **Витковская С.Е.** Твердые бытовые отходы: антропогенное звено биологического круговорота. С-Пб.: Изд-во АФИ, 2011. 132 с.
- 7 Пат. 2458868 Рос. Федерация, МПК C02F 11/04 (2006.01). Способ увеличения выхода биогаза в процессе сбраживания органосодержащих отходов / Г.Г. Ягафарова, Ю.П. Егорова, Л.Р. Акчурина, Ю.А. Федорова, А.М. Шаймова, И.Р. Ягафаров.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательно учреждение высшего профессионального образования Уфимский государственный нефтяной технический университет. № 2010151066/05; заявл. 13.12.2010; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. 6 с.

# **ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ОЧИСТКИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ В ПОДЗЕМНЫХ ПАРКОВКАХ**

д-р техн. наук, проф. **Ильина Т.Н.**

магистрант **Исаева В.В.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** Показана целесообразность очистки выхлопных газов от автотранспортных средств в подземных парковках. Рассмотрены методы улавливания вредных веществ в вентиляционном воздухе парковок. Представлены уравнения для расчета показателя эколого-экономического ущерба окружающей среде от автотранспортных средств. Приведен расчет эколого-экономического ущерба на примере подземной парковки в городе Анапа.

**Введение.** С каждым годом экологическая обстановка в нашей стране усугубляется. Одним из основных загрязнителей воздуха являются автомобильные выхлопы. Самый загрязненный выхлоп автомобиля происходит во время запуска двигателя и его прогреве, значит на автостоянках и паркингах. Производители автомобилей год от года стремятся усовершенствовать конструкцию двигателей и выхлопных систем, однако проблема защиты окружающей среды от вредных выбросов является архиважной.

В связи с тем, что автомобиль наиболее загрязняет окружающую среду в момент запуска и прогрева двигателя, наземные открытые автостоянки не способны задерживать и очищать воздух от выхлопных газов, а строительство экологических парковок в нашей стране не так развито, как в европейских странах. Таким образом, наиболее целесообразным является строительство крытых наземных и подземных паркингов [1, 2], включающих устройства для улавливания вредных газов.

## **Цель работы:**

- оценить степень загрязнения воздуха при запуске и прогреве двигателя;
- рассмотреть методы очистки воздуха от вредных выбросов;
- выбрать способ количественной оценки эколого-экономического ущерба окружающей среде от автотранспорта.

Как уже говорилось выше, наиболее острая экологическая ситуация возникает в местах автостоянок и парковки автомобилей.

Такие нестационарные режимы, включая прогрев холодного двигателя, занимают по времени не более 3-5 минут в теплое время года и от 15-30 минут до 1-2 часов в холодный период года. В то же время работа двигателя на таких режимах сопровождается значительно большим выбросом вредных веществ с отработавшими газами (до 8-10 раз), чем на стационарных режимах работы. «Холодный» автомобиль расходует топлива на 27% больше, чем «горячий», и при этом выбрасывает больше СО на 86%, СН – 40%, NO<sub>x</sub> – на 12% [3].

В состав выхлопных газов входит около 200-300 химических соединений и веществ (табл. 1). Из них только четыре в малых концентрациях не наносят вред организму (кислород, азот, углекислый газ и вода).

Таблица 1

Состав выхлопных газов

Компоненты выхлопного газа	Содержание по объему, %		Токсичность	
	Двигатель			
	Бензин	Дизель		
Азот	74,0 - 77,0	76,0 - 78,0	Нет	
Кислород	0,3 - 8,0	2,0 - 18,0	Нет	
Пары воды	3,0 - 5,5	0,5 - 4,0	Нет	
Диоксид углерода	5,0 - 12,0	1,0 - 10,0	Нет	
Оксид углерода	0,1 - 10,0	0,01 - 5,0	Да	
Оксид азота	0 - 0,8	0,0002 - 0,5	Да	
Углеводороды	0,2 - 3,0	0,009 - 0,5	Да	
Альдегиды	0 - 0,2	0,001 - 0,009	Да	
Оксид серы	0 - 0,002	0 - 0,03	Да	
Сажа, г/м <sup>3</sup>	0 - 0,04	0,01 - 1,1	Да	
Бензпирен -3,4, г/м <sup>3</sup>	10 - 20×10 <sup>-6</sup>	10×10 <sup>-6</sup>	Да	

Существует несколько методов очистки воздуха от парогазообразных загрязнителей, по виду используемых физико-химических процессов их подразделяют на пять основных групп [4]:

- 1) промывка выбросов растворителями примесей (абсорбция);
- 2) промывка выбросов растворами реагентов, связывающих примеси химически (хемосорбция);
- 3) поглощение газообразных примесей твердыми телами с ультрамикропористой структурой (адсорбция);
- 4) термическая нейтрализация отходящих газов;
- 5) поглощение примесей путем применения каталитического превращения.

С целью полной очистки газовых выбросов целесообразно сочетать методы, в которых применяется оптимальное для каждого конкретного случая комбинирование грубой, средней и тонкой очистки газов и паров. На первых стадиях, когда содержание токсичной примеси велико, более подходят абсорбционные методы, а для доочистки — адсорбционные или каталитические [5, 6]. Каталитический способ отличается от термического, во-первых, более низкой температурой процесса окисления, 300–400 °C, во-вторых, высокой скоростью его протекания, доли секунды, что позволяет значительно уменьшить размеры реактора. Катализаторами могут быть платиновые металлы, оксиды меди, марганца и др.

Так же одним из перспективных способов защиты окружающей среды и эффективного энергопользования является рекуперация тепла вентиляционного воздуха в подземных автопарковках [7-10].

В связи с поступлением большого количества загрязняющих веществ в атмосферу, возникает необходимость количественной оценки степени воздействия автотранспорта на окружающую среду. Среди экономических показателей, характеризующих экологические проблемы взаимодействия автотранспорта и окружающей природной среды, достаточно хорошо изучен показатель эколого-экономического ущерба. Этот показатель заключается в определении фактических и возможных материально-финансовых потерь от изменения количественно-качественных параметров окружающей среды в целом, а также ее отдельных природных компонентов (водные и земельные ресурсы, атмосферный воздух и т.п.) [11-13].

В соответствии с Временной методикой определения предотвращения экологического ущерба, оценка величины экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха представляет собой [14]:

$$Y^a = Y_{уд}^a \cdot M_{\pi}^a \cdot K_3^a \quad (1)$$

где  $Y^a$  – величина экономической оценки выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, руб;  $Y_{уд}^a$  – удельно эколого-экономический ущерб от выброса (сброса) одной условной тонны загрязнений, руб./ усл.т;  $M_{\pi}^a$  – приведенная масса выброса загрязняющих веществ, усл.т/год;  $K_3^a$  – коэффициент, учитывающий экологические факторы для рассматриваемой территории (для Северо-Кавказского экономического района составляет 1,92).

Приведенная масса выбросов определяется по формуле:

$$M_{\text{п}}^{\text{а}} = \sum_{i=1}^N m_i \cdot A_i \quad (2)$$

где  $m_i$  – фактическая масса выброса  $i$ -го вида загрязняющего вещества в год, т/год;  $A_i$  – показатель относительной опасности  $i$ -го вида загрязняющих веществ, усл.т/т [14].

Удельно эколого-экономический ущерб от выброса одной условной тонны загрязняющих веществ вычисляется по формуле:

$$Y_{\text{уд}}^{\text{а}} = Y_{\text{уд}, 1998}^{\text{а}} (1 + r)^m \quad (3)$$

где  $Y_{\text{уд}, 1998}^{\text{а}}$  – эколого-экономический ущерб от выброса одной условной тонны загрязняющих веществ в атмосферный воздух за 1998 г., составляющая для Северо-Кавказского района 53,2 руб./усл.т;  $r$  – уровень инфляции;  $m$  – количество лет.

Таким образом, данная методика дает оценку эколого-экономическому ущербу от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в текущем периоде. На примере города Анапа в Северо-Кавказском экономическом районе, эколого-экономический показатель ущерба окружающей среды от подземной парковки на 106 машино-мест составил – 1 432 447 руб./год. Так же существуют другие, более обширные, методы определения экологического ущерба окружающей среды, определяющим фактором которых является, например, здоровье и трудоспособность населения [3].

### **Выводы**

На примере подземного паркинга в городе Анапа был рассчитан эколого-экономический показатель ущерба атмосферного воздуха от выхлопных газов автомобилей, который составил 1 432 447 руб./год. Для снижения эколого-экономического ущерба, необходимо предусматривать очистку выхлопных газов автотранспортных средств. В настоящее время, наиболее универсальным способом является постадийная очистка газов сорбционно-кatalитическим методом.

### **Библиографический список**

1. Кондрашин Б.В. Экологические парковки как инновационная форма природопользования // Научное сообщество студентов XXI столетия. Естественные науки: сб. ст. по мат. XXXIX международной студенческой науч.-практ. конференции. 2016. № 3 (38). С. 80–87.

2. **Исаева В.В., Литвинов И.В.** Анализ систем вентиляции подземных паркингов [Электронный ресурс] // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2017.
3. **Левда Н.М., Постников В.П.** Оценка экологического ущерба населению и экономике региона от загрязнений атмосферного воздуха // Экономика природопользования. 2013. № 25 (328). С. 37–45.
4. **Ветошкин А.Г.** Процессы и аппараты газоочистки: учебное пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2006. 201 с.
5. **Батенков В.А.** Охрана биосфера: учебно-методическое пособие. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2002. 193 с.
6. **Наилова В.Н., Топоркова А.А.** Способы очистки воздуха от вредных веществ от выбросов закрытых автопарковок // Электронный научный журнал. 2017. № 4-2 (19). С. 375–378.
7. **Ильина Т.Н., Бельмаз Д.Н.** Анализ и способы утилизации вторичных энергоресурсов нефтеперерабатывающего предприятия // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 189–193.
8. **Ильина Т.Н., Бельмаз Д.Н.** Способы использования сбросного тепла от установок первичной переработки нефти // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова 2013. № 5. С. 198–202.
9. **Ильина Т.Н.** Утилизация вторичного тепла в производственных цехах хлебопекарных предприятий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 3. С. 147–150.
10. Ассимиляция отработанных газов автомобиля в закрытой автопарковке / В.Н. Наилова, И.Н. Логачев, А.А. Баромыченко, И.В. Небыльцова // Молодежь и научно-технический прогресс: Сборник докладов IX международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2016. С. 195–198.
11. **Цыплакова Е.Г., Янкевич Ю.Г.** Эколого-экономическая оценка обеспечения экологической безопасности автотранспорта в зоне парковок // Экономика нового мира. 2016. № 3. С. 87–105.
12. **Постников В.П.** Анализ загрязнения атмосферного воздуха: национальный и региональный аспекты // Вестник ВолГУ. Серия 3: Экономика. Экология. 2014. № 1 (24). С. 117–124.
13. **Соколов Л.И., Козлова А.Г.** Эколого-экономическая эффективность предприятий: учебное пособие. Вологда: ВоГТУ, 2001. 60 с.
14. Временная методика определения предотвращаемого экологического ущерба: утв. председателем Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды 09.03.1999.

# **ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗОЛ-УНОСА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

канд. техн. наук, доц. **Кожухова Н.И.**

канд. техн. наук, доц. **Лебедев М.С.**

канд. биол. наук, доц. **Василенко М.И.**

канд. биол. наук, доц. **Гончарова Е.Н.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г.Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** Отвалы теплоэлектростанций в России занимают значительные территории, являются источником загрязнения воздушного и водно-го бассейнов, способствуют увеличению минерализации грунтовых вод и по-паданию в окружающую среду радиоактивных элементов. В работе приведены результаты экспериментов по выявлению физико-химических, химических свойств и токсикологического влияния низкокальциевых зол-уносов пяти тепло-ых электростанций на окружающую среду.

Одним из наиболее значимых источников загрязнения окружающей среды являются крупнотоннажные твердые отходы тепловых электростанций (ТЭС). В связи с этим, в ряде регионов эти отвалы значительно осложнили экологическую обстановку. Если учесть, что значительная часть электроэнергии в стране (около 70 %) вырабатывается при сжигании твердого топлива, то рост объемов золошлаковых отходов (ЗШО) будет продолжаться и в будущем. Одним из менее вос требованных видов ЗШО являются золы-уноса – тонкодисперсные отходы кислого состава, получаемые в результате сжигания каменно-угольного топлива. Это связано с их инертностью по отношению к воде и неспособностью проявлять вяжущие свойства, что обеспечило бы их активное применение в строительной отрасли. На сегодняшний день существуют редкие примеры использования кислых зол-уноса ТЭС [1, 2], доля которых в общем объеме ЗШО не ниже 10 %, а объемы утилизации в РФ не превышают 7–10 % [3]. Складирование накап ливающихся зол-уноса на открытых площадках может явиться причиной негативного воздействия на экосистемы близлежащих территорий и экологическую обстановку в целом [4].

Ранее авторами были изучены различные золы-уноса отечествен- ного и зарубежного производства с точки зрения возможности их при менения в качестве экологически безопасного сырья [5]. Применяемые в работе методы биотестирования продемонстрировали в целом, по-

ложительное или нейтральное влияние на биообъекты, однако, при этом фиксировались существенные различия оказываемого воздействия в зависимости от производителя зол-уноса, причины которых, на сегодняшний день практически не изучены.

В данной работе представлены результаты исследований по выявлению физико-химических, химических свойств и токсикологического влияния зол-уноса на окружающую среду.

С целью выявления причин токсичности водных вытяжек зол-уноса провели их исследование на предмет определения величины pH, общей жесткости, сухого остатка, характеризующего присутствие растворимых солей в составе фильтрата, состава остатка зол после фильтрации. Все перечисленные показатели являются экологическими факторами водной среды, действие которых на живые системы являются определяющим.

Измерение водородного показателя pH осуществлялось с помощью иономера pH-150M («Гомельский завод измерительных приборов»). Состав сухих остатков из водных вытяжек определялся с помощью энергодисперсионного спектрометра на базе сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU и ИК-Фурье спектрометра VERTEX 70 («Bruker Optics») (изучались спектры поглощения таблеток материалов с бромидом калия в средней ИК-области  $370\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ ).

Исследования проводились на пяти низкокальциевых золах-уноса отечественных и зарубежных тепловых электростанций: Троицкой ГРЭС (РФ), Новотроицкой ТЭС (РФ), Рефтинской ГРЭС (РФ), Lafarge (США), Type F (США). В качестве контрольного материала был выбран портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Белгородский цемент».

По содержанию естественных радионуклидов в соответствии с ГОСТ 30108-94 и Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009) все исследованные золы относятся к малоопасным, что определяет возможность их использования во всех видах строительства.

При изучении pH-показателя водных вытяжек зол-уноса установлено, что происходит увеличение щелочности для всех образцов по сравнению с водородным показателем аэрированной среды ( $\text{pH}>8,23$ ). Это свидетельствует о том, что данные материалы содержат в своем составе растворимые щелочные компоненты, однако, варьируемые в широком диапазоне с минимальным содержанием в золе Новотроицкой ТЭС ( $\text{pH } 8,37$ ), и максимальным – для портландцемента ( $\text{pH } 12,55$ ),

что связано с наличием гидроксида кальция. Водородный показатель водных вытяжек зол-уноса Троицкой ГРЭС, Рефтинской ГРЭС, Lafarge, Type F превышает значение для золы Новотроицкой ТЭЦ и находится в достаточно узком интервале (рН 9,00–9,33).

Степень жесткости водных экстрактов, т.е. концентрация ионов щелочноземельных металлов в составе зол-уноса способна оказывать воздействие на жизнедеятельность живых организмов. Наибольшая жесткость водных вытяжек наблюдали для отходов Lafarge и Type F (США) – 15,2 -17,1 мг-экв/л. Другие вытяжки зол-уноса имели общую жесткость от 4,8 до 6,9 мг-экв/л.

Помимо общего содержания солей важным является также их элементный состав (табл. 1). В табл.1 приведены следующие сокращения зол-уноса: Рефтинской ГРЭС (FA1), Троицкой ГРЭС (FA2), Новотроицкой ТЭС (FA3), Lafarge (FA4), Type F (FA5).

Таблица 1  
Элементный состав сухих остатков водных вытяжек  
исследуемых материалов

Материал	Содержание химических элементов, вес. %											
	O	Ca	Mg	Na	K	S	C	Cl	N	Si	F	Al
FA1	19,8	5,0	2,6	16,1	3,2	4,7	16,1	31,8	—	0,6	0,1	0,1
FA2	35,3	7,1	6,4	5,0	5,3	6,1	10,3	19,8	1,5	2,6	0,4	0,1
FA3	36,8	7,1	5,8	6,1	3,7	5,0	8,7	21,3	3,4	1,6	0,6	—
FA4	45,7	15,7	0,7	4,0	1,7	14,1	13,0	4,3	—	0,7	—	0,1
FA5	40,5	10,8	0,5	7,0	1,3	9,7	22,3	7,2	—	0,2	—	0,1
Портландцемент	11,7	16,4	0,1	5,4	10,7	1,5	9,3	44,8	—	0,1	—	0,1

Полученные результаты свидетельствуют о наличии таких элементов, как сера, хлор, углерод, в меньшей степени азот, фтор, фосфор, которые характеризуют кислотный остаток, а также присутствие катионов кальция, магния, натрия, калия, являющихся щелочными. Высокое содержание  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  обеспечивает неблагоприятные условия для развития живых организмов.

Существенно разный элементный состав сухих остатков позволяет говорить о разной степени вымывания ионов из зол-уноса. Кроме того, моделировали воздействие осадков на отвалы длительным промыванием отходов дистиллированной водой (осадками).

По результатам анализа после промывки в золах-уноса наблюдается значительное снижение содержания оксидов  $\text{SO}_3$ , и в меньшей степени –  $\text{CaO}$  (табл. 2).

Таблица 2

Изменение химического состава зол-уноса ТЭС  
при длительной промывке водой

Оксиды, масс. %	Зола-уноса производства									
	FA4		FA5		FA2		FA3		FA1	
	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	89,0	90,5	89,7	90,6	94,6	94,4	91,9	89,5	94,5	94,5
TiO <sub>2</sub>	1,07	1,07	1,07	1,07	1,10	1,06	0,97	1,22	1,17	1,12
MgO	0,80	1,45	1,04	1,43	0,55	0,69	1,00	3,05	0,58	0,74
CaO	3,76	3,2	3,36	3,07	1,38	1,2	3,74	2,13	1,28	1,22
Na <sub>2</sub> O	0,64	0,78	0,87	0,78	0,64	0,79	0,63	0,91	0,52	0,56
K <sub>2</sub> O	1,68	1,67	1,65	1,65	0,64	0,64	0,65	2,33	0,75	0,73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,33	0,53	0,48	0,53	0,54	0,58	0,36	0,43	0,48	0,48
SO <sub>3</sub>	1,33	0,44	1,42	0,34	0,21	0,05	0,10	0,03	0,15	0,07

Наиболее существенное уменьшение массового содержания оксида серы происходит на золах-уноса американского происхождения – FA4 и FA5. Это обуславливает наличие сульфатов в составе сухого остатка, что подтверждается данными исследований.

По результатам ИК-спектроскопии во всех пробах сухих остатков было обнаружено содержание сульфатов, преимущественно, кальция и различных его модификаций: гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), бассанит ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) – колебания  $\text{SO}_4^{2-}$ -групп с характерными полосами поглощения (ПП) 601, 660, 668, 1096, 1118, 1140, 1150  $\text{cm}^{-1}$  и структурных OH-групп с полосами поглощения в значениях частот 1620, 1686, 3243, 3406, 3492, 3547, 3608  $\text{cm}^{-1}$ ) (рис. 1). В контрольном образце портландцемента были обнаружены карбонаты (пики в значениях 710, 874, 1405  $\text{cm}^{-1}$ ). Обнаружить наличие третьей группы солей – хлоридов – по ИК-спектрам очень проблематично, т.к. эти соли в большинстве своем прозрачны в ИК-диапазоне, их можно обнаружить по сорбированной воде, но присутствие других кристаллогидратов усложняет эту задачу. Однако обнаружить их удалось с помощью качественного РФА (рис. 2).

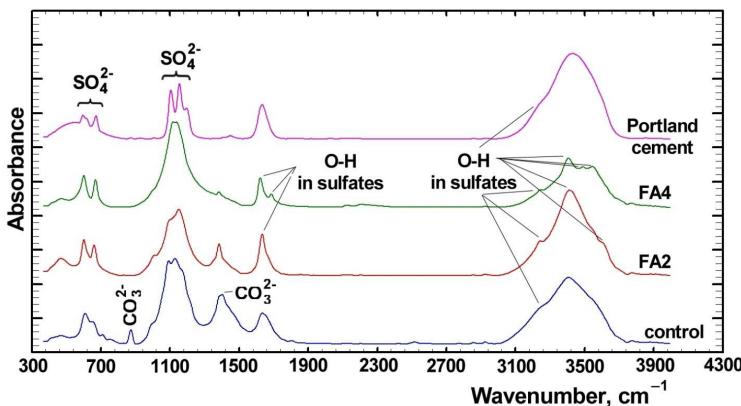


Рис. 1. ИК-спектры сухих остатков водных вытяжек

В частности, галит является составной частью всех водных вытяжек. Хлориды калия и магния удалось диагностировать в пробах из зол-уноса российского производства (FA1–FA3). Для зол-уноса FA4 и FA5 (рис. 2) характерно преобладание сульфатов в сухих остатках, преимущественно гипса. Появление отражения сассолита (борной кислоты) на рентгенограммах вызвано малым количеством материала для исследования и преобладанием его при пробоподготовке (рис. 2).

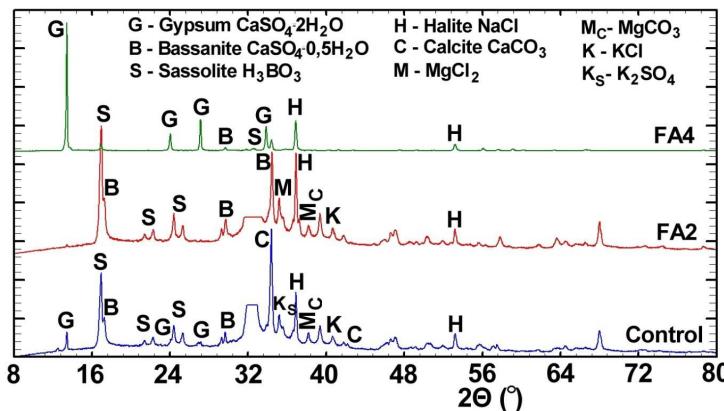


Рис. 2. Рентгенограммы сухих остатков из водных вытяжек

В остатках от вытяжек из FA1–FA3 преобладают кристаллы хлоридов натрия, магния и калия, в меньшей степени представлены карбонаты и сульфаты (рис. 2). Состав сухих остатков из американских зол-уноса - FA4 и FA5 отличается преобладанием сульфатов кальция, значительно в меньшей степени представлены хлориды.

Как показано в работе [5], в условиях воздействия природных вод из зол уноса вымываются вещества, представляющие опасность для живых организмов. На основании результатов биотестирования водных вытяжек зол при использовании в качестве тест-объектов раков *Daphnia magna Straus* установлена их токсичность, проявляющаяся в резком повышении смертности дафний (более 90 %) при сокращении их срока жизни (не более 24 часов). Высокая концентрация вымываемых солей в водных вытяжках зол может являться причиной высокой смертности дафний. Эксперименты, проведенные на других тест-организмах продемонстрировали эту же закономерность.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов установлено, что в большей мере на окружающую среду будут влиять золы-уноса производителей США. Наименьшей степенью воздействия на живые организмы обладает зола-уноса Новотроицкой ТЭС, водная вытяжка которой имела наиболее близкое значение pH к нейтральному, наименьшее количество вымываемых солей, среднее значение жесткости.

### **Библиографический список**

1. Белякова Ж.С., Величко Е.Г., Комар А.Г. Экологические, материаловедческие и технологические аспекты применения зол-уноса ТЭС в бетоне // Строительные материалы. 2001. № 3. С. 46–48.
2. Гончарова Е.Н., Порожнюк Л.А. Исследование возможности использования отходов в качестве биоцидных добавок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2006. № 13. С. 35–39.
3. Назиров Р.А., Крафт С.Л. Экспериментальная оценка выщелачивания естественных радионуклидов в процессе гидрозолоудаления высококальциевых зол // Изв. вузов. Строительство. №1 (589). Новосибирск: НГАСУ, 2008. С. 82–85.
4. Крафт С.Л. Изучение проблемы загрязнения водных ресурсов естественными радионуклидами в процессе гидроудаления золошлаковых отходов на теплоэнергетических станциях // Труды НГАСУ. Новосибирск: НГАСУ, 2008. Т. 11. №1 (43). С.148–152.
5. Ecology-toxicology study of low-calcium solid wastes from power plant /N.I. Kozhukhova, M.S. Lebedev, M.I. Vasilenko, E.N. Goncharova// International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. V. 8, №.3. P. 15349-15360.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ШЛАМА НА ТЭЦ

аспирант **Найман Мих.О.**

канд. биол. наук, доц. **Найман С.М.**

магистрант **Найман М.О.**

*Казанский национальный исследовательский  
технический университет имени А.Н. Туполева,  
г. Казань*

**Аннотация.** Рассматриваются проблемы в оценке крупнотоннажных отходов на примере образования шлама при очистке воды на теплоэнергетических станциях. Анализируется существующее положение при учете данного вида отходов и предлагается перспективное направление для улучшения ситуации при определении заполняемости шламоотвалов.

На предприятиях теплоэнергетики, где потребляемая вода – один из самых крупнотоннажных ресурсов, значительное количество образующихся отходов представляют собой отходы водоподготовки – недопал извести, шлам химводоочистки (ХВО), фильтрующие материалы и т.п. На большинстве таких предприятий имеются находящиеся на балансе самого предприятия и согласованные с природоохранными органами места временного размещения данных видов отходов – шламоотвалы, золоотвалы и др.

Шлам образуется на водоподготовительных установках (ВПУ) при обработке воды, предназначенный для восполнения потерь пара, конденсата, сетевой воды ТЭЦ и потребителей. Качество очищенной воды, подаваемой в пароводяной цикл котлов, должно обеспечить безаварийный (безнакипной, безкоррозионный) режим их работы, от чего во многом зависит надежность и экономичность работы всей ТЭЦ.

Для оценки водопотребления и водоотведения существенное значение имеет возможность применения упрощенных балансовых схем [1]. Частным случаем водоотведения является загрязнение сточных вод и образование твердых осадков в результате технологического процесса [2].

Целью данной работы было установление количества шлама на основе материальных потоков.

Первой ступенью ХВО является предочистка, обычно состоящая из известкования, коагуляции в осветителях, отстоя в баках, осветления на механических фильтрах [3]. При предочистке происходит очистка воды от механических, взвешенных, органических, коллоид-

ных веществ, от солей бикарбонатной жесткости, железа и кремнекислоты (частично).

При химической водоподготовке в процессе обработки воды в осветитель дозируются известь и сернокислое железо (коагулянт). В результате обработки образуется карбонатный шлам, состоящий в основном из взвешенных веществ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  и гидроокиси железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , а также органических веществ типа гуматов и пр. Шлам с водой в виде продувки с осветлителей направляется в систему шламоудаления с шламоотстойником. Туда же могут направляться высокоминерализованные сточные воды от регенерации ионообменных фильтров, содержащие, в зависимости от принятой схемы дальнейшей водоочистки, хлориды и сульфаты кальция, магния и натрия (до нескольких десятков  $\text{г}/\text{дм}^3$ ). Регенерационные стоки могут также содержать измельченный фильтрующий материал и примеси, входящие в состав исходных регенерационных растворов (например, техническая поваренная соль включает до 7% различных примесей).

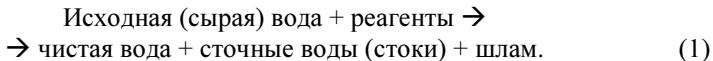
Результатом химводоподготовки является очищенная вода, используемая далее в пароводяном цикле станции. Но кроме этого целевого продукта – воды, образуются также сточные воды и шлам, являющиеся отходами (жидкими и твердыми) производства очищенной воды.

Количество исходной (свежей) и сточной воды на предприятии сначала – на стадии проектирования систем водоснабжения и водоотведения – нормируется, а затем, на стадии эксплуатации, в зависимости от наличия или отсутствия приборов учета либо определяется фактически по инструментальным замерам, либо расчетным путем с помощью установленных нормативов для конкретных технологических процессов.

Количество шлама и загрязняющих веществ в стоках определяется на предприятиях по факту их образования либо расчетным путем также в зависимости от качества исходной воды и схемы ее подготовки. Шлам при работе ВПУ рассматривается не просто как отход, оказывающий отрицательное влияние на окружающую среду, но как важный показатель ведения технологического режима осветлителя – он влияет на процесс осветления воды: например, при коагуляции количество осадка, образующегося в осветлителе, зависит от мутности исходной и осветленной воды, дозы коагулянта и количества в нем нерастворимых примесей [3].

Мы для определения количества отходов воспользуемся упрощенным методом построения балансовых схем.

Балансовая схема расхода ресурсов при производстве очищенной воды выглядит следующим образом:



В исходной воде содержатся различные примеси ЗВ<sub>исх</sub>, которые при водоподготовке переходят в нерастворимый твердый осадок – шлам. Кроме того, в шлам переходят и действующие вещества (соли) реагентов. Но часть примесей остается в сточных водах, загрязняя их. То есть можно сказать, что валовый сброс загрязняющих веществ с ВПУ (ЗВ<sub>ВПУ</sub>) состоит из шлама и загрязняющих веществ сточных вод ЗВ<sub>ст</sub>:

$$ЗВ_{ВПУ} = ЗВ_{ст} + \text{Шлам.} \quad (2)$$

За год масса загрязняющих веществ ЗВ в различных видах производственных вод составляет:

$$ЗВ_{исх} = V_{исх} \cdot C_{ЗВисх}, \text{ т/год;} \quad (3)$$

$$ЗВ_{чист.в} = V_{чист.в} \cdot C_{ЗВчист.в}, \text{ т/год;} \quad (4)$$

$$ЗВ_{ст} = V_{ст} \cdot C_{ЗВст}, \text{ т/год;} \quad (5)$$

$$\text{Реагенты} = M_{pear} = \sum [M_{действ.в-ва} + \text{Балласт (\% от } M_{pear})], \text{ т/год,} \quad (6)$$

где  $V_{исх}$ ,  $V_{чист.в}$ ,  $V_{ст}$  – объемы исходной, чистой и сточной воды, соответственно ( $\text{м}^3/\text{год}$ );  $C_{ЗВисх}$ ,  $C_{ЗВчист.в}$ ,  $C_{ЗВст}$  – концентрации загрязняющих веществ в исходной, чистой и сточной воде, соответственно ( $\text{мг}/\text{дм}^3$ );  $M_{pear}$ ,  $M_{действ.в-ва}$ , Балласт, % от  $M_{pear}$  – масса, соответственно, реагентов, действующего вещества и балласта в каждом реагенте (содержание действующего вещества обычно приводится в паспортных данных о реагенте, например, 45%-ая щелочь или известь, содержащая 20 % CaO), т/год.

Так как балластная часть реагентов (Балласт) представляет собой либо нерастворимую часть Балласт<sub>н.р</sub> (недопал извести), сразу переходящую в отходы, либо воду Балласт<sub>в</sub> (в 45%-ом растворе каустической соды содержится 55% воды), увеличивающую объем поступающей воды, то тогда балансовая схема веществ при образовании шлама представляет собой:

$$3B_{исх} + M_{реаг.н.р} + M_{действ.в-ва.в} = 3B_{чист.в} + 3B_{ст} + Шлам, \quad (7)$$

где  $M_{реаг.н.р}$  – масса сухих реагентов, содержащих в своем составе и действующее вещество, и нерастворимые примеси;  $M_{действ.в-ва.в}$  – масса действующего вещества реагентов, представляющих собой водный раствор.

Из уравнений (2) и (7) вытекают формулы (8) и (9):

$$3B_{ВПУ} = 3B_{исх} + M_{реаг.н.р} + M_{действ.в-ва.в} - 3B_{чист.в}, \quad (8)$$

$$\text{Шлам (обезвож)} = 3B_{исх} + M_{реаг.н.р} + M_{действ.в-ва.в} - 3B_{чист.в} - 3B_{ст}. \quad (9)$$

Если недопал извести или другие балластные фракции не поступают на шламоотвал, а складируются отдельно и затем вывозятся с территории предприятия, то формула (8) преобразуется в вид:

$$\text{Шлам (обезвож)} = 3B_{исх} + M_{действ.в-ва.в} - 3B_{чист.в} - 3B_{ст}. \quad (10)$$

Как видно из выведенных уравнений (9) и (10), количество образующегося на станции шлама легко рассчитать, обладая минимумом исходной информации – концентрациями загрязняющих веществ в сырой, сточной и чистой воде, объемами этих вод и массой использованных реагентов. Какие бы реагенты, какие бы составы этих реагентов ни применялись, сколько бы в них примесей ни содержалось, каковы бы ни были система водоснабжения станции – прямоточная или обратная [1] и технология очистки воды как при водоподготовке, так и при доведении состава сточных вод до нормативных показателей, в итоге количество шлама будет зависеть только от массы использованных реагентов и количества поступивших с исходной водой и сброшенных в составе сточных вод примесей. Для расчета количества отходов неважно, экономит предприятие реагенты и воду или нет, использует повторно отработанные регенерационные растворы, взрывающиеся или осветленные после шламоотвала воды или сбрасывает их в канализацию, применяет традиционную (с осветителями) или более прогрессивную (микрофильтрацию, обратный осмос) технологию водоподготовки – просто изменится количество потребляемых реагентов и объемы поступающей и сбрасываемой с загрязняющими веществами воды. Даже отложение малорастворимых солей на поверхностях нагрева котлов или поверхностях теплообмена системы обратного охлаждения не будет влиять на расчет общего количества отходов, так как эти соли привносятся все той же водой, то есть были уже учтены в ее составе, а удаляются с помощью специальной обработки, то есть

присутствуют в сточных водах или в шламе (баланс прихода и расхода).

Если нужно оценить степень заполнения шламоотвала и перспективные сроки его эксплуатации, а также ежегодное количество самого шлама, за размещение которого в окружающей среде необходимо платить, то здесь необходимы укрупненные оценки и образования осадка, и сброса загрязняющих веществ со сточными водами. Причем их следует рассчитывать не по отдельности, а относительно друг друга, так как в полном соответствии с формулой (1), если загрязняющие вещества не переходят в осадок, то они находятся в сточных водах, и наоборот, ввиду того, что им просто некуда больше деться. Еще можно предусмотреть, что если какие-то вещества летучи, то они будут увеличивать количество выбросов.

При использовании предлагаемого подхода к оценке образования отходов, основанного на материальных потоках можно прийти к нескольким выводам:

1. Исходной информацией для расчета общего количества отходов, выбросов, сбросов должны служить все данные материально-сырьевого баланса предприятия.

2. И при внешнем контроле за природоохранной деятельностью предприятия, и при внутреннем аудите можно будет легко определить количество загрязняющих веществ, в целом поступающих в окружающую среду, и отследить их агрегатное состояние.

3. При использовании данного балансового метода будет наглядно видно, где происходят «потери» (недоучет) загрязнений и идет нестыковка в определении количественного загрязнения различных сред.

### **Библиографический список**

1. Найман С.М. Формирование ресурсосберегающей технологии на основе балансового метода // Экология промышленного производства. 2014. № 1 (85). С. 55–59.
2. Найман С.М., Медведева Ч.Б. Количественная оценка шлама от химводоподготовки // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 17. С. 98–103.
3. Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1990. 254 с.

# ПРОБЛЕМА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЯ ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

д-р хим. наук, проф. Новиков В.Ф.

студент Имелбаева Э.В.

Казанский государственный энергетический  
университет, г. Казань

**Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы загрязнения сточных вод гальванического производства промышленных предприятий тяжелыми металлами. Обсуждаются различные методы очистки сточных вод, приоритетным из которых является сорбционные. Установлено существенное влияние на сорбционные свойства цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашановского месторождения обработка их кислотами и щелочами. Найдено, что в течение 42 часа наблюдается полная сорбция ионов хрома природным материалам.

**Annotation.** The paper considers the problems of sewage contamination by galvanic production of industrial enterprises by heavy metals. Discusses various methods of wastewater treatment, the priority of which is sorption. A significant influence on the sorption properties of zeolite-bearing rocks of the Tatarsko-Shatrashevskoye deposit is treated with acids and alkalis. It was found that for a total of 42 hours, complete sorption of chromium ions is observed for natural materials.

## Введение

Сточные воды гальванических производств обычно вносят значительный вклад в загрязнение водных объектов, так как содержат соли тяжелых металлов, оказывающих негативное влияние на экосистему и организм человека. Это положение усугубляется тем, что тяжелые металлы проявляют эффект суммации, что приводит к усилению их токсического действия при совместном присутствии нескольких элементов. Поэтому решение проблемы загрязнения водной среды тяжелых металлов является достаточно актуальной. С этой точки зрения необходимо создания современных малоотходных технологических процессов гальванического производства промышленных предприятий с использованием прецизионного технологического оборудования. В этом случае большая роль отводится сорбционным материалам, которые используются в технологическом процессе очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Основное требование, представляемое к ним заключается в их доступности, высокой механической прочно-

сти, устойчивости к агрессивным средам, высокой селективности, а также способность к многократной регенерации.

Цель работы заключалась в исследовании сорбционных свойств цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашановского месторождения и их использование для очистки сточных вод гальванического производства от ионов тяжелых металлов.

В настоящее время в технологических системах очистки воды от ионов тяжелых металлов применяют обратноосмотические мембранны [1], а также сорбционные методы [2]. При использовании для очистки воды сорбционных методов в последнее время стало широко использоваться природные материалы в том числе и цеолитсодержащие породы различных месторождений. Например, в Липецкой области с этой целью используют цеолитсодержащие породы Тербунского месторождения, которые вовлекаются в экономический оборот области [3-4]. Минералы Тербунского месторождения являлись природной системой, обладающей наносвойствами, а скорость сорбции тяжелых металлов зависит от их природы и концентрации.

В республике Татарстан также имеются геологические запасы природных цеолитсодержащих пород. Это природные цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашановского месторождения, которые являются водными алюмосиликатами щелочных и щелочноземельных металлов [5].

Кристаллическая решетка цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашановского месторождения построена из четырех, пяти-, шестичленных и более сложных колец, которые образованы кремний кислотными тетраэдрами, а наибольшее количество атомов кремния замещено атомами алюминия. В этом случае во внутрикристаллическом пространстве цеолитсодержащей породы образуется система связанных между собой и с окружающей средой полостей и каналов, в которых располагаются обменные катионы кальция и натрия. В некоторых случаях в этих полостях могут присутствовать также ионы калия, магния, бария, и стронция, а также молекулы «цеолитовой» воды. При нагревании цеолитсодержащей породы до температуры 350-400 С происходит их обезвоживание и цеолиты приобретают способность адсорбировать молекулы различных веществ, которые по своим размерам не превышают диаметр входных окон-пор [6-9]. Это их свойство было использовано с целью извлечения благородных металлов из различных материалов [10].

Было установлено, что на сорбционные свойства цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашановского месторождения сильное влияние оказывает обработка их минеральной кислотой [11]. В то же время сорбционные материалы, полученные на основе цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашановского месторождения обладают также относительно высокой сорбционной способностью по отношению к органическим растворителям различной физико-химической природы [12-13].

Для очистки воды от тяжелых металлов использовали лабораторную установку, состоящую из стеклянной колонки заполненной цеолитсодержащей породой Татарско-Шатрашановского месторождения фракций 0,5-1,0 мм к нижней части, которой через тройник подключался вакуумный насос для ускорения процесса. Сорбционная емкость цеолитсодержащей породы определялась путем взвешивания колонки до и после провождения эксперимента. В качестве объекта исследования использовали сточные воды гальванического производства, содержащим ионы хрома.

Концентрацию ионов хрома определяли спектрофотометрическим методом. На рис.1 приведен зависимость концентрации ионов хрома от времени сорбции. Как видно из рис.1 в течении 42 часов наблюдается полная сорбции ионов хрома на природном сорбенте.

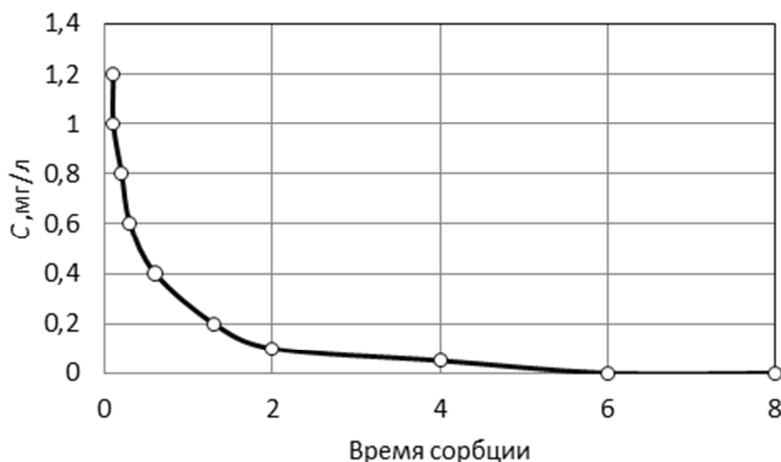


Рис. 1. Зависимость концентрации ионов хрома от времени сорбции

Выводы: таким образом, сточные воды гальванического производства можно очистить от ионов тяжелых металлов сорбцией их на цеолитсодержащих породах Татарско-Шатрашановского месторождения.

### **Библиографический список**

1. Сомин В.А., Комарова Л.Ф. Исследование селективных свойств мембранны для очистки воды от ионов тяжелых металлов // Изв. высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2009. Т. 52, № 2. С. 138–141.
2. Новый сорбент для очистки воды от ионов токсичных элементов / Н.М. Алыков, А.В. Павлова, К.З. Нгуэн, и др. // Естественные науки. 2009. № 4 (29). С. 150–158.
3. Исследование сорбционной способности цеолитсодержащей породы тербунского месторождения / С.М. Мотылева, В.А. Гулилова, М.Е. Мертвешева и др. // Аграрный вестник Урала. 2012. № 12 (704). С. 22–24.
4. Физико-химические свойства цеолитсодержащей породы Тербунского месторождения / С.М. Мотылева, Е.В. Леоничева, Т.А. Роева и др. // Аграрный вестник Урала. 2012. № 2. С. 24–26.
5. Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение / А.И. Буров, А.Н. Тюрин, А.В. Якимов и др. Казань: изд-во "ЭЭН" АН РТ, 2001. 176 с.
6. Брок Д. Цеолитовые молекулярные сита; Пер. с англ. под ред. А.Г. Рубинштейна. М.: Мир, 1976. 781 с.
7. Mumpton E. Worldwide deposit and utilization of natural zeolites // Industrial minerals (G. Br'tt.). 1973. № 3. Р. 30–36.
8. Жданов С.П., Егорова Е.Н. Химия цеолитов. М.: Химия, 1981. 264 с.
9. Жданов С.П., Хвощев С.С., Самуилевич Н.Н. Синтетические цеолиты. Кристаллизация, структурно-химическое модифицирование и адсорбционные свойства. М.: Химия, 1981. 264 с.
10. Извлечение ионов благородных металлов с помощью модифицированных цеолитов / Н.И. Мовчан, Е.В. Петрова, Р.А. Юсупов, В.Ф. Сопин // Вестник Казанского технологического университета. 2002. № 1–2. С. 58–63.
11. Карагаев О.Р., Новиков В.Ф., Карадалин Э.А. Влияние кислотной обработки на текстурные характеристики цеолитсодержащих пород // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 10. С. 55–56.
12. Физико-химические свойства растворителей для колоночной хроматографии / В.Ф. Новиков, Ю.В. Снигирева, Д.А. Хабабутдинов, И.Ф. Ялалов // Современные тенденции развития науки и технологий: период. научн. сборник; Вып. № 4–4. Белгород, 2016. С. 85–89.
13. Применение новых сорбционных материалов в энергетике / В.Ф. Новиков, Ю.В. Снигирева, Д.А. Хабабутдинов и др. // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Мат. VIII Всеросс. научно-технич. конф. Оренбург: ООО Агентство «Пресса», 2016. С.38–40.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

д-р хим. наук, проф. **Новиков В.Ф.**

студент **Муртазина Г.Р.**

Казанский государственный энергетический  
университет, г. Казань

**Аннотация.** В работе рассмотрена сравнительная характеристика сорбционных свойств Силохрома-С-80 в зависимости от температуры по отношению к органическим растворителям. Приведен график зависимости времени удерживания от температуры, а также схема лабораторной установки для исследования сорбционных свойств адсорбентов методом колоночной жидкостной хроматографии (восходящий вариант).

В настоящее время пористые материалы широко используются в различных областях науки и техники. Особенно широко эти материалы применяются в хроматографии в качестве адсорбентов и инертных твердых носителей для газо-жидкостной и высокоэффективной жидкостной хроматографии органических соединений. В то же время механизм сорбционных процессов с участием сорбентов и сорбатов до конца не изучены, что является актуальным направлением проводимых исследований. Поэтому цель настоящей работы заключалась в изучении сорбционных свойств пористых материалов и влияние на них температуры.

В продолжение ранее проведенных исследований методом восходящей колоночной жидкостной хроматографии были изучены сорбционные свойства органических растворителей различной физико-химической природой. В качестве растворителей исследовали неполярные предельные углеводороды, а также полярные вещества с низкой температурой кипения, что позволило ускорить процесс хроматографического разделения [1-2]. На основе литературных данных приведены обобщенные физико-химические свойства растворителей для жидкостной колоночной хроматографии и проведена их предварительная оценка для использования в качестве элюентов [3-4].

Изучение изменения свойств Силохрома-С-80, используемому в адсорбционной и высокоэффективной жидкость-жидкостной хроматографии в качестве адсорбента, в зависимости от температуры, проводили на сконструированной лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 1.

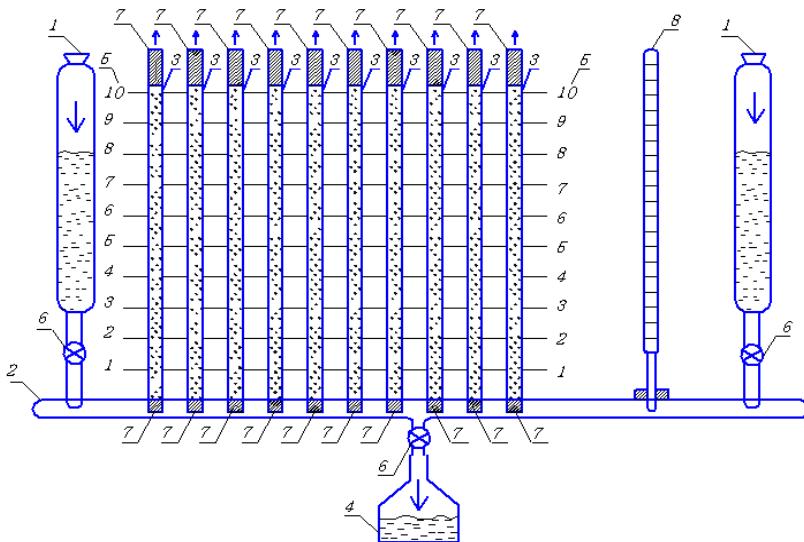


Рис.1. Лабораторная установка для исследования сорбционных свойств адсорбентов методом колончной жидкостной хроматографии (восходящий вариант): 1 – емкость для подачи растворителя; 2 – емкость для подачи растворителя в хроматографическую колонку; 3 – хроматографическая колонка с адсорбентом; 4 – емкость для слива раствора; 5 – шкала для контроля растворителя по длине сорбционного слоя; 6 – регулировочный вентиль; 7 – сетка для фиксации сорбентов в хроматографической колонке; 8 – термометр

Исследуемые сорбенты загружали в стеклянные хроматографические колонки длиной 120 мм и внутренним диаметром 4 мм. Растворители подавали снизу из емкости. В этом случае за счет капиллярных сил растворитель поднимался по длине сорбционного слоя. Время подъема растворителя фиксировали секундомером через каждые 10 мм.

На рис. 2 приведена зависимость времени удерживания ацетона, гексана, метилэтилкетона от температуры. Как видно из рис., в интервале температур от 0° до 50°C это влияние незначительно. Более стабильные результаты получаются при  $t = 20^{\circ}\text{C}$ , где все исследуемые вещества имеют близкие значения.

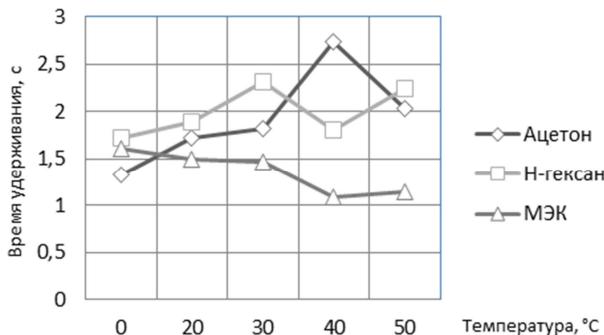


Рис. 2. Зависимость времени удерживания ацетона, гексана и метилэтилкетона от температуры.

**Выводы.** Таким образом, для адсорбента Силохром-С-80 влияние температуры для исследуемых органических веществ в интервале температур от 0° до 50°C незначительные.

#### Библиографический список

1. Муртазина Г.Р., Снигирева Ю.В., Новиков В.Ф. Сравнительная характеристика адсорбционной способности природных и синтетических пористых материалов // XII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017». Иваново: ИГЭУ, 2017. С. 211-212.
2. Снигирева Ю.В., Хабабутдинов Д.А., Ялалов И.Ф. Хроматографическое поведение растворителей в восходящей колоночной жидкостной хроматографии // Международная научно-практическая конференция «Приоритетные задачи и стратегии развития технических наук». Тольятти, 2016. С. 45-47.
3. Физико-химические свойства растворителей для колоночной хроматографии / В.Ф. Новиков, Ю.В. Снигирева, Д.А. Хабабутдинов, И.Ф. Ялалов // XIII Международная научно-практическая конференция. 2016. №4-4. С. 85-89.
4. Применение новых сорбционных материалов в энергетике / Ю.В. Снигирева, Д.А. Хабабутдинов, И.Ф. Ялалов и др. // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика, состояние, проблемы, перспективы». Оренбург: ОГУ, 2016. С. 38-40.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДА СВАЛОЧНОГО ГАЗА С ТЕЛА ПОЛИГОНА ТБО<sup>\*</sup>

д-р. техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**<sup>1</sup>  
нач. отдела **Веревкин О.В.**<sup>2</sup>  
ст. преп. **Гришко Б.М.**<sup>1</sup>  
инженер **Тарасюк П.Н.**<sup>3</sup>  
аспирант **Щекин И.И.**<sup>1</sup>  
канд. техн. наук, доц. **Суслов Д.Ю.**<sup>1</sup>  
аспирант **Рамазанов Р.С.**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород

<sup>2</sup>ООО «ТК «Экотранс», г. Белгород

<sup>3</sup>ООО «Энергоэффективность и энергосбережение», г. Белгород

**Аннотация.** Целью работы является исследование выхода свалочного газа участка полигона ТКО, выведенного из эксплуатации 10 лет, назад для определения возможности его энергетического использования. Приведены результаты расчетов выхода свалочного газа с участка по двум методикам, результаты инструментальных замеров состава биогаза, проводимого в течении пяти месяцев. Серия измерений позволяет оценить состав выделяемого свалочного газа при отсутствии подсосов:  $CH_4 - 30\ldots32\%$ ;  $O_2 - 0\ldots2\%$ ;  $CO_2 - 40\ldots60\%$ ;  $N_2 - 5\ldots30\%$ ;  $H_2S - 0\ldots30 \text{ мг}/\text{м}^3$ . Несмотря на более низкое содержание метана, чем в традиционном биогазе, по энергетическому потенциалу свалочный газ, выделяющийся на экспериментальном участке, позволяет его использовать при условии необходимой организации процесса сжигания.

Полигоны, на которых в России размещаются около 95% всех твердых коммунальных отходов (ТКО), являются источниками загрязнения не только почвы и поверхностных вод, но и воздушного бассейна [1]. В теле полигона в анаэробных условиях в результате жизнедеятельности метаногенных бактерий образуется свалочный газ (биогаз), состоящий из метана, углекислого газа и азота [2]. Парниковый эффект метана сильней, чем от углекислого газа, по разным оценкам на величину от 25 раз [3] до 84 раз [4]. Поэтому на полигонах ТКО в процессе эксплуатации и при их рекультивации должны предусматриваться мероприятия по их дегазации, которая заключается в сборе и утилизации свалочного газа путем сжигания [5].

---

\* Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

Целью работы является исследование выхода свалочного газа по полигона ТКО г. Белгорода, эксплуатируемого ООО «ТК Экотранс», для определения возможности его энергетического использования. Так как проекты по дегазации полигонов характеризуются высокой стоимостью, с целью минимизации нагрузки на потребителей услуг по вывозу и захоронению ТКО работы предусматривались с максимальным использованием производственного потенциала ООО «ТК Экотранс».

### 1. Расчет выхода ТКО

Для проведения дегазации рассматривалась часть полигона ТКО, расположенного по ул. Зареченская, 85в, с. Стрелецкое, Белгородский р-н, Белгородская обл. (рис. 1) со следующими характеристиками:

Год начала функционирования ..... 2001;  
Год окончания функционирования ..... 2006;  
Площадь полигона ..... 1,5 га;  
Глубина ..... 25 м;  
Средний объём вывозимых отходов ..... 62 500 м<sup>3</sup>/год.

Для расчета состав ТКО принимался следующим:

Содержание органической составляющей в отходах..... 55%  
Содержание в органике отходов:  
жироподобных веществ ..... 2%  
углеводоподобных веществ ..... 83%  
белковых веществ ..... 15%  
Средняя влажность отходов ..... 47%



Рис. 1. Участок полигона для дегазации с экспериментальной линией из трех скважин

Для участка был определен теоретический выход свалочного газа согласно работам [6] (методика 1) и [7] (методика 2), результаты представлены на рис. 2. Расчет выхода биогаза по каждой методике произведен для теплого периода и в среднем за год, полученные результаты согласуются с другими расчетами, приведенными в работах [8, 9]. Был получен период активного выделения биогаза 17 лет.

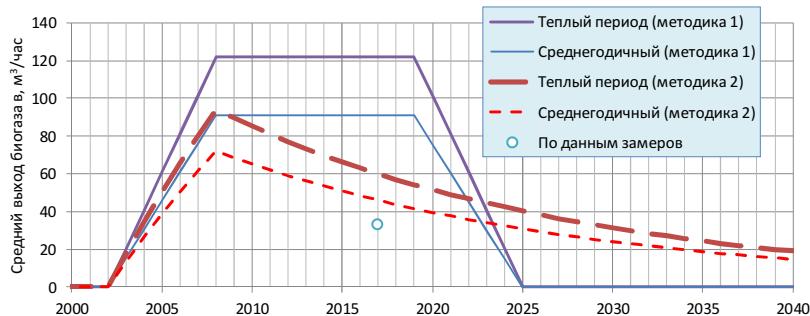


Рис. 2. Прогноз выхода биогаза

## 2. Исследование выхода и состава биогаза на экспериментальной линии

Для исследования на участке были оборудованы три скважины глубиной 12 м (рис. 3), в которые были опущены полиэтиленовые перфорированные трубы диаметром 50 мм, произведенные на ООО «ТК Экотранс» из полимерных отходов (рис. 4).



Рис. 3. Экспериментальная скважина



Рис. 4. Полиэтиленовые перфорированные трубы производства ООО «ТК Экотранс»

Для замеров состава газа использовался газоанализатор ФАРМЭК ФП34 с датчиками  $\text{CH}_4$  (0–100%),  $\text{CO}_2$  (0–2.5%),  $\text{O}_2$  (0–30%),  $\text{H}_2\text{S}$  (0–100 мг/м<sup>3</sup>).

Замеры состава биогаза первоначально производились в устье каждой скважины, при этом на результаты замеров значительное влияние оказывали погодные условия – при усилении ветра выход газа из скважин значительно увеличивался. В период с 20 июня по 2 июля была выполнена герметизация места расположения скважин путем отсыпки глиной и три скважины были объединены газосборной линией. Для отбора газа в конце линии в специально оборудованном контейнере был установлен безмасляный пластинчато-роторный вакуумный насос Busch Seco SV 1005 D (расход 4,8 м<sup>3</sup>/ч; остаточное давление 15 кПа).

Результаты мониторинга состава свалочного газа приведены на рис. 5 и табл. 1. Состав газа стабильный, после отсыпки содержание кислорода не превышает 5–10%, что показывает, что в газе подсосы кислорода составляют не более 25–50%. При содержании кислорода близком к его теоретическому содержанию в свалочном газе (0–2%) содержание метана составляет около 35% (рис. 6) Полученные значения оказались меньше теоретических (см. рис. 1), что может быть вызвано или переходом участка полигона в стадию стабильного метаногенеза, или отличием состава ТКО от принятого.

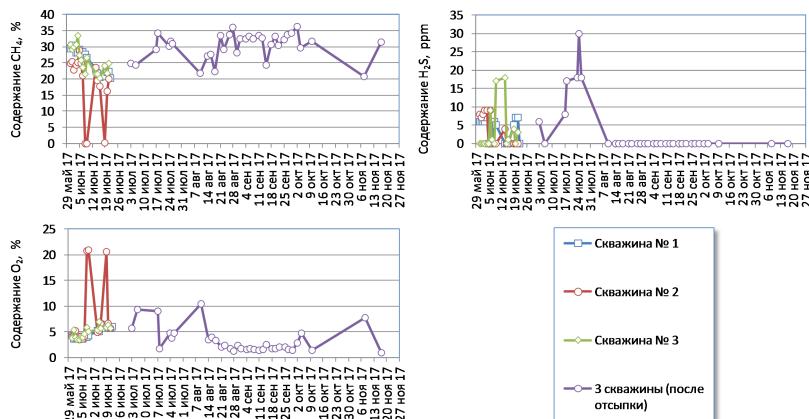


Рис. 5. Мониторинг состава газа на экспериментальной линии

Таблица 1

Средний состав свалочного газа после объединения трех скважин в одну и отсыпки грунтом (31.05-17.11.2017 г., 51 замер)

Значение	CH <sub>4</sub> , %	O <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> S, мг/м <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> , %	N <sub>2</sub> , %
Минимальное	20,8	0,9	0	—	—
Максимальное	36,2	10,5	30	—	—
<b>Среднее</b>	<b>30,3</b>	<b>3,2</b>	<b>2,9</b>	—	—
Работа [7]					
чистый биогаз	55	0		45	0
биогаз с подсосами воздуха	35–45	1–6	0–20	30–35	18–30
Состав биогаза полигона г. Самара (данные газоанализаторов)	60,6	0,2	93	—	—

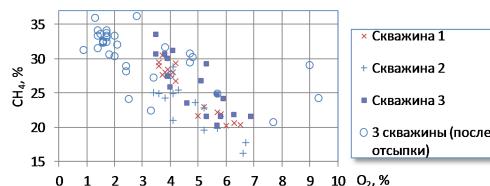


Рис. 6. Влияние подсосов на содержание метана

### 3. Определение энергетического потенциала биогаза

Утилизация биогаза будет производится методом сжигания. Поэтому по полученным данным был произведен расчет горения (табл. 2).

Таблица 2

Расчет горения газа ( $\alpha = 1,2$ )

Показатели	Биогаз полигона Экотранса	Природный газ	Свалочный газ полигона г. Самара
Теплота сгорания, кДж/м <sup>3</sup>	10 740	36 322	21 695
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	3,31	11,63	6,91
Состав продуктов горения, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>			
RO <sub>2</sub>	0,80	1,03	0,90
H <sub>2</sub> O	0,60	2,00	1,21
N <sub>2</sub>	2,80	9,19	5,56
O <sub>2</sub>	0,14	0,49	0,29
Сумма	4,34	12,70	7,96
Адиабатическая температура горения, °C	1487	1763	1666

Результаты показывают, что для биогаза с экспериментального участка теплота сгорания и объем воздуха, необходимый для сжигания, в два раза ниже, чем у газа полигона г. Самары и в три раза ниже, чем у природного газа. При этом температура горения этих газов отличается не более чем на 20%. Это показывает, что свалочный газ с экспериментального участка может быть как просто сжигаться в атмосфере (для преобразования метана в значительно менее вредный CO<sub>2</sub>) [10], так и использован в теплогенерации при условии обеспечения подачи необходимого количества воздуха, не превышающего объем, необходимый для горения.

По данным работы [11] при использовании биогаза в качестве топлива приходится сталкиваться со следующими основными трудностями:

- а) из-за высокого содержания CO<sub>2</sub> снижается нормальная скорость распространения пламени и его устойчивость, сужаются пределы регулирования горелок;
- б) из-за содержания сероводорода возникает проблема коррозии горелок, фронтовых плит котлов и т. д. (уменьшается срок службы оборудования).

Поэтому для низкокалорийного топлива необходимо обеспечить хорошее смешение с воздухом, что делается с помощью завихрителей или многоканальных горелок [12].

#### **4. Исследование выхода биогаза из технологической линии**

После подтверждения возможности сжигания биогаза на части участка, предварительно отсыпанного глиной, была обустроена линия по сбору биогаза из 44 скважин, расположенных на расстоянии 4 метра друг от друга (рис. 7). Скважины были оборудованы перфорированными трубами диаметром 50 мм, коллекторы для сбора биогаза выполнены из труб диаметром 65 мм. После сбора линий был произведен анализ газов с использованием газоанализатора MRU Vario Plus, оборудованного датчиками для определения содержания O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (табл. 3).

Таблица 3

Состав биогаза, % (17.11.2017 г.)

Место отбора проб	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Технологическая линия (44 скважины), при отсутствии подсосов	5,25	23,8	26,4
	0,99	38,3	32,8
	1,42	38,3	32,8
Экспериментальная линии (3 скважины)	0,85	57,8	32,8

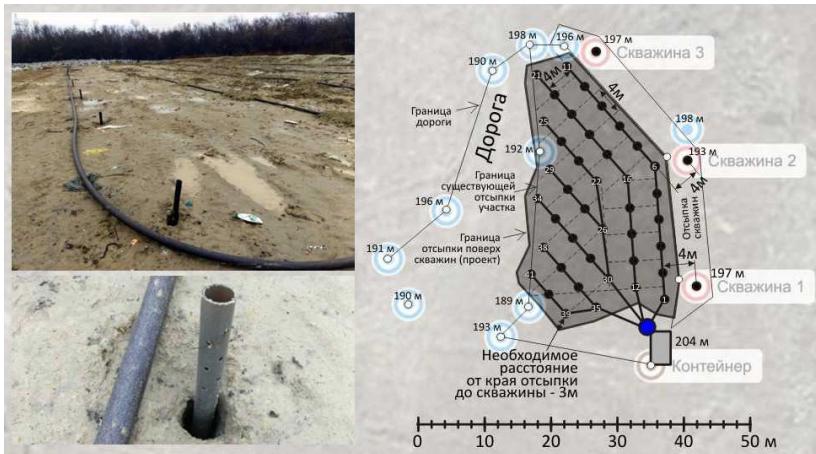


Рис. 7. Линия по сбору биогаза

Результаты замеров позволили определить содержание CO<sub>2</sub> в свалочном газе. Таким образом оставшаяся часть в свалочном газе, составляющая от 5 до 30% в разных измерениях, и не определённая инструментальным путем, состоит скорее всего из азота N<sub>2</sub>.

#### Выводы

1. Серия измерений состава биогаза экспериментального участка, выведенного из эксплуатации 10 лет назад, позволяет оценить состав выделяемого свалочного газа при отсутствии подсосов: CH<sub>4</sub> – 30...32%; O<sub>2</sub> – 0...2%; CO<sub>2</sub> – 40-60%; H<sub>2</sub>S – 0...30 мг/m<sup>3</sup>. Предположительно оставшаяся часть в газе, не определенная приборным путем, N<sub>2</sub> – 5...30%.

2. По энергетическому потенциалу свалочный газ, выделяющийся на экспериментальном участке, не уступает природному газу или свалочному газу традиционного состава, с большим содержанием метана. Но для устойчивого горения газа необходимо обеспечить подачу соответствующего количества воздуха, в три раза меньше, чем при сжигании природного газа, и интенсивное смешение газа с воздухом.

#### Библиографический список

1. Концепция управления твердыми бытовыми отходами / Л.Я. Шубов, А.К. Голубин, В.В. Девяткин, С.В. Погадаев. М.: ГУ НИЦПУРО, 2000. 72 с.

2. Кущев Л.А., Суслов Д.Ю. Теоретическое описание процесса анаэробной ферментации в биогазовых установках // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С.227–230.
3. Балахина Т.К. Оценка воздействия свалочного газа с полигонов твердых бытовых отходов на человека // Физиология. Медицина. Экология человека. 2012. № 2. С. 41–57.
4. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2015. 151 pp. URL: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf)
5. Кожевников В.П., Токач Ю.Е., Огнев М.Н. Современные решения по переработке твердых бытовых отходов в БГТУ им. В.Г. Шухова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 1. С. 172-174.
6. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов (изд. доп. и перер.) / Н.Ф. Абрамов, Э.С. Санников, Н.В. Руцаков и др. М., 2004. 20 с.
7. Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации на полигонах захоронения твердых бытовых отходов / Н.Ф. Абрамов, Я.И. Вайсман, С.В. Максимова и др. М.: ФГУП Федерального центра благоустройства и обращения с отходами, 2003. 27 с.
8. Беспалов В.И., Адамян Р.Г. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства. Определение количества биогаза, образующегося на полигоне твердых отходов потребления [Электронный ресурс] // Науковедение. 2013. № 3. 6 с. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/02trgsu313.pdf>.
9. Горбовская А.Д., Хмиш В.Х.Х. Расчет образования биогаза при утилизации отходов на полигонах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 7-4. С.20-24.
10. Кожевников В.П., Ширриме К.Ж. Экологический аспект в промышленной теплоэнергетике // Энергетические, управляющие и информационные системы: Сб. докл. I международной научно-технической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. С. 95-103.
11. Особенности сжигания биогаза полигонов в котлах / И.Я. Сигал, А.В. Марковский, Э.П. Домбровская, Е.С. Кернажицкая [Электронный документ]. URL: <http://teplo-faq.net/katalog/88/6291>.
12. Хзмалиян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. М.: Энергия, 1976. 487 с.

## 8. ОТОПЛЕНИЕ И СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

### ОБ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

д-р техн. наук, проф. Бухмиров В.В.

ст. преп. Пророкова М.В.

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, г. Иваново

**Аннотация.** В работе рассмотрены достоинства и недостатки используемых в Российской Федерации методов оценки эффективности энергосберегающих мероприятий. Предложен новый метод, позволяющий повысить эффективность энергосбережения в зданиях, предназначенных для долговременного пребывания человека.

Реализация потенциала энергосбережения – актуальная задача для современной России. Значительная доля потребления конечной энергии в РФ приходится на сектор ЖКХ и сферу услуг: в среднем по стране – до 35 %, в крупных городах – до 60 % [1].

При этом основными потребителями энергоресурсов в непроизводственном секторе экономики являются системы энергоснабжения, формирующие внутреннюю среду зданий для комфорtnого пребывания человека: системы отопления, системы вентиляции и системы кондиционирования.

С точки зрения сокращения потребления тепловой энергии на отопление, потенциал объектов существенен (рис. 1).



Рис. 1. Распределение потерь тепловой энергии в общественном здании и потенциал энергосбережения [3]

Например, путем тепловой изоляции наружной поверхности ограждающих конструкций можно сократить потребление энергоресурсов на отопление на 35%.

Внедрение типовых энергосберегающих мероприятий предполагает возврат затраченных средств, поэтому используемые в настоящее время методы оценки эффективности проектов основаны на расчете экономических показателей: срока окупаемости, дисконтированного дохода, внутренней нормы доходности и т.п. Наиболее распространенные методы оценки целесообразности внедрения энергосберегающих мероприятий, а также их достоинства и недостатки приведены в табл. 1 [2].

Таблица 1  
Методы оценки эффективности энергосберегающих мероприятий

Достоинства метода	Недостатки метода
<b>1. Проведение натурных экспериментов и испытаний</b>	
Позволяет выявить эффективность отдельных мероприятий для конкретных объектов	Значительные временные и финансовые затраты
<b>2. Математическое моделирование здания как единой энергетической системы и определение энергопотребления за характерные периоды времени</b>	
Высокая точность предсказания результатов	Большое количество исходных данных для создания модели и сложность создания модели
<b>3. Анализ результатов применения аналогичных энергосберегающих решений в системах климатизации и теплоснабжения эксплуатируемых зданий</b>	
Наглядность	Укрупненные методы, не учитывающие особенностей конкретных объектов
<b>4. Использование данных об эффективности энергосберегающих решений, установленных фирмами – производителями энергоэффективного оборудования</b>	
Доступность	Низкая достоверность предоставляемой информации
<b>5. Экспресс-методы</b>	
Минимальные временные затраты	Укрупненные методы, не учитывающие особенностей конкретных объектов

Основным недостатком методов является отсутствие учета возможных отрицательных последствий процедуры энергосбережения. Наиболее часто отрицательные последствия наблюдаются в зданиях жилых, общественных и административных при реализации энергосберегающих мероприятий, направленных на герметизацию и повышение

теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Указанные мероприятия позволяют значительно снизить потребление тепловой энергии на отопление, однако при этом для зданий с естественной вентиляцией может наблюдаться снижение воздухообмена ниже значений, рекомендованных санитарно-эпидемиологическими нормами, например, при замене окон в деревянных переплетах на ПВХ-стеклопакеты, обладающие более низкой воздухопроницаемостью. Отсутствие регулирования тепловой нагрузки при «утеплении» здания вызывает необходимость установки сплит-систем.

Устранение отрицательных последствий энергосбережения требует дополнительных технических решений и средств, что не позволяет достичь заявленной экономии энергоресурсов при энергосбережении.

Таким образом, требует решения задача разработки нового метода оценки эффективности энергосберегающих мероприятий, позволяющего повысить точность расчета показателей проекта за счет учета необходимости внедрения возможных сопутствующих мероприятий, удорожающих проект. Для зданий, предназначенных для долговременного пребывания человека, в качестве показателя необходимости внедрения сопутствующих мероприятий предложено рассматривать снижение комфортности внутренней среды.

В работе [4] предложен новый комплексный критерий комфорта микроклимата (уровень комфорта микроклимата), учитывающий тепловой состояния человека в помещении, качество воздушной среды, а также дополнительные вредности, характерные для зданий непроизводственного назначения.

Предлагается оценку эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий выполнять в 3 этапа.

На *первом этапе* выполняют предварительный расчет технического и экономического эффекта от реализации проекта. При этом рекомендуется в качестве расчетных параметров внутренней среды использовать значения, полученные по итогам инструментального обследования объекта.

На *втором этапе* выполняют оценку комфорта внутренней среды для человека до процедуры энергосбережения путем расчета уровня комфорта микроклимата. Затем выполняют прогноз изменения параметров микроклимата после внедрения энергосберегающих мероприятий и рассчитывают новое значение критерия комфорта внутренней среды помещений. При этом решение задачи прогнозирования микроклимата после реализации энергосберегающего проекта

выполняют при помощи математической модели процессов тепломассообмена в помещении, основанной на решении дифференциальных уравнений сохранения энергии, сохранения импульса, сохранения массы компонентов воздушной смеси и уравнения неразрывности с соответствующими данному объекту условиями однозначности, которая реализована в ПВК Ansys Fluent.

Далее делают вывод о целесообразности проекта:

- если энергосберегающее мероприятие поддерживает существующий или формирует новый комфортный микроклимат, то оно рекомендуется к внедрению;
- если комфортность внутренней среды снижается, то необходимо скорректировать энергосберегающий проект или предусмотреть дополнительные меры, устраниющие отрицательные последствия внедрения энергосберегающего мероприятия.

На третьем этапе оценки эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий уточняют технические и экономические характеристики энергосберегающего проекта с учетом необходимости внедрения сопутствующих мер.

Использование предложенного метода оценки эффективности энергосберегающих мероприятий позволяет:

- минимизировать или исключить дополнительные затраты на сопутствующие мероприятия после процедуры энергосбережения;
- повысить точность определения технических и экономических показателей проекта за счет использования в расчетах параметров внутренней среды, приближенных к фактическим условиям эксплуатации здания;
- 3) повысить комфортность внутренней среды зданий для долговременного и безопасного пребывания человека.

### **Библиографический список**

1. Гальперова Е.В. Энергопотребление населения и сферы услуг России на фоне мировых тенденций // Проблемы прогнозирования. 2011. № 3. С. 93–99.
2. Табунщикова Ю.А., Шилкин Н.В., Миллер Ю.В. Методы и результаты оценки эффективности энергосберегающих решений [Электронный ресурс] // ЭСКО. Города и здания. 2013. № 11. URL: [http://www.journal.esco.co.ua/cities/2013\\_11/art72.html](http://www.journal.esco.co.ua/cities/2013_11/art72.html)
3. Данилов Н.И., Щелоков Я.М. Основы энергосбережения: Учебник. Екатеринбург: ГУСО «Институт энергосбережения», 2008. 526 с.
4. Бухмиров В.В., Пророкова М.В. Оценка микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий // Вестник ИГЭУ. 2015. № 4. С. 5–10.

# **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗДАНИЙ КОММУНАЛЬНО-БЫТОВОЙ СФЕРЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА**

канд. техн. наук **Выборнов Д.В.**

магистрант **Плужник А.В.**

Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры, г. Макеевка

**Аннотация.** В статье описаны проблемы мониторинга уровня комфорта в помещениях непроизводственного назначения, возникающие при проектировании и эксплуатации систем отопления и вентиляции. Рассмотрены способы повышения энергоэффективности ограждающих конструкций при проектировании и эксплуатации зданий. Рассмотрены сроки окупаемости мероприятий по термомодернизации жилых и промышленных зданий.

**Введение.** Экономичное и экологически безопасное использование ресурсов является проблемой всего мира. Ежегодно европейское объединение независимых экспертов «Римский клуб» публикует доклады о путях развития человечества, где существенное место занимают вопросы ресурсосбережения [1]. Например, в России на долю тепловой энергии приходится 35% всей вырабатываемой энергии. Вследствие этого в первую очередь для экономии первичных энергоресурсов необходимо сократить энергию, потребляемую ТЭЦ. [2]. Однако внедрение энергосберегающих мероприятий в непроизводственной сфере зачастую приводит к снижению уровня комфорта в помещениях.

**Целью** данной статьи является разработка метода определения энергосберегающего потенциала с целью обеспечения комфорта в отапливаемых помещениях.

**Содержательная часть.** В настоящее время методы оценки уровня комфорта несовершенны, так как большинство из них разработаны непосредственно для рабочей зоны производственных предприятий [3], а не для помещения в целом. Поэтому выбор методики определения показателей комфорта является первостепенной задачей на пути к реализации мероприятий по энергосбережению.

Среди способов объективного оценивания можно выделить:

- аналитический метод;
- практический метод;
- визуально-оптический метод.

Аналитический метод представляет собой разработку, в первую очередь, таких исследователей как Бухмирова В. В., Пророкова М. В. [4]. Используемые в методике расчеты выполнены согласно ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» и позволяют не только определить степень комфорта в помещении, но и эффективность внедренных мероприятий по утеплению помещений. Расчеты скомпонованы для компьютерных программ ANSYS Fluent и в среде MathCad в виде программы «Определение уровня и степени комфортности микроклимата помещений».

Практический способ основан на применении программного обеспечения и автоматики, позволяющих осуществлять сбор теплофизических параметров отдельных помещений и зданий, в дальнейшем передавать их на центральный сервер (Рис. 1) [5].

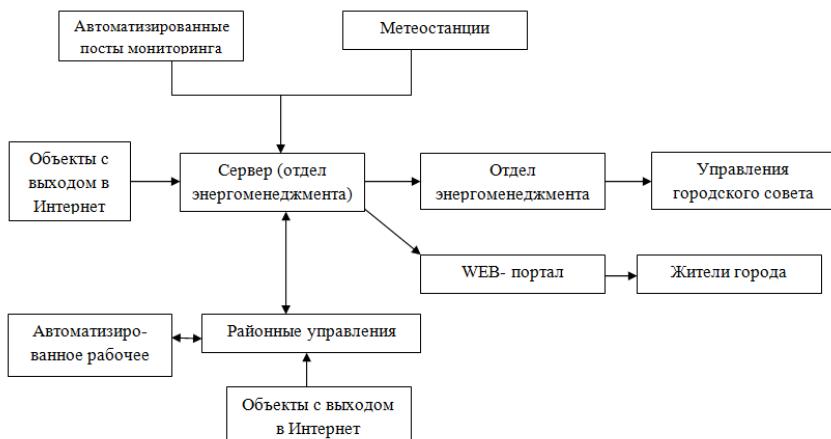


Рис. 1 Информационная структура автоматизированной системы

При мониторинге здания измеряются параметры, перечисленные ниже [5].

По данным теплового счетчика определяются: мгновенная тепловая нагрузка здания; потребленная тепловая энергия; мгновенный массовый расход воды в сети отопления; мгновенный объемный расход

воды в сети отопления; количество протекающей воды; температура воды в подающей линии; температура воды в обратной линии; время наработки счетчика на момент замера. Также фиксируются температура внутреннего воздуха в помещении и наружного воздуха для контроля за действительным температурным напором для ограждающих конструкций.

Дополнительно могут учитываться некоторые погодные условия по данным метеорологической станции, как, например, скорость ветра, наличие осадков; освещенность.

Кроме того, должна быть предоставлена минимальная информация касательно объемных характеристик здания: объем, год постройки, назначение, температурный график подключенной системы отопления [5].

Данный способ позволяет определить оптимальный тепловой режим здания, составить экономически выгодную режимную карту в зависимости от вида системы теплоснабжения.

Визуально-оптический способ основан на применении анализа с помощью различных термодатчиков и тепловизиров. Современные приборы теплового контроля имеют широкий ассортимент различных модификаций, варьирующийся в различной ценовой политике. Эти приборы позволяют получать тепловые изображения интересующей части здания в инфракрасном спектре. Такой способ чаще всего применяется для небольших административных зданий коммунально-бытового назначения или малоэтажных жилых домов [6].

При использовании вышеприведенных методов на практике в помещениях не соблюдаются нормы, указанные в ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».

Для повышения энергоэффективности здания существуют различные способы, применимые как на стадии проектирования, так и при многолетней эксплуатации. Потери тепла происходят при вентиляции помещений, а так же через стены, окна, напольное и чердачное перекрытия. Точное значение потерь тепла зависит от назначения здания, конструктивных особенностей, материалов, использованных при строительстве.

Экономическое обоснование возможности повышения теплозащиты ограждающих конструкций. Согласно СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» сопротивление теплопередачи определяется в за-

висимости от назначения здания и ГСОП. На сегодняшний день данные значения являются самыми высокими показателями в мире [7].

Согласно [8] следует, что дальнейшее повышение термического сопротивления стен путем увеличения слоя тепловой изоляции приведет к значительному удорожанию строительства, но не к экономии энергии.

#### Энергосберегающие окна.

О целесообразности замены старых окон на поливинилхлоридные (ПВХ) говорить не приходится. Экономия, затраты и срок окупаемости зависит от каждого конкретного случая. Преимущество ПВХ окон представлено в табл. 1 [9].

Таблица 1  
Сводная таблица мероприятий по тепловой защите 9-этажного здания

Мероприятие	Теплопотери до внедрения мероприятия		Экономия		Затраты		Срок окупа-емости, лет
	МВт	%	МВт	руб.	%	руб.	
Установка слоя из ПВХ-пленки в межрамном пространстве окон	422,2	33,5	97,5	114 303	7,7	119 826	1
Уплотнение оконных притворов	258,2	20,5	106,3	124 669	8,4	63 904	0,5
Замена деревянных элементов окон на ПВХ	680,4	54	353,0	413 974	28	4 180 200	10,1

Тонированные или, так называемые, интеллектуальные окна (рис. 2). Применение таких окон может привести к резкому сокращению потребления энергии остекленных зданий за счет снижения нагрузки на охлаждение, тепловых нагрузок и спроса на электрическое освещение. Тепловые нагрузки могут быть сокращены, поскольку

интеллектуальные окна имеют возможность допускать больше солнечной энергии [10].



Рис. 2. Режимы электрохромного многослойного стекла

Помимо перечисленных мероприятий следует уделить внимание способу примыкания оконного проема к стене и качеству заделки откоса.

Воздухообмен в здании является необходимым по санитарно-гигиеническим условиям и также является неотъемлемым теплофизическим параметром, влияющим на теплопотери в помещении.

При естественном воздухообмене отсутствует энергосберегающий эффект. Поэтому в зданиях с установленными энергосберегающими окнами необходимо устраивать принудительную вентиляцию. При этой вентиляции для получения энергосберегающего эффекта используется рекуперация теплоты удаляемого воздуха. В зданиях для энергосбережения целесообразна централизованная рекуперация. Для эффективной работы рекуператора необходимо максимально возможное снижение воздухопроницаемости ограждающих конструкций и узлов их сопряжения. Внедрение рекуперации может быть эффективно при новом строительстве [8].

**Выводы.** Предложенные методы оценки комфорtnости помещений зданий непроизводственного назначения могут быть использованы при оценке целесообразности внедрения энергосберегающих мероприятий, а также при проектировании и настройке систем отопления, вентиляции и кондиционирования.

Для достижения энергосберегающего эффекта необходимо проводить не «точечное» утепление зданий, а ремонт микрорайонами, только тогда будет ощутимый эффект на ТЭЦ.

Работа по энергосбережению в сфере эксплуатации жилого фонда должна проводиться постоянно. Только такой подход сможет дать не-

которые изменения. Нельзя рассчитывать на быстрый эффект, достичь его простыми и дешевыми способами.

### **Библиографический список**

1. Ерофеев П. Ю. Особенности и основные направления ресурсосбережения в концепции устойчивого развития экономики // Экономическое возрождение России. 2006. № 2. С. 21-26.
2. Башмаков И. А. Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения в России и за рубежом // Новости теплоснабжения. 2008. № 2. С. 6-10.
3. Кочетов О. С. Расчет комфортности рабочей зоны промышленных предприятий // Научный альманах. 2015. № 10(3). С. 143-146.
4. Бухмиров В. В., Пророкова М. В. Оценка микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 4. С. 5-10.
5. Харитонов А.Ю. К вопросу создания эффективных автоматизированных систем для получения энергии // Наук. труды Донецкого Национального технического университета. 2008. № 9. С. 292-295.
6. Sørensen L. S. Heat transmission coefficient measurements in buildings utilizing a heat loss measuring device // Sustainability. 2013. Т. 5. № 8. С. 3601-3614.
7. Гагарин В. Г., Дмитриев К. А. Учет теплотехнических неоднородностей при оценке теплозащиты ограждающих конструкций в России и европейских странах // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 14-16.
8. Гагарин В. Г., Козлов В. В. Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России // Вестник МГСУ. 2011. № 3. С. 192-200.
9. Грахов В. П., Мохначев С. А., Егорова В. Г. Эффективность энергосберегающих мероприятий в жилищном строительстве // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 273-273.
10. Baetens R., Jelle B. P., Gustavsen A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2010. Т. 94. № 2. С. 87-105.

# РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА СИСТЕМЫ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. **Зацаринная Ю.Н.**<sup>1</sup>

канд. техн. наук, доц. **Староверова Н.А.**<sup>2</sup>

студент **Шубина С.К.**<sup>1</sup>

*Казанский государственный энергетический  
университет, г. Казань<sup>1</sup>*

*Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, г. Казань<sup>2</sup>*

**Аннотация.** В статье подробно рассмотрен процесс сознания виртуального лабораторного стенда технического водоснабжения. В отличие от традиционного лабораторного оборудования, виртуальный лабораторный стенд системы горячего водоснабжения может легко тиражироваться, даёт существенное сокращение материальных и временных затрат на создание и сопровождение лабораторных стендов..

Современная система обучения студентов способствует укреплению теоретических знаний студентов, приобретению ими необходимых навыков по выбранному направлению посредством проведением лабораторных работ. Во многих вузах достаточно остро стоит вопрос приобретения оборудования для проведения лабораторных работ, поэтому нами был разработан виртуальный лабораторный стенд системы горячего водоснабжения в среде моделирования OmegaLand. Виртуальные стены позволяют моделировать производственные процессы и контролировать усвоение знаний. При этом уменьшаются затраты времени на проведение лабораторных работ, что связано с использованием компьютерных эффектов.

Задача создания лабораторного стенда является весьма актуальной для многих вузов, так как это дает возможность оснастить все образовательные учреждения, независимо от их географического расположения, новым учебным оборудованием и ощутить экономический эффект при затрате средств на разработку или приобретение оборудования.

Лабораторные стены целесообразно использовать для следующих целей: (а) имитации функций лабораторных установок, физически отсутствующих или не имеющих полной комплектации; (б) оперативного оснащения учебных заведений, прежде всего профессиональных колледжей и академических лицеев, необходимыми лабораторны-

ми (виртуальными) стендами. Исходя из этих соображений, виртуальные стенды можно разделить на следующие группы: для имитации работ учебных мастерских и лабораторных установок, для приобретения навыков по ремонту и обслуживанию; для психологической адаптации и пространственной ориентации; для подготовки обучающихся к работам в сложных условиях.

Несмотря на все преимущества, ВЛС имеют также недостатки. Не всегда функции среды разработки позволяют реализовать все элементы и функции технологического процесса в точности. Также недостатком является отсутствие практических навыков работы с оборудованием и отсутствие предметной наглядности, что очень важно при обучении студентов инженерных специальностей.

Компьютерный эксперимент делает образовательный процесс более разнообразным, интересным и увлекательным, однако он не может полностью заменить реальный эксперимент.

Существуют различные программные средства, с помощью которых возможно создание виртуальных стендов, для создания нашего лабораторного стенда мы использовали систему моделирования OmegaLand [1].

Каждый продукт OmegaLand содержит несколько "модулей", каждый из которых обеспечивает независимую функцию и VMspace, механизм для систематизированного соединения этих модулей. Например, пакет программ динамического моделирования Visual Modeler (VM), функциональные модули классифицируются как базовые функциональные модули, опционные функциональные модули и функциональные модули пользователя. Базовые функциональные модули включают в себя необходимые фундаментальные модули, хотя и необязательные, для построения почти любой прикладной системы. Опционные функциональные модули могут быть выбраны в зависимости от назначения. Как базовые, так и опционные функциональные модули являются продуктами компании Omega Simulation [2]. А функциональные модули пользователя предоставляются и добавляются пользователем. Например, разработанная пользователем система оптимизации работы технологической установки или приложение Excel могут быть включены в функциональные модули пользователя. Каждый модуль обеспечивает различные функции. Однако, в общем случае, он обеспечивает гибкость, которая позволяет настройку продукта под требования заказчика, в зависимости от назначения прикладных систем. Любая программа или данные, настроенные под заказчика, с

модулями для каждого применения называется "приложением модуля", или просто "приложением". Например, приложение, созданное с помощью модуля технологической установки VM, обеспечивает модель конкретной технологической установки, такой как модель установки перегонки метанола. В OmegaLand, термин "приложение" используется для индикации программного обеспечения в формате исполнения, которое обеспечивает функции как часть реальной прикладной системы, в то время как термин "модуль" используется для включения механизмов, которые также генерируют каждое приложение [3].

Кроме того, в систему OmegaLand можно внедрить как приложения точные модели, созданные в Visual Modeler, являющейся программой динамического моделирования. Созданная таким образом модель технологической установки может быть исполнена сама по себе в модуле модели технологической установки (то есть в Visual Modeler), что и было сделано при разработке нашего стенда.

Виртуальный лабораторный стенд системы горячего водоснабжения состоит из пластинчатого теплообменника и системы его обвязки, представленная на рис. 1.

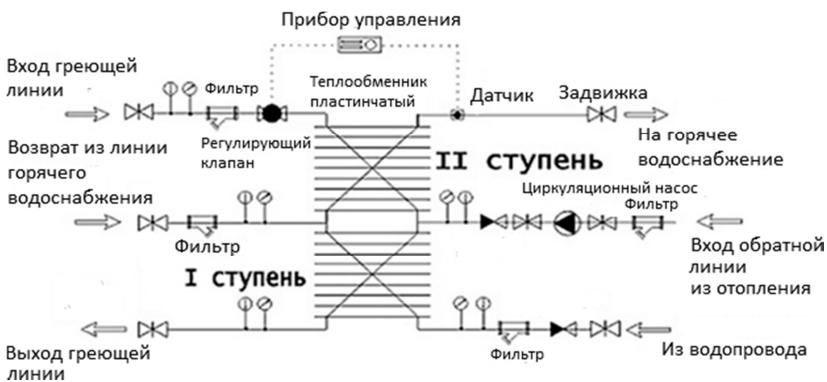


Рис. 1. Двухступенчатая схема обвязки пластинчатого теплообменника

Горячее водоснабжение необходимо для гигиенических и бытовых нужд. Температура воды в данной системе варьируется от 50 до 70°C. В простом виде местная система горячего водоснабжения представляет собой водо-водянной теплообменник и сеть трубопровода, который подает нагретую воду к точкам потребления [4].

В контуре подачи теплоносителя обязательно присутствует свой циркуляционный насос, установленный на подающем трубопроводе. В соответствии с правилами помимо рабочего насоса параллельно ставится резервный такой же мощности. Данная схема использует тепловую энергию обратной линии системы отопления, а также тепло воды, идущей по замкнутому контуру ГВС, которая смешивается с холодной из водопровода водой и только после этого смесь поступает на теплообменник второй ступени. Регулирование температуры на выходе осуществляется ПИД-регулятором, управляющий клапаном на линии подачи теплоносителя. Схема позволяет существенно экономить, снимая лишнюю нагрузку с котлов и используя имеющееся тепло по максимуму. Следует обратить внимание, что на входе в теплообменник устанавливаются фильтры. От этого зависит надежная и долговечная работа агрегата. Также установлены датчики, которые необходимы для контроля расхода, давления и температуры в системе. С помощью них осуществляется реализация автоматической сигнализации в лабораторном стенде [5].

Данная схема подходит для реализации лабораторного стенда, так как на ней удобно реализовать и рассмотреть схему автоматической сигнализации, а также на ней присутствует автоматическое регулирование температуры выходящего продукта, что нам поможет решить задачу по составлению системы автоматического регулирования.

Создание схемы начинается с добавления компонентов, использующихся в технологическом процессов в модуле Visual Modeler.

После добавления компонентов и создания системы нам предоставляется возможность добавления элементов в схему и ввода начальных параметров модели. После чего осуществляется добавление и настройка клапанов, датчиков, теплообменников, ПИД-регулятора, а также в модуле Graphic осуществляется создание и настройка мнемосхемы, которая может быть использована в тренажере.

В соответствии со схемой Visual Modeler необходимо соединить клапана трубами, поставить датчики, насосы и ПИД-регулятор в соответствующих местах, а также соединить пунктирной линией дискретные датчики и ПИД-регулятор с клапанами [6]. Конечный вид схемы, построенной в Graphic Builder, представлен на рис. 2.

Следующим этапом в создании мнемосхемы является связывание пиктограмм с моделью Visual Modeler.

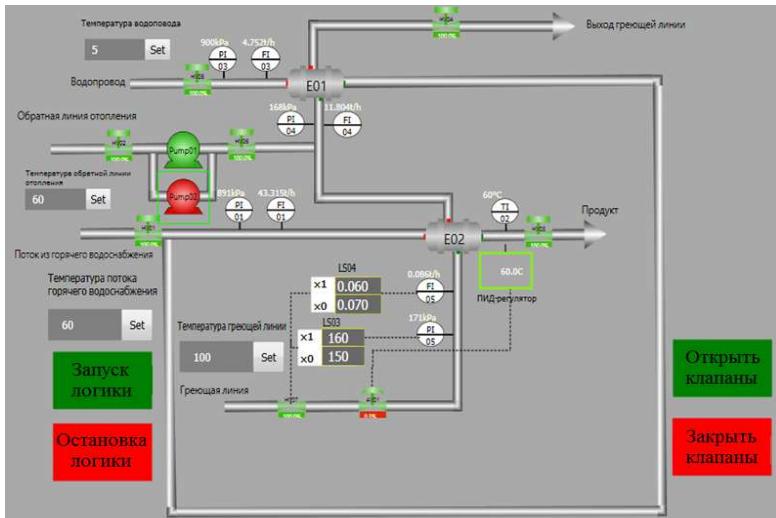


Рис. 2. Конечная схема процесса, построенная в Graphic Builder

В результате на основе виртуальной модели технологического процесса горячего водоснабжения был создан виртуальный лабораторный стенд изображенный на рисунке 3, в основе которого лежит двухступенчатая схема обвязки теплообменника в системе горячего водоснабжения.

Схема состоит из теплообменников E01 и E02, насосов Pump01 и запасного насоса Pump02, запорных клапанов HV01, HV02, HV03, HV04, HV05, HV06, HV07, одного регулирующего клапана AV01, ПИД-регулятора pid01, модулей для реализации логики автоматической защиты и сигнализации Calc01, Calc02, Calc03, Calc04, mainCalc, датчиков расхода FI01, FI02, FI03, FI04, FI05, датчиков давления PI01, PI02, PI03, PI04, PI05, дискретные датчики LS01, LS02, LS03, LS04, LS05, LS06, LS07, LS08, LS09, LS11, LS12, LS13, LS14, LS15, LS16.

Со входного потока ColdFeed поступает водопроводная вода и направляется в теплообменник E01, в котором осуществляется ее первоначальный нагрев теплом смеси теплоносителя, вышедшего из теплообменника E02, и теплом потока обратного отопления, который выходит из элемента ReverseHeating.

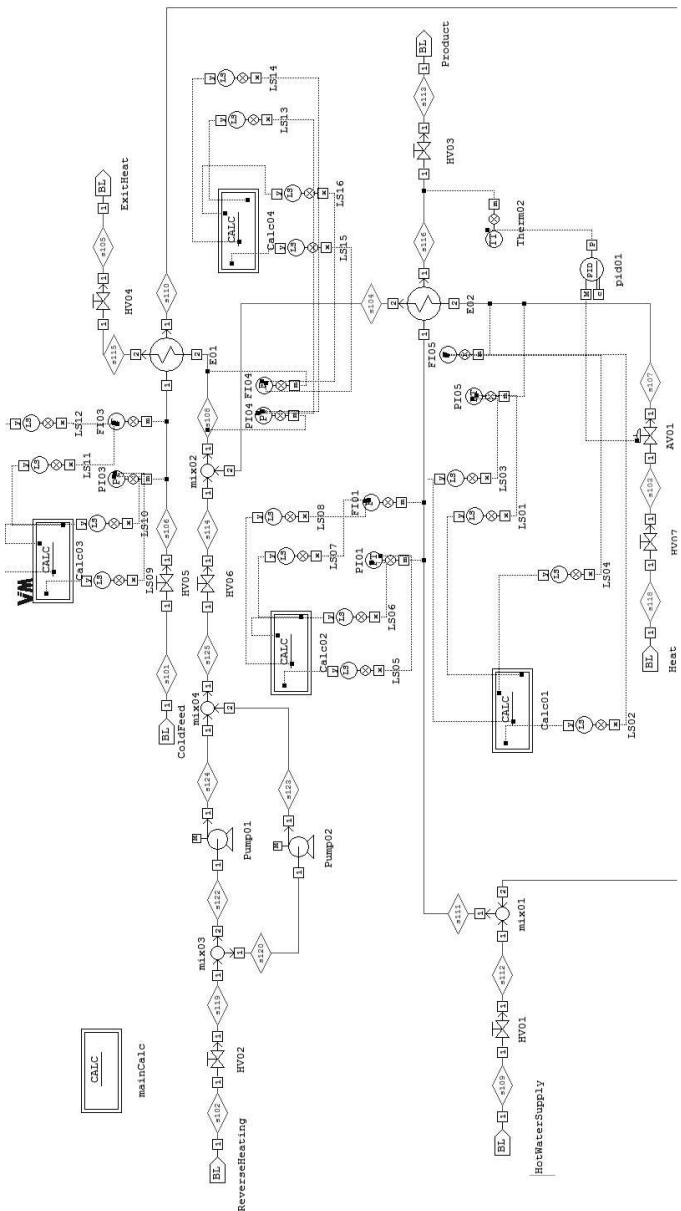


Рис. 3. Схема виртуального лабораторного стенда

Далее, смешиваясь с обратным потоком горячего отопления, выходящего из HotWaterSupply, вода направляется на повторный нагрев в теплообменник Е02 теплоносителем, выходящим из элементы Heat. После этого нагретая вода идет на выход, к потребителю. ПИД-регулятор регулирует подачу теплоносителя из элемента Heat, изменения степень открытости клапана AV01, в зависимости от значения уставки.

### **Выводы**

Качество образования, получаемого студентом, определяется не только уровнем теоретической подготовки, но и умением использовать полученные знания на практике. Практическими навыками студент приобретает через специально предусматриваемые в учебном плане лабораторные работы и семинарские занятия. Однако лабораторные стенды, предполагающие физическое моделирование технологического процесса даже в упрощенном виде, означают серьезные финансовые затраты на их создание и поддержку в работоспособном состоянии. Для повышения уровня практической подготовки научных и технических специалистов в последние годы все более широкое применение находят информационные технологии, в частности, при организации лабораторных практикумов. Созданный нами виртуальный лабораторный стенд системы горячего водоснабжения может легко тиражироваться, дает существенное сокращение материальных и временных затрат на создание и сопровождение лабораторных стендов.

### **Библиографический список**

1. Разработка модели процесса автоматического регулирования производительности насоса на базе современных средств автоматизации / Н.А. Старoverова, Ю.Н. Зацаринная, А.Р. Герке, А.В. Лира // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 15. С.114-118.
2. Применение возможностей виртуальных лабораторий в учебном процессе технического вуза // Б. М. Саданова, А.В. Олейникова, И.В. Альберти и др. // Молодой ученый. 2016. № 4. С. 71-74.
3. Руководство по работе с программой OmegaLand/ITK. Tokio/Japan, 2006. 130с.
4. Виды систем горячего водоснабжения [Электронный ресурс]. URL: <http://sarssr.ru/content/vidy-sistem-gorjachego-vodosnabzhenija>, свободный.
5. Зацаринная Ю. Н., Рахматуллин Р. Р., Ризванова Г. И. Информационная транспортная шина предприятий (ESB) в распределенных энергетических компаниях // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 5. С. 278-280.
6. Зарипов Д.К., Балобанов Р.Н. Индикатор дефекта высоковольтной изолирующей конструкции // Электротехника. 2016. № 6. С. 16-21.

# **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАВЕСНЫХ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ СКРЕПЛЕННОГО ТИПА<sup>\*</sup>**

канд. техн. наук, проф. **Косухин М.М.**

зав. лабораторией **Косухин А.М.**

ведущий инженер **Богачева М.А.**

магистрант **Комарова К.С.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** Представлен анализ технического состояния основных фондов жилищно-коммунального комплекса страны, основную часть которых составляют гражданские здания. Показано, что жилищный фонд не удовлетворяет современным требованиям теплотехнических норм, вопросам энергосбережения и энергоэффективности зданий. Для создания необходимого микроклимата жилых помещений с обеспечением комфортной среды проживания большинство гражданских зданий, построенных в разные времена, нуждаются в проведении модернизации. Для результативного проведения капитального ремонта необходим комплексный подход к технологии ремонтостроительного производства с использованием современных энергосберегающих технологий и материалов. Эффективному выполнению тепловой изоляции ограждающих конструкций должно предшествовать детальное обследование технического состояния объектов с выдачей научно-обоснованных рекомендаций, базирующихся на современных научных достижениях в этой области, для дальнейшего составления технического задания на проектирование этих работ..

**Ключевые слова:** гражданские здания, ограждающие конструкции, капитальный ремонт, энергоэффективность, энергосбережение, тепловая изоляция, теплопередача, сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, навесные фасадные системы.

**Введение.** Основной составляющей жилищно-коммунального комплекса (ЖКК) страны являются гражданские здания, которые представляют жилищный фонд и объекты социальной инфраструктуры. В настоящее время для создания комфортной среды проживания, выполнения требований повышения энергоэффективности и энергосбережения, увеличения эксплуатационной надежности, улучшения архитектурной выразительности к гражданским зданиям предъявляют-

---

<sup>\*</sup> Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

ся особые требования. Их выполнение является задачей общегосударственной важности и масштаба в области строительного и ЖКК страны [1]. Кроме того, это самый большой сектор российской экономики, в состав которого входит более 26% от общего объема ее основных фондов. Около 20 млн. объектов жилищного фонда составляют площадь почти 3 млрд. м<sup>2</sup> и потребляют более 20% энергоресурсов страны. Годовой оборот в сфере жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) превышает 4,1 трлн. рублей и составляет более 5,7% валового внутреннего продукта России. Тем не менее, это самая проблемная отрасль экономики. Износ ее основных фондов превышает 60%, а по некоторым показателям и выше. К числу проблем, сдерживающих развитие отрасли, можно отнести следующие: неразгосударственная система, административное управление, затратность в ведении хозяйства, непрозрачность формирования тарифов, отсутствие информированности населения, высокий процент морального и физического износа коммунальной инфраструктуры и многие другие. Но все эти причины можно отнести к субъективным факторам.

Для результативного выполнения, стоящих перед отраслью задач необходимо решение комплекса мер, учитывающих объективное ее состояние. За последние десятилетия реформирования ЖКК, начиная с 90-х годов прошлого столетия, были разработаны многочисленные нормативно-правовые и законодательные акты в этой области, включая «Стратегию развития жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2020 года», принятую 26 января 2016 года. Стратегия развития предполагала способствование повышению комфортности условий проживания, модернизации и повышению энергоэффективности объектов ЖКХ, переходу на принципы использования современных эффективных материалов и технологий, применяемых при строительстве и модернизации объектов коммунальной инфраструктуры и жилищного фонда, обеспечению доступности многоквартирных домов (МКД) для инвалидов и других маломобильных групп населения.

Но в связи с тем, что намеченные в стратегии подходы носят в основном субъективный характер, эффективность ее реализации далека от ожидаемой [2]. Отечественный опыт наглядно демонстрирует возможности применения мало известных и не применяемых в настоящее время механизмов и технологий. В работе [3] раскрыты вопросы, которые являются весьма актуальными для проведения реформ в жилищной сфере и коммунальном (городском) хозяйстве.

**Основная часть.** Стоящиеся в настоящее время гражданские здания в большей степени удовлетворяют требованиям энергоэффективности. Что касается же зданий, построенных в разное время, то большинство из них не удовлетворяют современным теплотехническим требованиям. Приведение их к нормативным теплотехническим показателям требует проведения капитального ремонта и реконструкции и, в первую очередь, построенных по старым теплотехническим нормам. Добиться желаемой результативности в этом процессе можно только путем повышения самого ремонтно-строительного производства, базирующегося на результатах профессионального обследования технического состояния гражданских зданий. Для решения поставленной задачи необходим комплексный подход к технологии ремонтно-строительных работ с использованием современных энергосберегающих технологий и отличающейся от традиционных, общепринятых способов организации ремонтно-строительного производства.

Опыт проведения капитальных ремонтов показал, что фрагментарные, бессистемные и локальные его задачи, не решили глобальные проблемы снижения высокого энергопотребления зданий [4]. Это привело только к дополнительным расходам на проведение таких работ, а старение жилищного фонда, его недоремонт привели к росту объемов ветхого и аварийного жилья и снижению уровня комфортности.

При проведении капитального ремонта, кроме обеспечения требуемых параметров внутреннего микроклимата и эксплуатационной надежности, особая роль отводится повышению энергоэффективности и энергосбережению отремонтированных зданий. Главным объектом реализации этой цели являются ограждающие конструкции. С момента выхода в свет Федерального Закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности ... », практически во всех регионах России начали вестись работы по проведению капитального ремонта наружных ограждений всех типов зданий в рамках реализации требований данного закона. При этом главными показателями результативности ремонтно-строительных работ служили количество отремонтированных домов и объемы освоения денежных средств. Вопросы качества и долговечности утепления фасадов стояли на заднем плане, а научное обоснование к проведению таких работ вообще не проводилось. Это легко объяснялось тем, что проведению ремонтных работ должно предшествовать профессиональное детальное обследование технического состояния объектов с выдачей научно-обоснованных рекомендаций, базирующихся на современных научных

достижениях в области тепловой изоляции ограждающих конструкций, для дальнейшего составления технического задания на проектирование этих работ. Но оплата на проведение такого рода работ всегда оставалась большой проблемой.

Тем не менее, проведение работ по эффективной фасадной тепловой изоляции требует серьезного научного подхода с целью экономической и технологической эффективности ее выбора и устройства. Необходимо не забывать, что непосредственным источником инновационных и прорывных технологий, в том числе и в строительстве, являются прикладные и фундаментальные научные исследования.

Ограждающие конструкции, подвергающиеся воздействию наружной и внутренней эксплуатационной среды, это сложная термодинамическая система, подчиняющаяся физико-химическим законам, процессам и явлениям. Поэтому, эффективно управлять ее теплофизическими свойствами можно только на научной основе. Особенно это важно, когда речь идет об использовании новых строительных технологий, материалов и теплоизоляционных систем. Как уже отмечалось выше, в ранее построенных жилых домах наружные ограждающие конструкции подвергались различным технологическим приемам по удовлетворению их теплотехническим показателям. Но они не решали полностью проблем, предъявляемых современной теплофизикой [5]. В этой связи, практически все ограждающие конструкции требуют капитального ремонта по их утеплению.

Для правильного понимания вопроса необходимости утепления ограждающих конструкций жилых зданий, необходимо иметь представление о процессах, происходящих под действием различных факторов как внутри здания, так и снаружи.

На долговечность ограждающих конструкций, и особенно на их теплофизические свойства, существенное влияние оказывают климатические условия: атмосферные осадки, суточные и сезонные колебания температур, ветровые нагрузки, солнечная радиация, биокоррозионные процессы, а также процессы и явления внутри конструкций, вызванные этими условиями. Влияние этих факторов приводит к снижению эксплуатационной надежности, как самих ограждающих конструкций, так и в целом всего здания [6]. При этом с течением времени, заметно ухудшаются и теплофизические показатели.

Наружная ограждающая конструкция является поверхностью раздела фаз при взаимодействии холодной наружной и теплой внутренней эксплуатационной сред. При этом, как на поверхностях этой границы,

так и внутри нее, происходят новые процессы и явления, оказывающие существенное влияние на качество тепловой изоляции, внутренний микроклимат помещения, а также на эксплуатационную надежность и долговечность здания.

Атмосферные осадки (дождь, снег, туман) приводят к увлажнению наружных ограждений. Попадая на поверхность ограждения, вода через открытые поры по капиллярам проникает в толщу ограждения, и может находиться там во всех трех ее агрегатных состояниях: жидким, твердом и газообразном (парообразном). При понижении температуры происходит фазовый переход воды в лед с увеличением объема в девять раз. Это, в свою очередь, приводит к образованию внутренних напряжений в материале ограждения, вызывающих механическое разрушение. При повышении температуры происходит обратный фазовый переход льда в воду. Внутренние напряжения затухают, оставляя в теле конструкции с внешней стороны зародившуюся сеть микротрещин от предыдущего замерзания. Затем процесс повторяется, и каждый новый цикл способствует большему проникновению влаги, а, следовательно, и большему разрушению. Чем больше разница между суточными и сезонными колебаниями температуры, тем сильнее и чаще происходят эти процессы (механизм морозного разрушения). Постоянное действие на увлажненную стену знакопеременной нагрузки приводит к интенсивному ее разрушению. При этом необходимо помнить, что влага внутри ограждающей конструкции в разных количествах присутствует всегда, не только от действия атмосферных осадков. Она подразделяется на: строительную влагу, грунтовую, гигроскопическую и эксплуатационную. Строительная влага обусловлена последствиями «мокрых» строительных процессов, ее количество зависит от систем отопления и вентиляции. Грунтовая влага проникает в ограждения путем капиллярного подсоса при плохой паро- и гидроизоляции. Гигроскопическая (сорбционная, парообразная) влага попадает внутрь конструкции вследствие гигроскопичности ее материала. Особая роль в увлажнении наружных ограждений отводится эксплуатационной влаге, которой зачастую пренебрегают. Тем не менее, водяные пары содержатся в выдыхаемом воздухе человека, большое их количество образуется от бытовой и производственной деятельности, уборки помещений, работы систем водоснабжения и водоотведения. Избыточное давление заставляет водяной пар двигаться наружу здания. Часть влаги выходит из помещения с помощью систем естественной и принудительной вентиляции, а часть попадает в ограждения и

старается выйти наружу. При этом пар конденсируется на холодных поверхностях и превращается в сконденсированную влагу. Место такого фазового перехода принято называть точкой росы. Отрицательные последствия увлажнения наружных стен могут проявляться не только от действия отрицательных температур. При воздействии солнечного тепла и света на увлажненную систему ограждения внутри нее и на поверхности создается благоприятная среда для появления и развития плесени, гнили, грибков и других микроорганизмов. Это снижает гигиенические показатели внутреннего микроклимата помещений и приводит к негативным последствиям проживающих. Отсюда следует, что наружные ограждения гражданских зданий должны удовлетворять ряду требований. Они должны быть дешевыми в возведении и эксплуатации, прочными и долговечными, выполнять свое функциональное назначение, обеспечивая энергоэффективность здания с требуемым внутренним микроклиматом и быть архитектурно выразительными.

Для выполнения этих требований в настоящее время на строительном рынке существуют различные современные многослойные системы утепления фасадов. В новом строительстве применяются три вида расположения утеплителя здания: внутреннее, непосредственно в несущей стене, наружное. Когда речь идет об утеплении уже возведенных и обжитых домов при их капитальном ремонте, возникает вопрос о способах утепления, с какой стороны эффективнее располагать утеплитель. Утепление с наружной стороны наиболее подходит для жилых домов, так как имеет ряд преимуществ: использование эффекта аккумулирования тепла несущими конструкциями здания; вынос «точки росы» за пределы несущей конструкции; не уменьшается полезный объем помещения.

При реконструкции старых зданий наиболее просто реализуемая и эффективная – система наружной теплоизоляции, которая не менее успешно применяется и при новом строительстве [7]. Все они подразделяются на штукатурные и вентилируемые, имеют свои конструктивные особенности, достоинства и недостатки.

Штукатурные относятся к системам утепления фасадов скрепленного типа или – система «мокрых» фасадов и подразделяются на легкие и тяжелые. Устройство фасадов такого типа обеспечивает снижение затрат на отопление здания от 40 до 50%, уменьшение потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции и снижение платы за тепловую энергию, улучшение внутреннего комфорта в помещениях, снижение аварийных ситуаций. Важную роль такие фасады играют

при устройстве их на недвижимость муниципального образования, что приводит к улучшению качества и надежности теплоснабжения, снижению расхода топлива, высвобождению дополнительной тепловой мощности, увеличению срока эксплуатации жилищного фонда, уменьшению тарифов на тепловую энергию.

Навесные фасады скрепленного типа могут эффективно применяться в промышленности, при строительстве и благоустройстве частных домов, общедомовых систем, в т.ч. многоквартирных домов, учреждений социальной сферы (школ, больниц, детских садов и т.д.), административных и общественно-бытовых зданий и сооружений.

Легкие штукатурные системы утепления фасадов представляют собой многослойную теплоизоляционно-декоративную конструкцию, в которой утеплитель закрепляется с помощью клеевого состава и механических приспособлений на наружной поверхности ограждения. Затем утепляющий слой покрывается защитно-декоративным слоем штукатурки, толщиной не более 15 мм.

В целом, система утепления «легким мокрым методом» позволяет достичь качественного утепления здания за относительно небольшую стоимость с высокой художественно-декоративной выразительностью фасада. Однако применение даже самых дорогих и качественных материалов не гарантирует высокого качества выполняемых работ. К сожалению, на рынке утепления фасадов можно встретить компании, «профессионализм» которых может свести на нет все потенциально высокие характеристики подобных систем.

Тяжелые штукатурные фасадные системы состоят из последовательно наносимых друг на друга слоев утеплителя и штукатурных составов, несущие функции в которых выполняет арматурная сетка. При этом толщина штукатурных слоев после слоя теплоизоляции, в отличие от легких штукатурных систем, может достигать 50 мм. Отличительной особенностью таких систем является то, что в них утеплитель не приклеивается к наружной стене, а крепится с помощью специальных дюбелей-анкеров.

Данные системы обладают гораздо более долгими сроками службы по сравнению с легкими штукатурными фасадами. Гарантированный срок эксплуатации некоторыми производителями декларируется до 50 лет (легкие системы гарантировано служат около 20 лет). Это привело к весьма большой их популярности в Скандинавских странах. В нашей же стране они только начинают завоевывать свой авторитет.

Толщина теплоизоляции наружной стены не должна быть менее 100 мм. Затраты на теплоизоляцию наружных стен складываются из стоимости материалов (теплоизоляция, штукатурные смеси, сетка, дюбели, декоративная отделка) и стоимость работ. Как показывает практика, разница в общих затратах при использовании теплоизоляции толщиной 50 мм и 100 мм будет около 10% а по эффективности отличаться в полтора раза. Увеличение толщины теплоизоляции свыше 150 мм экономически не выгодно. Общая стоимость будет расти намного быстрее чем эффект от экономии тепла. Итак, оптимальной толщиной теплоизоляции при утеплении наружных стен (при использовании теплоизоляции с коэффициентом теплопроводности  $\lambda \leq 0,041 \text{ Вт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) является 100...150 мм.

В отличие от других систем наружной тепловой защиты здания, в системе теплоизоляции «мокрого» типа наружный материал можно наносить практически любого вида, т.е. реконструировать старые здания с сохранением архитектурного вида, а при новом строительстве сохранять архитектуру всего района. Основное отличие теплоизоляции «мокрого» типа от еще одной популярной системы утепления с помощью «вентилируемых фасадов» заключается в отсутствии воздушной прослойки.

Основные преимущества наружной теплоизоляции здания «мокрого» типа: 1) применяются при реконструкции и новом строительстве любых типов зданий; 2) практически отсутствует ограничение на использование; 3) обеспечивают выполнение норм и правил РФ при строительстве и эксплуатации зданий; 4) расчет системы теплоизоляции не трудоемкий, не требует большого количества времени (но требует достаточного количества опыта, т.к. использование материалов с несовместимыми свойствами приведет к дополнительным внеплановым работам по ремонту); 5) улучшают звукоизоляцию зданий; 6) монтаж прост и не требует много времени; 7) срок службы по данным заводов-изготовителей 20-25 лет; 8) более дешевая по сравнению с системой «вентилируемых фасадов»; 9) невысокая стоимость ремонтов; 10) при облицовке здания можно применять практически любые материалы; 11) уменьшает нагрев стены дома в жаркую погоду, делая условия в помещениях более комфортными; 12) по сравнению с «вентилируемым фасадом» фасад «мокрого» типа не создает тягу воздуха, тем самым система не даст быстро распространяться возгоранию.

В тоже время существуют ограничения на применение наружной теплоизоляции здания «мокрого типа», а именно: 1) монтаж систем

может производится только при температуре воздуха более 5°С, при отсутствии внешних погодных воздействий; 2) штукатурный слой часто отслаивается и повреждается (т.к. не имеет защиты от внешнего воздействия), необходимо постоянно следить за зданием, т.к. может нарушиться целостность теплоизоляционного слоя; 3) эксплуатация допускается при среднесуточной минимальной температуре самой холодной пятидневки года не ниже 55 °С; 4) при реконструкции старых зданий поврежденные стены сложно просушить от накопившейся влаги и выровнять; 5) высота здания не более 75 м (15 этажей).

Теплоизоляция фасадов «мокрого типа» наиболее часто применяется при малоэтажном строительстве до 15 этажей. Следует учитывать и тот факт, что данная система теплоизоляции практически не реагирует на ветровые потоки, из-за малой несущей нагрузки на стены.

В старом жилищном фонде при реконструкции утепление фасадов зданий с покраской или покрытием наружной стороны штукатуркой является экономичным способом отделки здания теплоизоляцией и не имеет альтернативы перед другими аналогичными продуктами. Сроки окупаемости мероприятия зависят от материала и высоты здания, толщины теплоизоляционного слоя, облицовочного материала, фирмы-производителя утеплителя, но не превышают 5-10 лет, т.к. экономия тепловой энергии достигает 40-60%.

Для предотвращения даже самого минимального накопления влаги между утеплителем и стеной, и предотвращения отслаивания системы утепления от стены в процессе замерзания оттаивания необходимо правильно выбирать толщину утеплителя, чтобы полностью вынести точку росы в утеплитель. Это решит проблему грибка в стене.

Вынос точки росы в утеплитель, соблюдение технологий и правильное выполнение работ приведет к качественному утеплению стен, и поможет создать комфортный микроклимат в доме на протяжения длительного периода эксплуатации системы утепления.

Из-за ограничений использования системы утепления при высотном строительстве (здание высотой более 15 этажей) она практически не применяется, но подходит для отделки лоджий и балконов.

Основной момент, на который следует обратить внимание при выборе теплоизоляции «мокрого» типа - это разнообразие фирм-производителей (в России их более 40) и проектных организаций. Также следует учитывать, что данное мероприятие при реконструкции старого жилищного фонда наиболее эффективно в комплексе с остеклением лоджий, балконов, установкой современных окон, терморегу-

ляторами и индивидуальными тепловыми пунктами и т.д. Совокупность мероприятий может дать огромный экономический эффект, со сроками окупаемости 15–25 лет.

**Выводы.** Таким образом, вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что реального повышения энергоэффективности гражданских зданий при устройстве тепловой изоляции их фасадов, можно добиться только при использовании научных подходов в решении этих задач. Это позволит экономически и технологически выгодно подобрать вид тепловой изоляции в зависимости от климатического местонахождения объекта, материалы и технологию ее устройства. Главное в решении этого вопроса заключается в том, чтобы не теплотехнические процессы и явления влияли на работу наружной ограждающей конструкции, а эффективно запроектированная конструкция самопропризвольно управляла этими процессами.

### **Библиографический список**

1. Косухин М.М. От истории создания до современного состояния и перспектив развития жилищно-коммунального хозяйства России // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 48–54.
2. К вопросу об оптимизации средств капитального ремонта и реконструкции жилого фонда с учетом комфортности среды проживания [Электронный ресурс] / М.М. Косухин, А.М. Косухин, А.В. Шевцова, М.А. Богачева // Наукоемкие технологии и инновации: Междунар. науч.-практ. конф. Белгород, 2016. Ч. 2. С.87–89.
3. Говоренкова Т.М., Савин Д.А. Жилищно-арендная кооперация. Опыт новой экономической политики и возможность его применения в современной России // Жилищный альманах.1999. № 4. С. 98–106.
4. Созинов П. Капремонт остался без профессионалов [Электронный ресурс]. URL: <https://ok-inform.ru/stroitelstvo/zhkhh/53919-kapitalnyj-remont-talsya-bez-professionalov.html> (дата обращения 12.10.17).
5. Вопросы энергосбережения в условиях устойчивого функционирования, модернизации и развития жилищного фонда. / М.М. Косухин, А.М. Косухин, О.Н. Шарапов, М.А. Богачева // Вестник Белгородского государственно-го технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С.51–61.
6. Пути повышения энергоэффективности жилого фонда Белгородской области при проведении капитального ремонта [Электронный ресурс] / М.М. Косухин, А.М. Косухин, О.Н. Шарапов и др. // Наукоемкие технологии и инновации: Междунар. науч.-практ. конф. Белгород, 2016. Ч. 9. С. 55–62.
7. Косухин М.М., Семак А.В., Косухин А.М. Оценка потенциала энергосбережения на основе энергоаудита // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 89–94.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ ПРИ ЛУЧИСТОМ ОТОПЛЕНИИ

аспирант **Шацков А.О.**

канд. техн. наук, доц. **Монах С.И.**

Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры, г. Макеевка

**Аннотация.** Системы лучистого отопления являются альтернативой традиционным системам и обладают рядом преимуществ перед последними. Широкому распространению таких систем препятствует отсутствие единой нормативной методики расчета параметров системы отопления. Соблюдение условий теплового комфорта обеспечивается температурой внутренних поверхностей ограждающих конструкций (радиационной температурой помещения). Таким образом, расчет системы отопления сводится к определению этих температур теплообмена на внутренних поверхностях наружных ограждений.

Существующее положение. Одним из важнейших параметров работы систем радиационного отопления является температура внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций. Значение температуры напрямую влияет на теплопотери помещения с лучистым отоплением, а также является основным фактором создания теплового комфорта для человека. Тем не менее, несмотря на эффективность работы таких систем, в строительных нормах [1, 2] и справочной литературе [3, 4] отсутствует единая нормативная методика определения этой температуры.

Целью работы является разработка математической модели для определения температуры внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции в зависимости от параметров системы отопления и температуры наружного воздуха.

## Содержательная часть.

Экспериментальные исследования проводились в жилом неотапливаемом помещении, 3 стены которого являются наружными. В качестве отопительных приборов применялись низкотемпературные электрические отопительные панели UDEN-700. Исследования проводились в течение отопительного периода. Испытания проводились при установившемся температурном режиме. Интервал снятия показаний составляет 5-10 минут, при этом делалось 5 параллельных опытов.

На основе априорной методики были выявлены основные факторы, влияющие на температуру внутренних поверхностей наружных ограждающих конструкций, обращённых в помещение:

- угловой коэффициент  $\phi$ ;
- температура поверхности излучателя  $t_{изл}$ , °C;
- температура наружного воздуха  $t_h$ , °C.

Были определены уровни варьирования факторов, влияющих на  $\tau_{вн}$ , результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Уровни варьирования факторов, влияющих на температуру поверхности

Фактор	Нижний уровень фактора	Верхний уровень фактора
Угловой коэффициент, $\phi$	0,07	0,4
Температура поверхности излучателя, $t_{изл}$ , °C	40	80
Температура наружного воздуха $t_h$ , °C.	-25	+8

Матрица планирования и результаты планирования эксперимента с пятью параллельными опытами приведены в табл. 2. Для каждой строки матрицы планирования по результатам пяти параллельных опытов было найдено среднее арифметическое значение параметра оптимизации  $\bar{y}_{ср}$ . Значения параметра приведены в табл. 3.

Воспроизводимость опытов определяется при помощи критерия Кохрена [5]:

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}; \quad (1)$$

$$G_p = \frac{0,49}{2,195} = 0,223.$$

Число степеней свободы  $f_1 = 4$  и  $f_2 = N = 8$ . Из таблиц [5] выбирается  $G_{табл.} = 0,396$ . Так как  $G_p < G_{табл.}$ , дисперсии однородны.

Проверка однородности дисперсий выполняется по критерию Фишера:

$$F_{расч} = \frac{S_{max}^2}{S_{min}^2}; \quad (2)$$

Результаты расчетов дисперсий приведены в табл. 4.

Таблица 2

## Факторы в эксперименты и их взаимодействие

g	Факторы			Взаимодействие факторов			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$
	$\phi$	$t_{изл}$	$t_h$				
Значение факторов							
Max	0,4 (1)	+80 (1)	+8 (1)	1	1	1	1
Среднее	0,235 (0)	+60 (0)	-8,5 (0)	0	0	0	0
Min	0,07 (-1)	+40 (-1)	-25 (-1)	-1	-1	-1	-1
Взаимодействие факторов							
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
2	-1	1	-1	-1	1	-1	1
3	1	-1	-1	-1	-1	1	1
4	-1	-1	-1	1	1	1	-1
5	1	1	1	1	1	1	1
6	-1	1	1	-1	-1	1	-1
7	1	-1	1	-1	1	-1	-1
8	-1	-1	1	1	-1	-1	1

Таблица 3

## Рабочая матрица и результаты экспериментов

Номер опыта	Рабочая матрица			$y, ^\circ\text{C}$	Среднее $\bar{y}_{cp}, ^\circ\text{C}$
	$\phi$	$t_{изл}, ^\circ\text{C}$	$t_h, ^\circ\text{C}$		
1	2	3	4	5	6
1	0,4	80	-25	12,4	12,72
				13,1	
				12,2	
				13,2	
				12,7	
2	0,07	80	-25	-16,5	-17,24
				-16,7	
				-17,1	
				-18,1	
				-17,8	

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6
3	0,4	40	-25	-6,5	-6,28
				-5,8	
				-6,4	
				-6	
				-6,7	
				-21,9	
4	0,07	40	-25	-21,7	-21,24
				-21,7	
				-20,5	
				-20,4	
				36,2	
5	0,4	80	8	35,8	35,52
				34,4	
				36	
				35,2	
				14,5	
6	0,07	80	8	14,1	14,42
				14	
				14,7	
				14,8	
				18,5	
7	0,4	40	8	18,8	18,4
				17,6	
				17,9	
				19,2	
				10,5	
8	0,07	40	8	10,8	10,36
				10	
				10,4	
				10,1	

Таблица 4  
Результаты расчетов дисперсий

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$S_j^2$	0,187	0,478	0,137	0,528	0,532	0,127	0,425	0,103
$S_j$	0,4324	0,6914	0,370	0,7266	0,7294	0,3564	0,6519	0,3209

Проверка однородности дисперсий по критерию Фишера [5]:

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,532}{0,103} = 5,16.$$

Число степеней свободы  $f = n - 1 = 5 - 1 = 4$ . Из таблиц [5] выбирается  $F_{\text{табл.}} = 6,4$ .

Т.к.  $F_p < F_{\text{табл.}}$ , следовательно, дисперсии однородны.

Уравнение математической модели с учетом парных взаимодействий имеет вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \\ + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3; \quad (3)$$

Коэффициенты регрессии равны:  $b_0 = 5,8325$ ;  $b_1 = 9,2575$ ;  $b_2 = 5,5225$ ;  $b_3 = 13,8425$ ;  $b_{12} = 3,5025$ ;  $b_{13} = -1,9725$ ;  $b_{23} = -0,2275$ ;  $b_{123} = -0,2475$ .

Дисперсия воспроизводимости рассчитывается по формуле [5]:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{N(n-1)} = \frac{\sum_1^N s_i^2}{N}; \quad (4)$$

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{2,517}{8} = 0,315;$$

С учетом значения дисперсии воспроизводимости определяются границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии [5]:

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot S_{\{y\}}}{\sqrt{N}}; \quad (5)$$

$$\Delta b_i = \pm \frac{2,78 \cdot \sqrt{0,315}}{\sqrt{8}} = \pm 0,551.$$

При сравнении коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов можно определить, что коэффициенты  $b_{23}$  и  $b_{123}$  незначимы. Т.к. эти коэффициенты стоят перед парными взаимодействиями факторов, принято решение их исключить. Т.о., уравнение математической модели имеет вид:

$$\hat{y} = 6,0475 + 7,8575x_1 + 5,1224x_2 + 12,3575x_3 + \\ + 3,1025x_1x_2 - 1,5425x_1x_3;$$

Проверяется адекватность полученного уравнения.

Вычисляются теоретические значения параметра оптимизации  $\hat{y}$ , величину ошибки  $\Delta y = \bar{y} - \hat{y}$ . Результаты вычислений занесены в табл. 5.

Таблица 5

Определение величины ошибки

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$\hat{y}$	12,25	-17,225	-5,81	-21,255	35,99	14,405	17,93	10,375
$\Delta y$	0,47	-0,015	-0,47	0,015	-0,47	0,015	0,47	-0,015
$\Delta y^2$	0,220	0,0002	0,22	0,0002	0,22	0,0002	0,22	0,0002

Рассчитывается дисперсия адекватности [5]:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_1^N (\bar{y} - \hat{y})^2}{N - (k + 1)} = \frac{\sum_1^N \Delta y_i^2}{N - (k + 1)}; \quad (6)$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{0,8845}{8 - (3 + 1)} = 0,2211;$$

Адекватность математической модели определяется по критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\{y\}}^2}; \quad (7)$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,2211}{0,47} = 0,703;$$

$$F_{\text{табл.}} = 6,4.$$

Так как  $F_p < F_{\text{табл.}}$ , следовательно, модель адекватна.

Для записи математической модели в реальных физических величинах необходимо произвести обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному, получив таким образом окончательный вид модели:

$$\begin{aligned}\tau_{\text{вн}} = & 6,0475 + 7,8575 \cdot \frac{\varphi - 0,235}{0,165} + 5,1224 \cdot \frac{t_{\text{изл}} - 60}{20} + \\ & + 12,3575 \cdot \frac{t_{\text{н}} + 8,5}{16,5} + 3,1025 \cdot \frac{\varphi - 0,235}{0,165} \cdot \frac{t_{\text{изл}} - 60}{20} - \\ & - 1,5425 \cdot \frac{\varphi - 0,235}{0,165} \cdot \frac{t_{\text{н}} + 8,5}{16,5};\end{aligned}\quad (8)$$

где  $\tau_{\text{вн}}$  – температура внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции, °C;  $\varphi$  – средний диффузный угловой коэффициент, определяемый по формулам, полученным авторами в работе [6];  $t_{\text{изл}}$  – температура поверхности лучистого отопительного прибора, °C;  $t_{\text{н}}$  – температура наружного воздуха, °C.

### **Выводы по работе**

С помощью полученной зависимости в виде выражения (8), можно определить температуру внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции, которая является одним из важнейших показателей при проектировании систем лучистого отопления.

### **Библиографический список**

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 141 с.
2. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М.: Изд-во стандартов, 2004. 25 с.
3. **Сканави А.Н., Махов Л.М.** Отопление: Учебник для вузов. М.: АСВ, 2002. 522 с.
4. **Богословский В.Н., Сканави А.Н.** Отопление: Учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1991. 735 с.
5. **Спирин Н.А., Лавров В.В.** Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: конспект лекций. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. 257 с.
6. **Шацков А.О., Кононыхин Г. А., Монах С.И.** Расчет угловых коэффициентов при решении задач лучистого теплообмена в помещениях с инфракрасным отоплением [Электронный ресурс] // Наукове методичне, практичне забезпечення містобудування територіального стратегічного планування, 2014. №3 (107). URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2014/vestnik\\_2014-3\(107\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2014/vestnik_2014-3(107).pdf).

# **АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛОГО ДОМА\***

канд. техн. наук, доцент **Яворовский Ю.В.**

студент **Лихаева А.Ю.**

*Национальный исследовательский университет МЭИ, г. Москва*

**Аннотация.** Целью работы является технико-экономический анализ различных вариантов теплоснабжения жилого дома, находящегося в Дмитровском районе Московской области, при условии, что возможность подключения к системе газоснабжения отсутствует. Рассмотрены варианты теплоснабжения с использованием тепловых насосов, систем автономного газоснабжения, а также вариант электроотопления.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, тепловой насос, газгольдер, ИЖС

## **1. Введение**

Согласно статистике, распределение всех эксплуатируемых в России котлов по видам используемого топлива следующее: около 50% работает на газе, 30% – на дизельном топливе, примерно 10% – на электроэнергии и приблизительно 5% – на твердом топливе. Популярность природного газа на отопление жилых зданий объясняется экономическими преимуществами, удобством и относительной простотой его использования. Однако возможность подключения к газопроводу есть не везде. Даже в Московской области остаётся множество мест, где подключить газ либо невозможно, либо трудно и дорого. Именно поэтому жители таких мест для отопления своего жилья вынуждены использовать альтернативные варианты теплоснабжения.

К альтернативным (автономным) способам теплоснабжения дома можно отнести систему автономного отопления на пропан – бутане, которая состоит из подземного резервуара для хранения газа – газгольдера, газового котла, запорной арматуры, подводящих труб и различного вспомогательного оборудования, а также набирающие популярность альтернативные системы отопления дома на базе тепловых насосов.

Достоинствами автономных систем отопления являются возможность регулирования температуры в зависимости от температуры наружного воздуха, возможность отключения отопительной системы

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке по госзаказу 13.9613.2017/БЧ.

при необходимости, а также экономию на коммунальных услугах. К наиболее весомым недостаткам таких систем относят высокую стоимость основного и вспомогательного оборудования, а также затраты на монтаж и осуществление пуско-наладочных работ.

Цель данной работы – рассмотреть различные альтернативные варианты теплоснабжения типичного жилого двухэтажного дома площадью 148 м<sup>2</sup>, построенного в Московской области, при уже существующем подключении дома к электрическим сетям, но при отсутствии возможности подключения к системе газоснабжения.

## 2. Результаты расчета потребности дома в тепловой энергии

Первым этапом работы было проведение расчета потребности дома в тепловой энергии [1, 2, 3], в результате которого были получены следующие величины, представленные в табл. 1, и был построен совмещенный график продолжительности тепловой нагрузки систем отопления и горячего водоснабжения (ГВС), по которому был определен годовой расход теплоты на системы отопления и ГВС, который составил 24081 кВт·час/год.

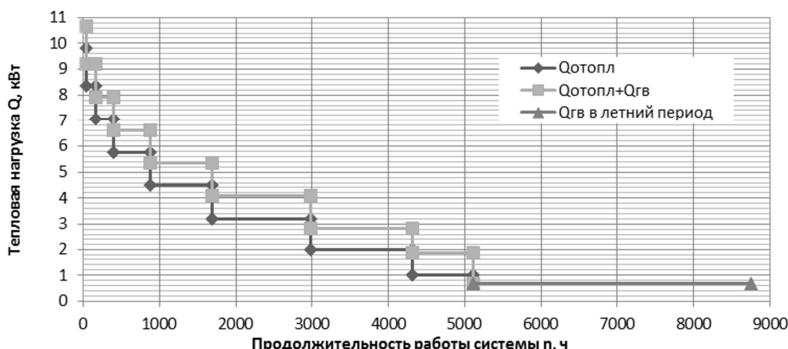


Рис. 1. Совмещенный график продолжительности тепловой нагрузки системы отопления и горячего водоснабжения

Таблица 1

Результаты расчета потребности дома в тепловой энергии

Расчетная тепловая нагрузка на отопление	Годовое потребление теплоты системой отопления	Средняя тепловая нагрузка на ГВС	
		В отопительный период	В летний период
9,8 кВт	17077 кВт·час/год	0,87 кВт	0,7 кВт

### **3. Альтернативные системы автономного теплоснабжения**

Следующим этапом было рассмотрение различных автономных систем теплоснабжения и их элементов и выбор наиболее подходящих для данной климатической зоны вариантов.

#### **3.1. Система автономного теплоснабжения с электрическим котлом**

За базовую систему, с которой в дальнейшем будет проведено сравнение всех вариантов, была взята система автономного теплоснабжения, источником тепловой энергии в которой служит электрический котел. Был выбран двухконтурный электрический котел марки Savitr Premium 12, мощностью 12 кВт, проведен расчет потребления электроэнергии системой и получена стоимость жизненного цикла системы, продолжительность которого была принята равной 30 годам (табл. 2). Так, годовое потребление электроэнергии составило 45 616 кВт ч/год, её стоимость – 155,1 тыс. руб./год.

Таблица 2  
Стоимость жизненного цикла системы автономного теплоснабжения с электрическим котлом

Капитальные затраты	Эксплуатационные затраты
75,6 тыс. руб.	4652,9 тыс. руб.

#### **3.2. Система автономного теплоснабжения с газовым котлом на основе газгольдера**

При рассмотрении системы автономного теплоснабжения с газгольдером было проведено сравнение наземных и подземных газгольдеров, в результате которого было отдано предпочтение подземному типу газгольдера ввиду бесперебойности и надежности его работы, поскольку работа газгольдера данного типа не зависит от температуры наружного воздуха. Кроме этого, установка выбранного типа оборудования позволяет сохранить первозданный внешний вид участка. По конструкции подземные газгольдеры делятся на вертикальные и горизонтальные, при их сравнении был выбран горизонтальный подземный газгольдер, т.к. горизонтальная конструкция обеспечивает стабильную и высокую производительность, а пропан - бутановая смесь, залитая в емкость, образует зеркало испарения, площади которого достаточно для испарения газа в необходимом объеме.

Необходимыми элементами данной системы являются газовый котел и газгольдер. Для проведения анализа были выбраны газгольде-

ры марки Chemet различного объема, занимающие среднюю ценовую нишу на рынке, и газовый котел марки Protherm Ягуар 11 JTV.

В результате расчета потребления газа системами отопления и ГВС была рассчитана периодичность заправки газгольдеров и затраты за жизненный цикл системы. Было получено, что наиболее выгодным будет применение газгольдера наибольшего объема, объемом 9200 литров, заправка которого будет производиться один раз в два года (рис. 2).

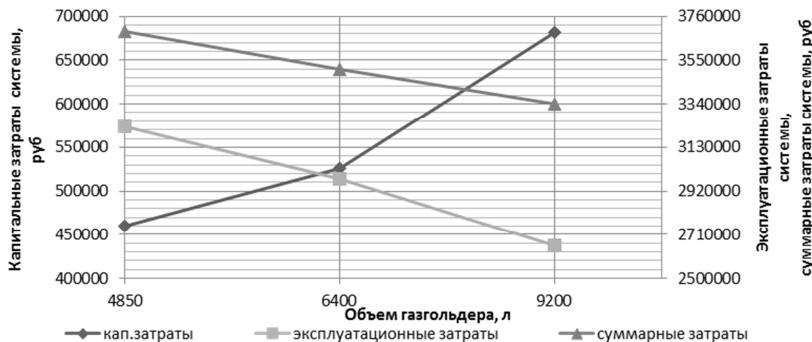


Рис. 2. Стоимость жизненного цикла системы автономного теплоснабжения с газовым котлом на основе газгольдера

Капитальные затраты на установку системы автономного теплоснабжения с газгольдером оцениваются в 726,1 тыс. руб. и составят 21% от суммарных затрат системы за ее жизненный цикл. Эксплуатационные затраты (заправка с учетом обслуживания) составят в среднем 7,4 тыс. руб./мес или 2658 тыс. руб. за 30-летний жизненный цикл системы, или 79% от суммарных затрат за весь жизненный цикл.

### 3.3. Система автономного теплоснабжения с тепловым насосом

Для системы автономного теплоснабжения, источником энергии которой является тепловой насос, был выбран грунтовый тепловой насос с зондами вертикального типа, обладающий рядом преимуществ по сравнению с другими: эффективность теплового насоса не зависит от изменения температуры наружного воздуха, для установки не требуются большие площади участка, а также отсутствуют ограничения на озеленение и ландшафтный дизайн.

При подборе теплового насоса был рассмотрен массив тепловых насосов различных марок и мощностей и построена их зависимость от капитальных затрат системы, вследствие чего для дальнейшего изуче-

ния были выбраны тепловые насосы марки Danfoss DHP-H различных мощностей, имеющие среднюю на рынке цену (рис. 3), а также пиковые электрические котлы, применяющиеся на режимах, когда необходимо обеспечить максимальную тепловую нагрузку.

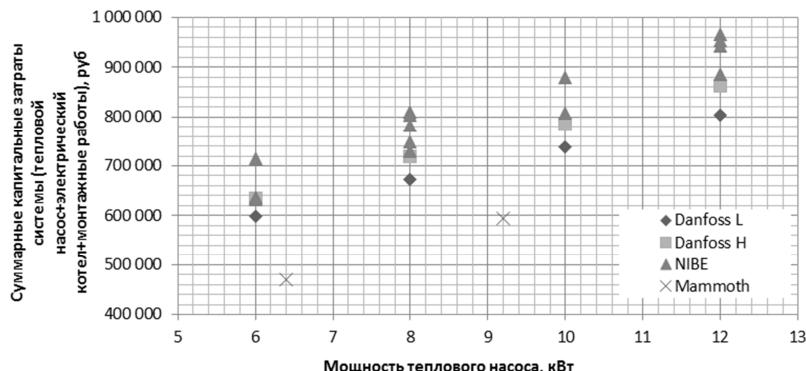


Рис. 3. Грунтовые тепловые насосы вертикального типа различных марок

Для системы автономного теплоснабжения на базе тепловых насосов были рассчитаны капитальные и эксплуатационные затраты за жизненный цикл. Было получено, что наиболее выгодным будет применение системы автономного теплоснабжения с тепловым насосом мощностью 8 кВт, для покрытия пиковых нагрузок будет использоваться электрический котел мощностью 4 кВт (рис. 4).

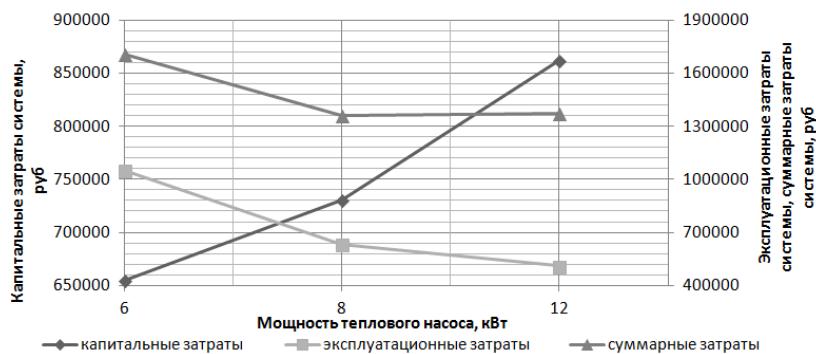


Рис. 4. Стоимость жизненного цикла системы автономного теплоснабжения с тепловым насосом

Капитальные затраты, включающие стоимость оборудования и пуско-наладочных работ, оцениваются в 730,8 тыс. руб., что составляет 54 % от суммарных затрат системы за жизненный цикл, равный тридцати годам, а эксплуатационные – 1,75 тыс. руб./мес и 63,73 тыс. руб. за весь жизненный цикл, что составляет 46% от суммарных затрат системы за ее жизненный цикл. При установке дополнительного резервного электрического котла или электрокотла увеличенной мощности для повышения надежности на случай впомолки теплового насоса, капитальные затраты системы за ее жизненный цикл увеличиваются на 2% и составят 56%, что соответствуют 795,6 тыс. руб., а эксплуатационные, в свою очередь, уменьшаются на 2% и составят 44%.

#### **4. Сравнение различных вариантов автономных систем теплоснабжения**

В заключительной части работы было проведено сравнение различных вариантов автономных систем теплоснабжения. По критерию минимальных суммарных затрат системы за жизненный цикл была выбрана система с тепловым насосом и электрическим котлом, затраты за жизненный цикл этой системы составляют 1362,48 тыс.руб., что в 2,5 раза меньше, чем у системы автономного теплоснабжения с газгольдером и в 3,5 раза меньше, чем у системы, у которой в качестве источника тепловой энергии используется электрокотел (рис. 5).



Рис. 5. Стоимость жизненного цикла различных вариантов автономных систем теплоснабжения

## **5. Сравнение автономных систем теплоснабжения с тепловым насосом при дополнительном повышении термического сопротивления ограждающих конструкций здания**

С целью определения устойчивости решения по технико-экономическим показателям был проведен расчет потребности дома в тепловой энергии при дополнительном повышении термического сопротивления ограждающих конструкций здания [1, 2]. Было получено, что суммарные тепловые потери снизились на 1,4 кВт, а годовое потребление теплоты - на 3700 кВт ч/год.

Таблица 3

Результаты расчета потребности дома в тепловой энергии

Вариант	Дополнительное утепление	Базовый вариант
Толщина теплоизоляции стен из минеральной ваты, мм	250	140
Суммарные расчетные тепловые потери здания, кВт	10,1	11,5
Потребление теплоты системами отопления и ГВС, кВт·ч/год	20 364	24 081

Сравнение систем автономного теплоснабжения для рассматриваемого дома при различных вариантах утепления ограждающих конструкций показывает, что наиболее выгодным вариантом по прежнему оказывается применение системы с тепловым насосом мощностью 8 кВт при дополнительном повышении термического сопротивления ограждающих конструкций (теплоизоляция толщиной 250 мм). Затраты за жизненный цикл при этом составят 1261,3 тыс.руб., при этом учитываются затраты на дополнительное повышение термического сопротивления ограждающих конструкций. Как можно заметить, дополнительное повышение термического сопротивления ограждающих конструкций приводит к снижению суммарных затрат за жизненный цикл, поскольку эксплуатационные затраты снижаются в большей степени, чем растут капитальные затраты. Таким образом, за счет дополнительного утепления дома экономия денежных средств за жизненный цикл составит 102,18 тыс.руб. при применении системы теплоснабжения на базе теплового насоса мощностью 8 кВт (рис. 6).

### **6. Выводы**

В результате расчета систем автономного теплоснабжения с газовым котлом на основе газгольдера было получено, что наиболее вы-

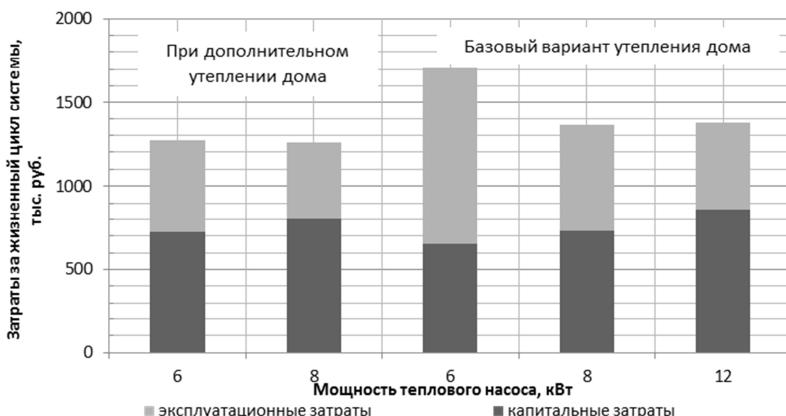


Рис. 6. Стоимость жизненного цикла автономных систем теплоснабжения с тепловым насосом для различных вариантов утепления загородного дома

годным будет применение газгольдера объемом 9200 литров, стоимость жизненного цикла которого составила 3 384 тыс. руб.

Проанализировав системы на базе тепловых насосов при наличии и отсутствии резервного электрического котла, наиболее выгодной оказалась система с тепловым насосом мощностью 8 кВт, затраты за жизненный цикл которой составили 1362,48 тыс.руб.

Заключительным этапом было сравнение различных вариантов автономных систем теплоснабжения, в результате которого была выбрана система с тепловым насосом и электрическим котлом, затраты за жизненный цикл оказались в 2,5 раза меньше, чем у системы автономного теплоснабжения с газгольдером и в 3,5 раза меньше, чем у системы, у которой в качестве источника тепловой энергии используется электрический котел.

### Библиографический список

1. Тепловая защита зданий. СП 50.13330.2012.
2. **Маявина Е. Г.** Теплопотери здания. Справочное пособие. М.: «АВОК-ПРЕСС», 2007. 144 с.
3. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: Справочник / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж и др. М.: Стройиздат, 1988. 432 с.

---

## **9. ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ**

---

### **СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**доцент Губарева В. В.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** В настоящее время при производстве строительных материалов, которое является одной из самых энергоемких отраслей промышленности, все более актуальным вопросом становится снижение расхода топлива за счет использования вторичных энергоресурсов. В работе приведены варианты снижения энергозатрат за счет использования теплоты отходящих от печей газов в керамической промышленности.

Производство строительных материалов занимает лидирующие позиции как энергопотребитель и экономия энергии становится основной задачей отрасли. В среднем на 1 т готового продукта на предприятиях строительных материалов расходуется 50...100 кг. у.т.

Полное теплоиспользование предприятия складывается из полезного тепловосприятия отдельных технологических процессов. Важнейшим направлением энергосбережения является создание комплексных технологий, обеспечивающих использование потенциала отходящих потоков различных стадий технологического процесса [1].

Существенной экономии топлива, и, как следствие снижения загрязнения окружающей среды, можно достигнуть за счет утилизации теплоты отходящих газов, использование которых еще недостаточно и составляет в среднем 30...40%, между тем как их доля в общем, балансе возможного использования тепловых вторичных энергоресурсов составляет 75% [2]. Печи – наиболее крупный промышленный потребитель энергоресурсов, и поэтому здесь обязательно должны использоваться энергосберегающие технологии [5].

Теплоутилизационные системы для печей привлекают наибольшее внимание, особенно сбросная теплота, так называемые вторичные энергоресурсы. Возможность использования теплоты отходящих газов для технологических и энергетических целей зависят от их температур-

ры, теплового потенциала отходов и режима их поступления в теплоиспользующую установку. Кроме использования вторичных энергоресурсов экономия потребления первичных энергетических ресурсов осуществляется повышением коэффициента полезного действия (КПД) технологических установок и агрегатов [3].

В тех отраслях промышленности, где имеются производительные высокотемпературные установки, ступенчатое использование температурного потенциала уходящих газов печей и других агрегатов позволяет в ряде случаев исключить использование топлива для проведения низкотемпературных процессов, например, сушки [6].

В данной работе рассматривались возможности использования теплоты отходящих от печей газов в керамической промышленности.

Предметом исследования была выбрана туннельная печь для обжига глиняного кирпича производительностью 17 млн. шт./год. В результате расчета теплового баланса печи определили температуру отходящих газов, которая составила 75°C и объем дымовых газов  $10,68 \text{ м}^3/\text{нм}^3$ . Сушка глиняного кирпича перед обжигом осуществляется в туннельных сушилках, в которых используется низкопотенциальный сушильный агент.

Процесс сушки является энергоемким и неэкономичным в тепловом отношении. Объективной характеристикой энергетической экономичности сушильных установок является удельный расход тепловой энергии на 1 кг испаренной влаги. Теоретически необходимое количество теплоты для испарения 1 кг влаги составляет при обычных условиях 2200...2700 кДж/кг. КПД сушильных установок составляет 30...33%. Повышение КПД сушильных установок вдвое позволило бы экономить ежегодно до 60 миллионов тонн условного топлива [4].

В то же время для сушки кирпича в туннельной сушилке нужен сушильный агент с температурой того же порядка. Но в качестве сушильного агента отходящие от туннельной печи газы использовать нежелательно, так как их использование имеет ряд негативных последствий:

- создается загазованность производственных помещений из-за неплотностей в сушилках;
- портится металлическая часть вагонеток из-за коррозии металла;
- портятся также алюминиевые рамки вагонеток от наличия в дымовых газах сернистых соединений;
- ухудшается качество сушимого кирпича.

Поэтому наиболее целесообразно использовать тепло отходящих газов для подогрева сушильного агента. Наиболее эффективным способом

для этого часто является применение регенеративных теплообменных аппаратов. В промышленности используются регенераторы с вращающейся и неподвижной насадкой. Регенераторы с неподвижной насадкой являются регенераторами периодического действия и используются при высоких температурах отходящих газов. Регенераторы с вращающейся насадкой используются в основном при невысоких температурах отходящих газов и являются аппаратами непрерывного действия.

Так как для сушилки необходима непрерывная подача сушильного агента, мы остановились на регенеративном воздухоподогревателе с вращающейся насадкой, которые применяются при небольших температурах газов. Вращающаяся насадка состоит из гофрированных стальных листов. Эти регенераторы достаточно дорогостоящие, так как их конструкция состоит из металла. Традиционно в промышленности применяют вертикальные и горизонтальные регенераторы. В последнее время все более часто используются секционные вертикальные регенераторы. Основное преимущество секционных регенераторов по сравнению с регенераторами с общей камерой в том, что в них можно менять насадку без нарушения работы печи.

В промышленности используют регенераторы с вращающейся насадкой трех типов: насадка в виде матрицы, изготовлены из плетеной металлической сетки (выполненной из алюминия или нержавеющей стали), гофрированная насадка, напоминающая соты с мелкой ячейкой и неметаллические насадки, известные под названием гигроскопических. Сама насадка имеет невысокую стоимость, но при этом обладает высоким термическим КПД. Недостатком таких насадок является более высокое аэродинамическое сопротивление. Также в отличие от других типов, они более интенсивней загрязняются.

Для использования теплоты отходящих газов и повышения эффективности теплотехнологической схемы был выбран вариант регенеративного воздухоподогревателя с насадкой второго типа, так как она имеет меньшее гидравлическое сопротивление, позволяет уменьшить загрязнение и облегчить очистку.

В результате теплотехнического и конструктивного расчета получили, что при производительности регенератора  $40200 \text{ нм}^3/\text{ч}$ , необходимая поверхность теплообмена  $489,2 \text{ м}^2$ , объем насадки  $0,245 \text{ м}^3$  и масса насадки 1911 кг. Температура воздуха после регенератора, при таких параметрах, достигает  $57^\circ\text{C}$ , что вполне приемлемо для сушки кирпича. Экономия топлива при производстве керамического кирпича составила 23% при сроке окупаемости менее года.

Второй вариант – утилизация теплоты отходящих газов с температурой 200°С из зоны подогрева туннельных печей в распылительной сушилке. Эта сушилка предназначена для получения из глиняного шликера пресс-порошка особой морфологической структуры, которая необходима при полусухом прессовании керамической плитки. Сушка в этих аппаратах характеризуется высокой интенсивностью и процесс завершается чрезвычайно быстро (примерно за 15...30 сек.). Но при этом, несмотря на высокую температуру газов, температура поверхности материала лишь немного выше температуры адиабатического испарения, и сушка происходит в мягких температурных условиях с получением качественного продукта, не требующий дальнейшего измельчения [2].

В результате расчетов распылительной сушилки были определены необходимый объемный расход теплоносителя, конструктивные размеры сушилки и расчет и подбор вспомогательного оборудования. Согласно произведенным расчетам и заданным величинам выбрали распылительную сушилку общего назначения диаметром 6,5 м, высота цилиндрической части 10 м, с рабочим объемом:  $V = 330 \text{ м}^3$ , оборудованную 6 пневматическими форсунками. Результаты технико-экономического расчета полностью подтверждают целесообразность этого варианта, т.к. себестоимость единицы продукции снизилась на 148 руб./тыс. шт.у. кирпича, срок окупаемости составил 0,5 года.

#### **Библиографический список**

1. Семененко Н.А., Куперман Л.И., Романовский С.А. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. Киев: «Выща школа», 1979. 296 с.
2. Губарева В.В. Некоторые экологические аспекты утилизации вторичных энергоресурсов // Рациональное природоиспользование как фактор устойчивого развития. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. С. 186 –192.
3. Данилов О.Л., Леончик Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
4. Михайлов В.В., Гудков Я.В., Терщенко А.В. Рациональное использование топлива и энергии в промышленности. М.: Энергия, 1978. 282 с.
5. Трубаев П.А. Энерготехнологический анализ высокотемпературных процессов и аппаратов производства силикатных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2007. № 1. С. 11-13.
6. Тепловой анализ технологической линии по экструдированию и сушке техногенных волокнистых материалов / С.Н. Глаголов, В.С. Севостьянов, А.М. Гридчин и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 78-83.

# **ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ СМЕСИ С ТЕХНОГЕННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

д-р техн. наук, проф. Загороднюк Л.Х.

аспирант Корякина А.А.

студент Севостьянова К.И.

магистрант Хахелева А.А.

*Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** Рациональное использование техногенных материалов с различными физико-механическими характеристиками является одним из эффективных направлений ресурсо-теплосбережения и производства теплоизоляционных материалов. В работе представлены результаты экспериментальных исследований и проектно-конструкторских разработок по созданию технологической линии для производства теплоизоляционных смесей с использованием техногенных поризованных заполнителей.

В настоящее время в России и за рубежом теплоизоляция наружных поверхностей зданий и сооружений является одной из важнейших задач ресурсо-теплосбережения. За рубежом наибольшее распространение получили теплоизоляционные смеси с поризованными заполнителями: мелкозернистый керамзит, всученный стеклогранулят, перлит, вермикулит, сферообразный пенополистерол и др. [1].

Проведенный анализ показывает, что в России при эксплуатации коммунального хозяйства расходуется до 20% всех энергоресурсов страны, что в 2-3 раза больше расходуемой энергии на единицу площади, чем в европейских странах. В странах Европы при эксплуатации многоэтажных жилых зданий расходуется 350-550 кВт/ч энергии, котеджей 600-800Квт/ч. В то же время, в экономически развитых странах Европы жилые здания потребляют 90-120 Квт/ч энергии.

В этой связи более активное развитие теплозащитных материалов, наряду с использованием в композиционных смесях техногенных поризованных компонентов (пылеуноса обжиговых агрегатов перлитового, вермикулитового производств, зольных компонентов ТЭЦ и др.), а также органо-минеральных фибронаполнителей, оказывающих армирующее воздействие, является весьма перспективным направлением для науки и практики.

При этом решаются не только назревшие задачи ресурсо-теплосбережения, но и рационального использования техногенных материалов, а также защиты окружающей среды от загрязнений.

Теплоизоляционные композиционные смеси включают в себя смесь вяжущих, заполнителей и различных добавок. В табл. 1 представлены основные компоненты сухих строительных смесей.

Таблица 1  
Компоненты сухих строительных смесей

Вяжущие	Заполнители и наполнители	Химические добавки
Портландцемент, белый цемент, гипс, ангидрит, известь, глиноземистый цемент, диспергируемые полимерные порошки	Кварцевый песок, известняк, мел, доломит, перлит, каолин, микрокремнезем, золаунос, волокна (фибра), пигменты, легкие заполнители (керамзит, вспученный вермикулит и перлит, пемза и др.)	Пластификаторы, стабилизирующие и водоудерживающие добавки диспергируемые полимерные порошки, замедлители, ускорители, загустители, порообразующие и антивспенсирующие добавки.

Особое место в теплоизоляционных композиционных смесях (ТКС) занимают поризованные заполнители. В проведенных исследованиях [2] в качестве поризованного заполнителя использовался вспученный перлитовый песок производства ОАО «Осколснаб» (г. Старый Оскол, Белгородская область). Гранулометрический состав вспученного перлитового песка представлен в табл. 2.

Химический состав перлита представлен следующими оксидами, мас.% : SiO<sub>2</sub> – 75,8; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 12,73; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1,47; CaO – 2,46.

Рентгенофазовый анализ (РФА) показал, что перлитовый песок представлен минералами: кристобалитом, тридимитом и полевым шпатом.

Таблица 2  
Гранулометрический состав перлитового песка

Наименование остатка	Остатки на ситах, мас. %					Проход через сито 0,14, мас. %
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Частный	7,2	19,4	18,2	29,6	25,2	0,4
Полный	7,2	26,6	44,8	74,4	99,6	100

При проведении экспериментальных исследований использовались следующие составы ТКС, табл. 3

Таблица 3  
Композиционный состав теплоизоляционных смесей

№ состава	Соотношение цемент: вспученный перлитовый песок по объему	В/Т	Осадка конуса, см	Средняя плотность, кг/М <sup>3</sup> (28 сут.)	Средняя прочность на сжатие, Мпа (28 сут.)
1	1:5	1,34	10,3	952	1,9
2	1:7	1,38	11	555	1,5
3	1:9	1,59	10,5	490	1,1
4	1:11	1,78	10,2	443	0,8
5	1:15	213	10,3	381	0,3

В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ (ЦЦ 500 Д0). Водотвердое отношение определялось согласно существующим техническим требованиям к штукатурным растворам (подвижность смеси ОК= 10...11 см.). Результаты экспериментальных исследований (испытания кубиков размером 7,07\*7,07\*7,07 см. на сжатие при достижении возраста 28 суток) представлены в виде графической зависимости (рис. 1). Соотношение «цемент- перлит» (Ц/П) изменялось в диапазоне 1:5...1:15.

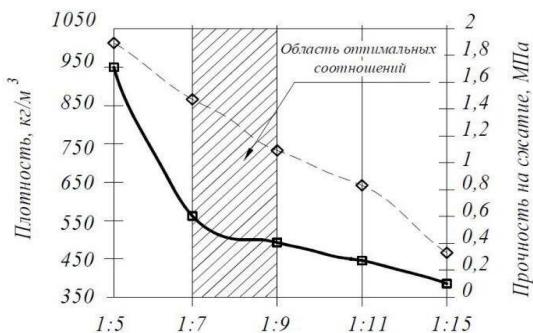


Рис. 1. Зависимость прочности и плотности образцов от соотношения «Цемент: перлитовый песок» композиционной смеси

— кривая плотности; - - - кривая прочности.

Анализ показывает, что при соотношении Ц/П = 1:7 достигаются значения: плотность образцов  $\rho = 550 \text{ кг}/\text{м}^3$ , прочность на сжатие  $\sigma = 1,5 \text{ МПа}$  (при минимально допустимой прочности штукатурных растворов  $\sigma = 1,0 \text{ МПа}$ ).

Изучение влияния гранулометрического состава перлитового песка на физико-механические характеристики образцов показало, что его выбор определяется конечной целью- достижением максимальной прочности образцов (при повышенной плотности) или получением образцов с повышенными теплозащитными свойствами.

Наименьшей теплопроводностью обладают образцы с размером зерен 140...630 мкм (при 50% содержании, мас.). При увеличении содержания крупных фракций наблюдается повышение плотности и, соответственно, механической прочности при более высокой теплопроводности.

В связи вышеуказанным нами изучалась возможность использования в составе ТКС отходов перлитового производства- перлитовой пыли, уловленной в циклонах и рукавных фильтрах. Перлитовая пыль характеризуется большим содержанием кремнезема ( $\text{SiO}_2 = 75,7\%$ ) и окиси алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12,8\%$ ), а также большей активностью по поглощению ионов  $\text{Ca}^{2+}$  из насыщенного раствора извести по сравнению с композиционным перлитом.

При соотношении Ц/П = 1:9 с добавлением 20% перлитовой пыли и использованием модифицированных добавок (Tylose, Tylovise SE, Hostapur OSB и др.) плотность штукатурного раствора достигала  $490 \text{ кг}/\text{м}^3$ , а прочность на сжатие  $\sigma = 2,2 \text{ МПа}$ . Коэффициент теплопроводности ТКС соответствует СНиП 11-3-79  $\lambda \leq 0,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  или по европейскому стандарту на штукатурные растворы EN 998-1 для марок Т1 –  $\lambda = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  и Т2 –  $\lambda = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Для обеспечения штукатурным смесям кроме теплоизоляционных свойств еще и (при необходимых прочностных характеристиках) художественно-декоративного вида (рис. 2) целесообразно использовать вермикулит и вермикулитовую пыль, уловленную в системе [3].



Рис. 2 Микрофотография вермикулита

Для получения теплоизоляционных композиционных смесей различных составов с использованием техногенных материалов может быть использован разработанный нами технологический комплекс (рис. 3) [4, 5]. Комплекс позволяет реализовать различные технологические операции: складирование, приготовление различных компонентов теплоизоляционной смеси (вязущего, поризованных заполнителей, техногенных фибронаполнителей, органических добавок); их качественную гомогенизацию в смесителе рециркуляционного действия; упаковку и складирование готовой продукции.

В случае необходимости предусмотрена механоактивация вяжущего и фибронаполнителей до микродисперсного состояния в центробежно-помольном смесительном агрегате селективного измельчения.

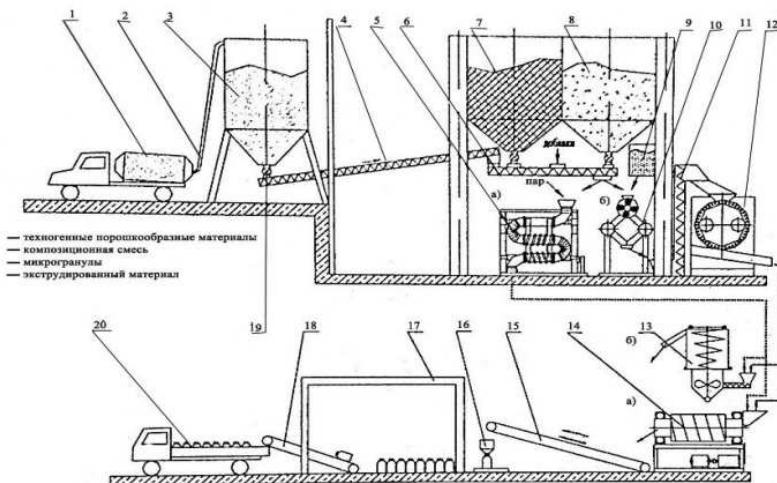


Рис. 3. Схема теплоизоляционных композиционных смесей:  
 1 – автотранспорт; 2 – пневмотранспорт; 3 – бункер вяжущих; 4 – шнековый конвейер; 5 – центробежный помольно-смесительный агрегат; 6 – шнековый питатель; 7 – бункер поризованных заполнителей; 8 – бункер техногенных фибронаполнителей; 9 – бункер добавок; 10 – роторно-рециркуляционный смеситель; 15,18 – ленточный конвейер; 16 – весовой дозатор; 17 – склад теплоизоляционных композиционных смесей комбинированного действия; 19 – ячейковый питатель; 20 – автотранспорт готовой продукции

## **Выводы.**

1. Проведены исследования физико-механических характеристик и химического составов поризованных заполнителей (перлита, вермикулита) и уловленного при их производстве пылеуноса.
2. Установлена кинетика процесса набора прочности перлитосодержащих композиционных смесей при различном соотношении «цемент-перлит» 1:5...1:15
3. При соотношении Ц/П=1:7 плотность экспериментальных образцов достигает  $\rho=550\text{кг}/\text{м}^3$ , а прочность на сжатие  $\sigma=1,0\text{МПа}$
4. Наименьшей теплопроводностью обладают образцы с размером зерен перлита 140...630 мкм (при 50%ом их содержании, масс.) При соотношении Ц/П=1:9 и добавления в композиционную смесь 20% перлитовой пыли и модифицированных добавок (Tylose, Tylovise SE, Hostapur OSB и др.) плотность штукатурного раствора достигала  $490\text{кг}/\text{м}^3$ , а прочность на сжатие  $\sigma=2,2\text{МПа}$ .
5. Для расширения технологических и архитектурно-строительных возможностей ТКС целесообразно использовать вермикулит и его производные
6. Разработан технологический комплекс для производства теплоизоляционных композиционных смесей и специальное оборудование для механоактивации и гомогенизации смеси

## **Библиографический список**

1. Теплоизоляция. Материалы, конструкции, технологии: справ. пособие / Б.М. Шойхет, А.Д. Жуков, Л.В. Ставрицкая, С.Д. Сокова. М.: Стройформ, 2008. 440 с.
2. **Ширина Н.В., Загороднюк Л.Х.** Эффективные строительные смеси для теплоизоляционных работ: Монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 184 с.
3. **Зедгенизов, В.Г. Нижегородов А.И.** Новая концепция развития отечественной вермикулитоперерабатывающей промышленности // Современные технологии, системный анализ, моделирование. 2010. № 2. С. 100–103.
4. Технологические комплексы и оборудование для переработки и утилизации техногенных материалов / В.С. Севостьянов, В.И. Уральский, М.В. Севостьянов, О.А. Носов. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 321 с.
5. Техника и технологии для экструдирования и сушки техногенных материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Гридчин и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 118-123.

# **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛА В КЛИНКЕРНОМ ХОЛОДИЛЬНИКЕ**

канд. техн. наук, доц. **Коновалов В.М.**

студент **Кулаков А.А.**

магистрант **Литовченко А.В.**

магистрант **Гончаров А.А.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** Одним из перспективных способов, существенно расширяющим технологические возможности производства цементного клинкера является применение метода химической регенерации тепла (ХРТ) и использование синтез газа (смесь  $H_2$  и  $CO$ ) в качестве основного технологического топлива. В статье рассматривается влияние использования химической регенерации топлива в системах рекуперации тепла (клинкерных холодильников) на изменение активности клинкеров с низким содержанием алюмоферритной фазы.

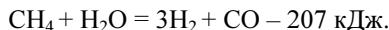
Цементная промышленность в России является весьма энергоемкой отраслью, потребляющей ежегодно более 12 млн. т условного топлива. С учетом потребления энергетических ресурсов на добычу сырья и его переработку она занимает третье место после топливно-энергетической и металлургической отраслей. При производстве цемента по мокрому способу доля затрат на технологическое топливо в его себестоимости превышают 40% а непроизводительные затраты топлива составляют около 75% [1].

При совершенствовании технологии производства цемента, проектировании новых или модернизации действующих печей следует особое внимание уделять процессам рекуперации тепла и эффективному использованию вторичных энергетических ресурсов [2]. В этой связи клинкерный холодильник следует рассматривать не только как агрегат, цель которого охладить клинкер, но в первую очередь как рекуператор, обеспечивающий повышение работоспособности воздуха (его экспергетический потенциал), идущего на горение топлива. С развитием сухого способа производства цемента и снижением в этой связи расхода топлива и воздуха на его горение, устанавливается ограничение на количество тепла, которое может быть рекуперировано холодильником. Из-за ограничения рекуперации тепла существует предел, до которого клинкер может быть охлажден. Существующие типы клинкерных холодильников, для охлаждения клинкера ниже 100°C по

требованию технологического регламента, вынуждены использовать большее количество воздуха, чем необходимо для полного сжигания топлива в печи. Для поддержания температуры клинкера в диапазоне от 100°C до 50°C необходимо от 3 до 4 кг воздуха/кг клинкера. При возврате в печь всего воздуха в качестве вторичного, КПД холодильника будет приближаться к 100%. Однако, процессу горения требуется только 2 кг воздуха и максимальный теоретический КПД не превысит 86%. Выполнение практических рекомендаций по рациональному распределению охлаждающего воздуха в подрешеточном пространстве колосникового холодильника типа «Волга» на ряде цементных заводов обеспечило повышение теплового КПД колосникового холодильника с 0,7 до 0,93 и, как следствие, значительное снижение расхода топлива [3]. Поскольку повышение КПД холодильника даже на 1% ведет к снижению удельного расхода тепла всей печи на 17–21 кДж/кг кл., то эффективные мероприятия по модернизации холодильников все еще оправдывают себя.

Применение метода химической регенерации тепла (ХРТ) в рекуперативных системах и использование синтез газа (смесь H<sub>2</sub> и CO) в качестве основного технологического топлива, является одним из перспективных способов, существенно расширяющих технологические возможности производства цементного клинкера, и требует решения ряда научных и прикладных задач. В частности создания термохимических реакторов (TXR) и организации процесса сжигания модифицированного топлива.

Ранее проведенные исследования [1,4] показали возможность пароводяной конверсии природного газа в слое клинкера при температуре выше 700 °C. Существенное влияние на количество тепла, поглощаемого в термохимическом реакторе, оказывает теплота реакции. В результате проведения процессов нагрева, испарения и перегрева смеси воды и метана, при стехиометрическом соотношении компонентов (0,47 кг CH<sub>4</sub> и 0,53 кг H<sub>2</sub>O) реакция паровой конверсии метана изменяет энталпию исходных компонентов на стадии подготовки (так называемый физический хладоресурс). В диапазоне температур от T = 273 K до T = 1000 K он составляет ΔH<sub>физ.</sub> = 3,2 МДж/кг смеси.



Химический хладоресурс, равный теплоте реакции, составляет ΔH<sub>хим.</sub> ≈ 6,1 МДж/кг смеси. Полный хладоресурс конверсии газообразного топлива составит ΔH<sub>Σ</sub> = ΔH<sub>физ.</sub> + ΔH<sub>хим.</sub> = 9,3 МДж/кг смеси. Для

сравнения, изменение энталпии жидкого водорода, нагретого до температуры самовоспламенения ( $T = 850\text{K}$ ) составляет  $\Delta H_{\text{физ.}} = 12 \text{ МДж/кг}$ . Как видно, композиция углеводород плюс вода, прошедшая физико-химическое превращение в ТХР, по располагаемому хладоресурсу приближается к варианту охлаждения жидким водородом, и превосходит его по относительному хладоресурсу  $\Delta H/H_u$  ( $H_u$  – теплота сгорания). Таким образом, физико-химическая утилизация тепла и последующее сжигание преобразованного синтетического топлива приводят к повышению эффективности энергетических устройств и экономии топлива. К тому же, при сжигании синтез-газа существенно уменьшается количество выбросов в атмосферу углекислого газа. Поэтому рассматриваемый процесс ХРТ можно считать примером новой энергоэффективной технологии, снижающей вредное воздействие на экологию.

Однако, использование метода ХРТ в системе рекуперации тепла в клинкерном холодильнике, помимо технической задачи, предполагает исследование воздействия сильно восстановительной среды на фазовый состав клинкера и качество получаемого цемента.

Объектом изучения послужили клинкеры ЗАО «Белгородский цемент» и опытный клинкер, синтезированный из химических реагентов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaCO}_3$  марки ЧДА. Опытный клинкер отличался повышенным содержанием оксида железа и имел  $\text{KH} = 0,93$ ;  $p = 0,7$  и  $n = 1,7$ . Химический состав клинкеров приведен в табл. 1. Увеличенная доля алюмоферритов кальция должна более четко отреагировать на изменение условий охлаждения. Особенностью эксперимента является то, что резкому охлаждению подвергаются клинкеры, в которых прошли процессы кристаллизации жидкой фазы, что должно сильно замедлить возможную диффузию ионов. Температура отжига не превышала  $1100^\circ\text{C}$ . Для сравнения другая часть проб подвергалась отжигу в при такой же температуре в воздушной среде.

Таблица 1  
Химический состав сырьевой смеси

Компоненты	Состав, %					Сумма, %
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	
Опытный клинкер	13,92	3,37	4,82	43,49	0,00	100,00
Клинкер ЗАО «Белгородский цемент»	19,34	4,09	3,46	63,21	0,97	91,07

Синтез газ получали в слое испытываемых клинкеров на модельной установке. Через слой в течение 10 минут продувался бутан и пар в соотношении 1:4. Состав газов из реактора оценивался по показаниям газоанализатора VARIO plus industrial. В составе газов фиксировались CO и N<sub>2</sub>. Водород не определялся. Наличие угарного газа свидетельствует о протекании реакции пароводяной конверсии углеводородов.

Фазовый состав продуктов охлаждения определялся на дифрактометре ДРОН-3. Дифрактограммы приведены на рис. 1 и 2.

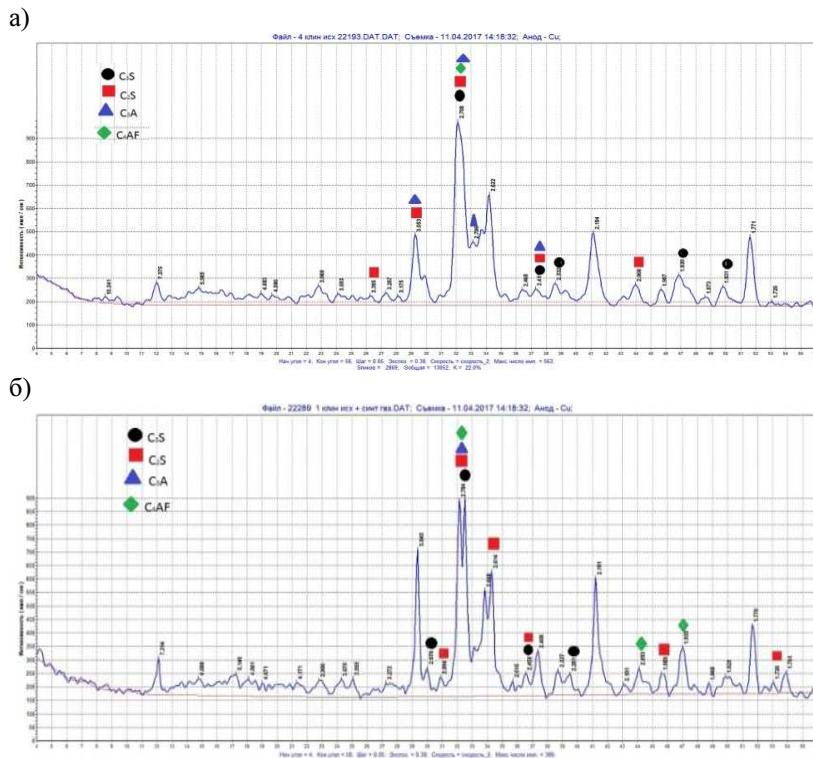


Рис.1. Дифрактограммы опытного клинкера:  
а) охлажденного на воздухе; б) в реакторе ХРТ

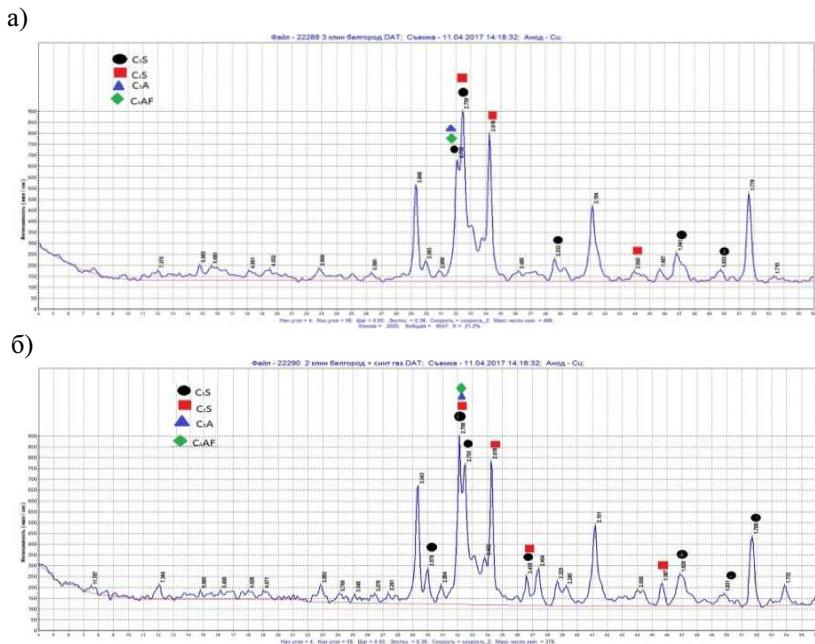


Рис. 2. Дифрактограммы клинкеров ЗАО «Белгородский цемент»:  
а) охлажденного на воздухе; б) в среде синтез газа

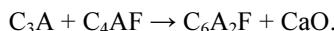
Охлажденный на воздухе опытный клинкер представлен [5] основными силикатными фазами:  $C_3S$  (3,047; 2,78; 1,769 Å),  $C_2S$  (2,89; 2,75; 2,61; 2,18 Å), A-F фаза представлена преимущественно  $C_4AF$  (7,24; 2,65; 1,94 Å) и  $C_3A$  (2,71; 1,91 Å). Наличие отражений (4,89; 2,69 Å) указывает на возможное присутствие фазы  $C_{12}A_7$ .

В опытных «железистых» клинкерах, охлажденных в реакторе ХРТ фиксируется некоторое снижение характеристических дифракционных максимумов  $C_3S$  (2,78; 2,61; 1,769 Å) и  $C_3A$  (2,71 Å), и в то же время увеличение интенсивности отражения 2,648 Å. Уменьшение межплоскостного расстояния от 2,657 Å до 2,649 Å указывает на увеличении доли  $Al_2O_3$  в составе A-F фазы, что позволяет идентифицировать эту фазу как  $C_6A_2F$ . В составе клинкеров в обоих случаях фиксируется небольшое количество фазы  $C_{12}A_7$ . При этом в восстановительных условиях при обработке синтез газом интенсивность отражений характерных для майенита и  $C_3A$  снижается. Отличительной осо-

бенностью клинкеров, охлажденных в среде синтез газа, является появление фазы свободного CaO (2,41; 1,70 Å).

Микроскопический анализ клинкеров показал увеличение светло-го промежуточного вещества, отождествляемого с железосодержащей фазой, что косвенно подтверждает данные дифракционного анализа.

Вероятно, возможен механизм, протекающий по реакции:



Охлаждение клинкера ЗАО «Белгородский цемент» в среде синтез газа (рис. 2) показало некоторое снижение характеристического пика  $C_3S$  (2,97; 2,76; 1,76 Å) и  $C_3A$  (2,70 Å). В то же время фиксируется увеличение интенсивности дифракционных отражений характерных для  $\beta\text{-}C_2S$  (2,78; 2,19 Å) и увеличение количества алюмоферритной фазы представленной  $C_4AF$  (7,24; 2,63 Å).

Охлаждение данного клинкера в среде синтез газа также показало появление несвязанного оксида кальция (2,41; 1,70 Å).

Микроскопический анализ явных разрушений кристаллов алита не показал, но в составе промежуточного вещества зафиксировал увеличение доли светлой фазы, которую можно идентифицировать как  $C_4AF$ . Полученные результаты позволяют предположить, что свободный CaO выделяется при разложении фазы  $C_3A$ .

Клинкер ЗАО «Белгородский цемент», охлажденный в воздушных условиях представлен основными фазами:  $C_3S$  (3,03; 2,76; 1,76 Å),  $C_2S$  (2,89; 2,759; 2,61; 2,19 Å),  $C_4AF$  (7,24; 2,63; 2,04 Å) и  $C_3A$  (2,71; 1,91 Å).

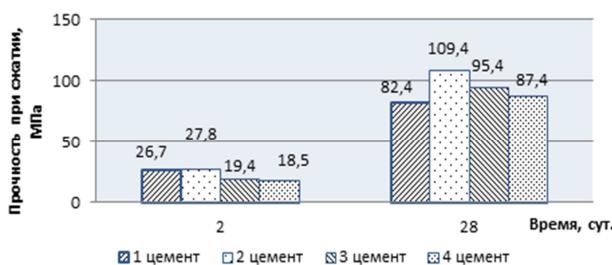


Рис. 3. Прочность цементов при сжатии:  
1 – цемент ЗАО «Белгородский цемент» и 2 - опытный цемент охлажденные на воздухе; 3 - цемент ЗАО «Белгородский цемент» и 4 - опытный цемент, охлажденные в среде синтез газа

Физико-механические испытания (рис. 3) показали, что наибольшей активностью в ранние сроки твердения обладает цемент ЗАО «Белгородский цемент», а к 28 суткам наибольшую прочность набрал опытный цемент, охлажденный на воздухе.

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о положительном влиянии способа охлаждения клинкера в реакторе химической регенерации топлива на активность клинкеров с невысоким содержанием алюмоферритной фазы. Для клинкеров с высоким содержанием оксидов железа охлаждение в восстановительных условиях приводит к существенному изменению состава алюмоферритов кальция, что сопровождается возникновением новой фазы -  $C_6A_2F$ , выделением  $CaO$  и снижает прочность цементов.

Использование химической регенерации топлива в системах рекуперации тепла позволяет эффективней использовать тепло охлаждаемого клинкера, а получение значительного объема синтез газа обеспечивает повышение экспергетического уровня природного топлива, что повышает энергоэффективность производства и снижает себестоимость продукции.

#### **Библиографический список:**

1. Коновалов В.М., Ткачев В.В., Черкасов А.В. Энергоэффективная технология производства цементного клинкера: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 96 с.
2. Классен В.К. Обжиг цементного клинкера: монография. Красноярск: Стройиздат, 1993. 320 с.
3. Повышение эффективности тепломассообменных процессов в производстве цемента / В.М. Коновалов, С.А. Пересок, М.А. Петрова, А.Н. Образумов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 176–181.
4. Корабельников А.В., Куранов А.Л., Рыжиков С. С. Физико-химическая кинетика в газовой динамике [Электронный ресурс] // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2006. Т. 4. 12 с. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2006-4/articles/99/>.
5. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный анализ: справочное руководство. М.: Наука, 1976. 570 с.

# **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЛОКАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДОЖИГАНИЯ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ В ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПРИ ЭЛЕКТРОПЛАВКЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕТАЛЛИЗОВАННОГО СЫРЬЯ**

д-р техн. наук, проф. **Меркер Э.Э.**

инженер **Степанов В.А.**

канд техн. наук, проф. **Крахт Л.Н.**

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова –,  
филиал НИТУ «МИСИС», г. Старый Оскол*

**Аннотация.** В работе разработан метод локально распределенного дожигания горючих газов в дуговой печи, заключающийся в том, что применяют железорудные металлизованные окатыши, которые загружают через полые (трубчатые) графитированные электроды в жидкий расплав, а также применяют продувку горючих газов встречными потоками струй кислорода, истекающими из отверстий водоохлаждаемых колец, многосопловой кислородной фурмы и устройства для дожигания горючих газов.

**Введение.** Метод локально распределенного дожигания горючих газов в дуговой печи необходим для того, чтобы интенсифицировать процесс плавления железорудного металлизованного сырья (окатышей, брикетов и т.д. и) и повысить энергоэффективность плавки стали в дуговой печи. Актуальность данного метода заключается в том, что дожигание горючих газов проводят в трех технологических зонах дуговой печи. В первой зоне осуществляют дожигание струями кислорода над сталеплавильной ванной между полыми (трубчатыми) графитированными электродами, где протекают процессы плавления железорудного металлизированного сырья, а во второй и третьей зонах производят дожигание газов встречными струями кислорода, истекающими из сопел кислородных водоохлаждаемых фурм.

**Цель работы:** разработать метод локально распределенного дожигания горючих газов при электроплавке железорудного металлизованного сырья и повысить эффективность использования тепла горючих газов в дуговой печи.

**Содержательная часть.** Процесс плавки стали в дуговой печи (ДП) является основным способом производства качественных марок стали и обладает большими резервами повышения технико-экономических показателей, но существенным недостатком его является высокий вынос из агрегата значительного количества оксида уг-

лерода, обладающего высоким энергетическим потенциалом, что заметно снижает термический коэффициент полезного действия дуговой печи и ухудшает экологические показатели производства. Это обстоятельство диктует необходимость производить дожигание оксида углерода струями кислорода с применением топливно-кислородных горелок (ТКГ) и кислородной многосопловой фурмы.

С целью повышения эффективности использования тепла горючих газов в дуговой печи разработан метод локально распределенного дожигания горючих газов в сталеплавильном агрегате. Данный метод заключается в том, что дожигание осуществляется в трех технологических зонах дуговой печи (рис. 1).

В первой зоне технологического процесса дожигание осуществляют струями кислорода, истекающими из отверстий в водоохлаждаемых кольцах свода печи в межэлектродное пространство, во второй зоне горючие газы дожигаются струями кислорода, истекающими из кислородной многосопловой водоохлаждаемой фурмы, находящейся перед газоходом с газоотводящим трактом [1]. В третьей технологической зоне дожигание газов осуществляют в газоходе печи многоструйными потоками кислорода, истекающими из специальной фурмы с многосопловой головкой, при этом интенсивность подачи кислорода находят по формуле:

$$I_{O_2} = 0,5 \cdot V_{CO}, \quad (1)$$

где  $V_{CO}$  - расход СО в газоходе с газоотводящим трактом,  $m^3/s$ .

Для осуществления электроплавки стали в сталеплавильном агрегате, включающем футерованную дуговую сталеплавильную печь (1) со съемным оgneупорным сводом (4), металлошихта превращается в жидкий металл (2) за счет подогрева и расплавления шихты электрическими дугами (20) от полых (трубчатых) электродов (7) в своде, закрепленные электрододержателями агрегата (5). При этом за счет подачи шлакообразующих материалов (извести, плавикового шпата и других) в дуговой сталеплавильной печи над металлошихтой образуется жидкий шлак (3), который по ходу электроплавки стали периодически скачивается. С появлением жидкого металла (2) через находящиеся в своде дуговой печи водоохлаждаемые кольца с отверстиями (6), происходит подача кислорода (26) навстречу отходящим из сталеплавильной ванны газам с целью более быстрого нагрева и плавления железорудного металлизированного сырья.

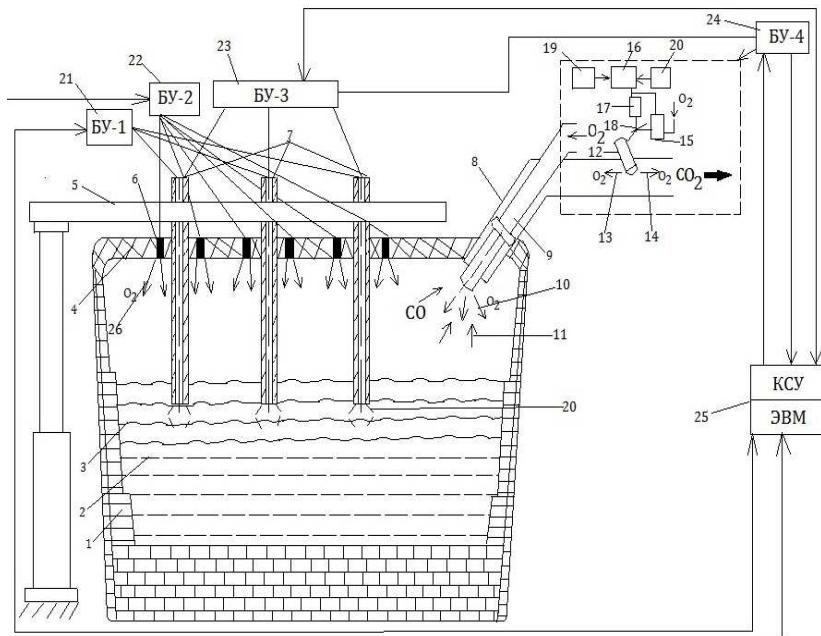


Рис. 1. Схема дуговой печи:

1 - дуговая печь с футеровкой; 2 - жидкий металл; 3 - жидкий шлак; 4 - съёмный огнеупорный свод дуговой печи; 5 - электрододержатель агрегата; 6 - водоохлаждаемые кольца с отверстиями для подачи кислорода; 7 - три полых (трубчатых) графитированных электрода; 8 - газоход для отвода газов из дуговой печи; 9 - устройство для дожигания горючих газов перед газоходом с газоотводящим трактом в своде агрегата; 10 - струи кислорода на дожигание CO до  $\text{CO}_2$ ; 11 - отходящие газы перед входом в газоход дуговой печи; 12 - устройство для дожигания горючих газов в газоходе агрегата; 13 - противоточные струи кислорода; 14 - спутные струи кислорода; 15 - датчик расхода кислорода; 16 - регулятор расхода кислорода; 17 - исполнительный механизм; 18 - регулирующий орган; 19 - программный регулятор; 20 - электрические дуги от полых (трубчатых) электродов; 21 - блок системы управления электрическим режимом электроплавки стали и работой полых электродов в своде дуговой печи; 22 - блок системы управления процессом подачи кислорода через водоохлаждаемые кольца с отверстиями; 23 - блок системы управления процессами подачи через полые электроды в металл и шлак металлизованных окатышей, известни, раскислителей, ферросплавов и других сыпучих и мелкораздробленных материалов от бункерной системы дуговой печи; 24 - блок системы управления работой устройством дожигания горючих газов перед газоходом и в самом газоходе с контролем степени их дожигания и пылеосаждения после выхода газов из газоотводящего тракта дуговой сталеплавильной печи; 25 - объединённая компьютерная система управления (КСУ) процессами электроплавки стали дуговой печи

В окислительный период электроплавки стали на металл (2) через полые (трубчатые) графитированные электроды (7) осуществляется непрерывная подача металлизованных окатышей, извести и других сыпучих материалов, причем в это же время из сталеплавильной ванны дуговой печи выделяются горючие газы ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и др.), которые направляются в газоход для отвода газов из дуговой печи (8), перед которым осуществляется дожигание этих газов (11) струями кислорода (10) от устройства (9), а источником выделения отходящих (11) горючих газов является кислород (10) дутья от многосопловой водоохлаждаемой кислородной фурмы (9) и от электрических дуг (20), где расплавляются металлизованные окатыши.

Также в это время осуществляется продувка жидкого расплава кислородом от устройства для дожигания горючих газов перед газоходом с газоотводящим трактом в своде агрегата (9).

Для управления всеми теплотехническими процессами электроплавки стали в дуговой печи используется объединенная компьютерная система (25) управления (КСУ), которая функционально взаимодействует с блоком системы управления электрическим режимом (21) электроплавки стали и работой полых электродов в своде дуговой печи (БУ-1), блоком системы управления процессом подачи кислорода (22) через водоохлаждаемые кольца с отверстиями (БУ-2), блоком системы управления процессами подачи через полые (трубчатые) графитированные электроды (23) в металл и шлак металлизованных окатышей, извести, раскислителей, ферросплавов и других сыпучих материалов и мелкораздробленных материалов от бункерной системы дуговой печи (БУ-3), блоком системы управления работой устройством дожигания горючих газов (24) перед газоходом и в самом газоходе с контролем степени их дожигания и пылеосаждения после выхода газов из газоотводящего тракта дуговой сталеплавильной печи.

При этом расход  $\text{CO}$  в газоходе с газоотводящим трактом определяется по следующей формуле [2]:

$$V_{\text{CO}} = g_{\text{CO}} \cdot \left( \frac{224}{12} \right) \cdot \left( \frac{t_{i+1}}{273} \right), \quad (2)$$

где  $t_{i+1}$  - текущая температура металла в определенный момент времени продувки, К;  $g_{\text{co}}$  – количество  $\text{CO}$  при выходе из зоны продувки, кг/с, рассчитываемое по формуле:

$$g_{CO} = 0,141 \cdot M_{Me} \cdot v_C / 100, \quad (3)$$

где  $M_{Me}$  - масса металла, кг;  $v_c$  - скорость обезуглероживания, % [C]/с.

Скорость обезуглероживания, % [C]/с, вычисляется в соответствии с выражением [3]:

$$v_C = ([C]_{i+1} - [C]_i) / \Delta t, \quad (4)$$

где  $[C]_{i+1}$ ,  $[C]_i$  - концентрации углерода в ( $i+1$ ) и начальный моменты времени продувки, %;  $\Delta t$  - шаг по времени [4].

Текущая масса металла ( $M_{Me}$ , кг) с учетом подачи окатышей, образующегося FeO и скорости обезуглероживания оценивается по формуле:

$$M_{Me} = M_{Me,0} + (v_{ok} Fe_{ok}^{metm} / 100 - 56/72 v_{(FeO)} - v_C M_{Me, нач} / 100) (\tau - \tau_0). \quad (5)$$

где  $Fe_{ok}^{metm}$  - содержание железа металлического в окатышах, %;  $v_{ok}$  - скорость подачи железорудных металлизованных окатышей в дуговую печь печь, кг/мин;  $\tau_0$  - начало окислительного процесса, с;  $\tau$  - окончание окислительного процесса, с;  $v_{(FeO)}$  - общая скорость образования (FeO) в шлаке, кг/мин, определяемая по следующей формуле:

$$v_{(FeO)} = v_{(FeO),1} + v_{(FeO),2} + v_{(FeO),3}. \quad (6)$$

Скорость образования (FeO) в шлаке за счет продувки газообразным кислородом, кг/мин, находится по формуле:

$$v_{(FeO),1} = \frac{72}{16} \rho_{O_2} a_{O_2} x_{O_2} I_{O_2} \eta_{Fe}. \quad (7)$$

где  $\eta_{Fe}$  - доля кислорода, идущая на окисление железа;  $a_{O_2}$  - коэффициент усвоения кислорода ванной (для ДП-150  $a_{O_2} = 0,8$ );  $I_{O_2}$  - интенсивность подвода технического кислорода, м<sup>3</sup>/мин;  $\rho_{O_2}$  - плотность кислорода, равная  $1,42 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>;  $x_{O_2}$  - доля кислорода в дутье (для технического кислорода равна 0,995).

Скорость образования (FeO) в шлаке, кг/мин, за счет окисления углерода:

$$v_{(FeO),2} = -72/12 v_C M_{Me} / 100. \quad (8)$$

При плавке металлизованных окатышей происходит довосстановление оксидов железа, содержащихся в самих окатышах. При ( $[C]_{ок} < [C]_{peak}$ ) часть оксида железа из окатышей переходит в шлак. Скорость поступления оксида железа в шлак, кг/мин, за счет загрузки окатышей можно представить выражением:

$$v_{(FeO),3} = v_{ок} 72/16([O]_{ок} - 16/12[C]_{ок})/100. \quad (9)$$

Коэффициент дожигания  $CO$ , %, оценивался для состава струй в месте встречи их с отходящими газами по выражению [5]:

$$\eta_{CO}^{\text{дож}} = \frac{\{CO_2\}}{\{CO\} + \{CO_2\}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $\{CO\}$ ,  $\{CO_2\}$  - количество  $CO$  и  $CO_2$  в отходящих газах, %.

Установлены зависимости скорости обезуглероживания металла с учетом непрерывной загрузки железорудных металлизованных окатышей в ванну печи от различных технологических параметров [6], таких как расход кислорода на продувку (рис. 2); содержание кислорода в металлической ванне (рис. 3); содержание  $FeO$  в шлаке (рис. 4).

Как следует из данных рис. 2 и 3, скорость обезуглероживания заметно возрастает при увеличении интенсивности продувки кислородом и в то же время, чем больше скорость обезуглероживания, тем меньше остаточное содержание кислорода  $[O]$  в металле по ходу плавки.

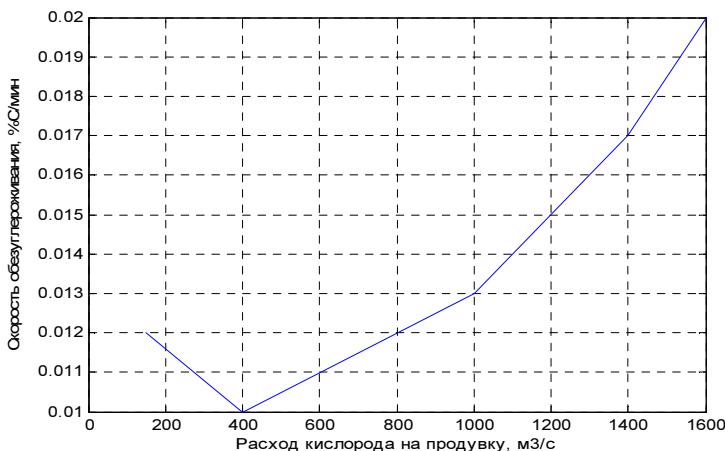


Рис. 2. Зависимость скорости обезуглероживания ванны от расхода кислорода на продувку расплава в печи

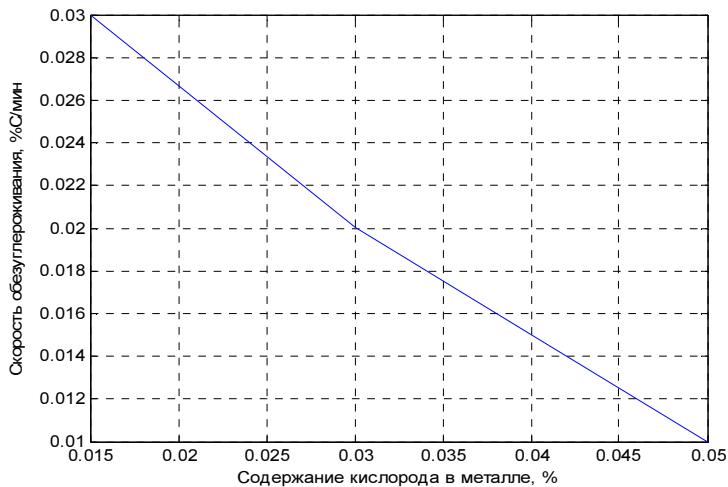


Рис. 3. Зависимость скорости обезуглероживания ванны от содержания кислорода в металлической ванне

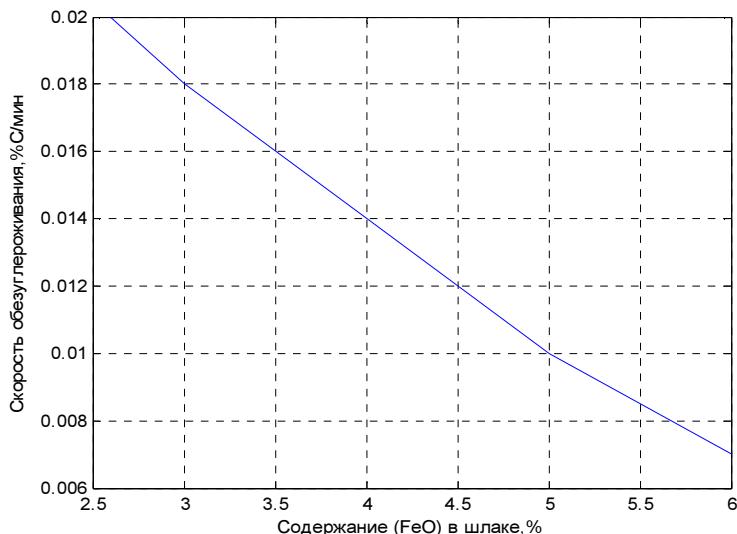


Рис. 4. Зависимость скорости обезуглероживания ванны от количества ( $FeO$ ) в шлаке

Приведенные данные свидетельствуют также о том, что для поддержания высокой скорости обезуглероживания ванны, а также для интенсификации режимов нагрева и плавления окатышей требуется достаточный уровень окисленности металла и шлака, что обеспечивается подачей кислородного дутья (рис. 2) на продувку ванны дуговой печи и воздействием дутья кислородной фурмы на шлак в печи. Высокий уровень перемешивания ванны пузырями  $CO$  за счет увеличения скорости обезуглероживания (рис. 4) способствует снижению содержания ( $FeO$ ) в шлаке. Эти факторы в сочетании с максимальным уровнем теплопитания сталеплавильной ванны способствуют обеспечению более высокого уровня нагрева металла и шлака в ванне дуговой печи.

**Выводы.** Разработан новый метод дожигания горючих газов в дуговой печи при электроплавке железорудного металлизованного сырья, в котором предлагается осуществление локально распределенного дожигания горючих газов в зоне плавления окатышей под электродами в печи с помощью подачи кислорода через водоохлаждаемые кольца, а также рекомендуется осуществление окончательное дожигание горючих газов с помощью устройства дожигания. Трехмерное дожигание горючих газов в рабочем пространстве печи позволяет повысить теплоотдачу от струй дожигания к сталеплавильной ванне печи.

### Библиографический список

1. Стомахин А.Я., Лопатин О.П. Дожигание отходящих газов и донная продувка кислородом в период расплавления в 100-тонной дуговой печи // Сталь. 1999. № 2. С. 27-30.
2. Меркер Э.Э., Черменев Е.А., Сазонов А.В. Исследование эффективности электроплавки металлизированных окатышей при их непрерывной подаче в ванну дуговой печи // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2012. № 5. С. 14-17.
3. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Степанов В.А. Энергосберегающие условия плавления металлизированных окатышей при их подаче через трубчатые электроды в ванну дуговой печи // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: VII Международная науч. - практическая конф. Москва, 2014. С. 427-442.
4. Белковский А.Г., Филиппов С.Ф., Кац Я.Л. Оптимальное содержание углерода в шихте ДСП // Металлург. 2012. №11. С. 31-37.
5. Кочнов М.Ю., Шульц Л.А., Кочнов Ю.М. Повышение эффективности дожигания и охлаждения технологических газов крупнотоннажных дуговых сталеплавильных печей // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2009. №2. С. 49-55.
6. Brooks G., McCellan J., Maschamp D. at al. Optimizing Chemical Energy into Electric Arc Furnaces // SEAISI Quarterly Journal. 2012. №4. P. 17-22.

# **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ МЕТАЛЛИЗОВАННОГО СЫРЬЯ В ДУГОВОЙ ПЕЧИ**

д-р техн. наук, проф. **Меркер Э.Э.**

канд. техн. наук **Черменев Е.А.**

канд. техн. наук, доц. **Малахова О.И.**

аспирант **Степанов В.А.**

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова –,  
филиал НИТУ «МИСИС», г. Старый Оскол*

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу повышения энергоэффективности электроплавки стали в высокомощных дуговых печах с применением в шихте железорудного металлизированного сырья (окатышей или брикетов). Целью работы является рассмотрение особенностей нагрева и плавления металлизированных брикетов, установление возможности снижения пылеуноса и угаря металла из зоны испарения при подаче металлизированного сырья в качестве охладителя в область под электрическими дугами. Разработана математическая модель теплового состояния сталеплавильной ванны с изменяющейся массой металла для условий плавления металлизированного сырья в высокомощной дуговой печи при подаче окатышей и брикетов через полые электроды. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании существующих АСУ ТП получения полупродукта в высокомощных дуговых печах при плавлении металлизированных окатышей и брикетов с целью улучшения технико-экономических показателей электроплавки.

В современных условиях электроплавка металлизированного сырья [1, 2] с применением методов интенсификации технологических процессов [3, 4] превратили дуговую сталеплавильную печь (ДСП) в высокопроизводительный агрегат [3, 5]. При этом высокие значения угары металла в печи связаны с тем, что тепловой поток, падающий от дуг (рис. 1) на поверхность ванны, не может быть усвоен всей массой металла, обладающего довольно низкой теплопроводностью. Температура поверхности металлической ванны под дугой практически в течение всей плавки остается равной температуре кипения металла. В условиях электроплавки металл испаряется, а его пары окисляются и уносятся вместе с дымовыми газами из агрегата [1, 3]. Большая часть металла в рабочем пространстве дуговой печи испаряется с поверхности (рис. 1), ограниченной окружностью, охватывающей электроды, а точнее с поверхности металла [2, 3], контактирующего с электрическими дугами.

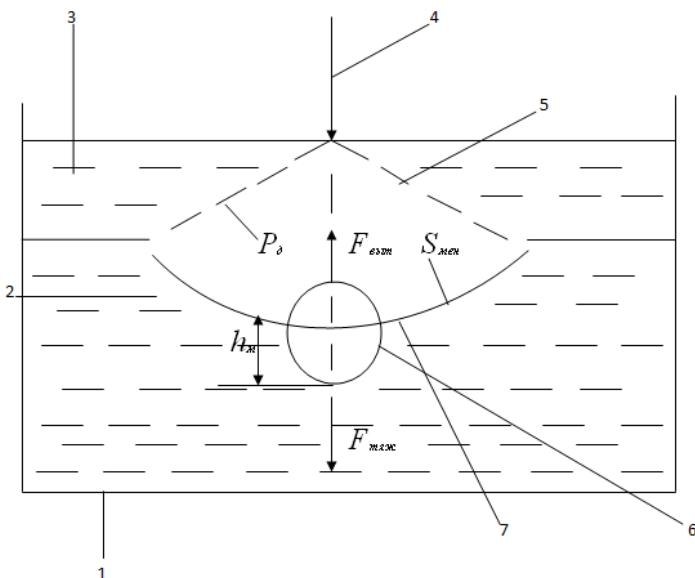


Рис. 1. Схема погружения окатыша в расплав после выхода его из полого электрода в дугу: 1 - подина печи; 2 – поверхность испарения (мениска) металла; 3 – шлак; 4 – позиция полого электрода в печи; 5 – электрическая дуга; 6 – окатыш в жидком металле

Следовательно, для уменьшения угара металла при выплавке стали в дуговой печи с применением железорудного металлизированного сырья необходимо решить технологическую задачу по снижению угара металла испарением в зоне горения дуги.

Целью работы является рассмотрение особенностей нагрева и плавления металлизированных брикетов, установление возможности снижения пылеуноса и угара металла из зоны испарения при подаче металлизированного сырья в качестве охладителя в область под электрическими дугами.

Перспективным решением поставленной задачи является непрерывная подача охладителя (окатышей и/или брикетов) на поверхность ванны внутри диаметра распада электродов, а точнее в зону контакта дуги с поверхностью металла, что позволяет [1, 2, 4] снизить температуру поверхности металла на указанной площади (рис. 1) и уменьшить

испарение металла, т.е. снизить его угар и повысить выход годного металла [3] при электроплавке стали.

Из рассмотрения схемы рис. 1 находим [3] значение выталкивающей силы окатыша в расплаве:

$$F_{\text{выт}} = \pi \cdot h^2 (r_{\text{ок}}^{-1/3} \cdot h) \rho_M \cdot g, \quad (1)$$

где  $h$  – глубина погружения окатыша, м;  $r_{\text{ок}}$  – радиус окатыша, м;  $\rho_M$  – плотность жидкого металла, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Сила тяжести, действующая на окатыш при этом равна:

$$F_{\text{тяж}} = 4/3 \pi r_{\text{ок}}^3 \rho_{\text{ок}} g, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{ок}}$  – плотность окатыша, кг/м<sup>3</sup>.

Приравнивая значения  $F_{\text{выт}}$  и  $F_{\text{тяж}}$  и подставляя численные значения в выражения (1) и (2) находим глубину погружения окатыша в расплав.

Порция железорудного металлизованного сырья подвергается в основном нагреву от дуг излучением, а плотность этого теплового потока [3] можно рассчитать по формуле:

$$q_{\text{изл}} = c \cdot \varepsilon_{\text{Э}} \left[ (T_d/100)^4 - (T_{\text{ок}}/100)^4 \right], \quad (3)$$

где  $c$  – излучательная способность абсолютно черного тела, 5,67 Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>);  $\varepsilon_{\text{Э}}$  – приведенная степень чёрноты системы дуга-окатыш, 0,9;  $T_d$  и  $T_{\text{ок}}$  – температура дуги и поверхности окатыша, соответственно для  $T_d = 6000$  К. Значение  $T_{\text{ок}}$  изменяется в процессе нагрева от начальной до температуры плавления окатышей, а соответствующие потоки излучением  $q_{\text{изл}}$  равны 66,1 МВт/м<sup>2</sup> и 65,6 МВт/м<sup>2</sup>.

Количество тепла дуг на поверхность мениска в зоне плавления металлизованных окатышей:

$$Q_{\text{мен}} = 3 \eta_{\text{кит}} P_d, \text{ кВт}, \quad (4)$$

где  $\eta_{\text{кит}}$  – коэффициент использования тепла (КИТ) дуг;  $P_d = U_d \cdot I_d$  – количество тепла, генерируемого в электрической дуге, кВт, где  $U_d$  – напряжение дуги, В;  $I_d$  – ток дуги, А.

В работах [2, 3] показано, что применение металлизованных окатышей позволяет снизить вынос пыли из под дуг и уменьшить угар металла до 2-3 % при электроплавке стали в дуговой печи.

С учетом охлаждающего эффекта ( $Q_{oxl}$ ) в системе (рис. 1) от подачи ЖМО избыточная энергия, идущая на испарение металла, будет равна:

$$Q_{uz}^3 = Q_{men} - Q_{ycs} - Q_{oxl}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где  $Q_{men} = P_d \omega_b$  – доля тепла от излучения дуг на поверхности менисков, кВт (пропорционально величине телесного угла);  $Q_{oxl} = k \cdot q_{ok}$  – охлаждающий эффект от подачи окатышей, кВт, где  $k$  – доля окатышей которая плавится в поверхностном слое менисков и охлаждает его.

На основе выражения (4) угар металла в ДСП находим:

$$m_{ugar} = Q_{uz}^3 / L_j = (Q_{men} - Q_{ycs} - Q_{oxl}) / L_j, \quad (6)$$

где  $L_j$  – удельная теплота испарения железа, кДж/кг.

Для текущего расхода окатышей ( $V_{ok}$ , кг/с) в ванну ДСП значение  $q_{ok}$  находим:

$$q_{ok} = [c_{ok}(T_{nl} - T_{ok})L_{nl} + c_p(T_M - T_{nl})]V_{ok}, \quad (7)$$

где  $c_{ok}$  и  $c_p$  – средняя удельная теплоёмкость окатыша и получившегося расплава, Дж/кгК;  $T_{ok}$ ,  $T_{nl}$ ,  $T_M$  – начальная температура окатыша, температура его плавления и металла в ванне, К;  $L_{nl}$  – удельная теплота плавления окатыша, Дж/кг.

На основе выражений (3)-(7) расчёта угаря металла в ДСП при подаче железорудного металлизованного сырья в зоны контакта электрических дуг с расплавом в виде был разработан соответствующий алгоритм расчёта [6].

При этом расход окатышей в зону испарения металла под дугами находим из следующего выражения:

$$V_{OK} = \left( \frac{\Delta q_e}{c V_t} - G_0 \right) / \tau_{OK}, \quad (8)$$

где  $G_0$  - начальная масса расплава в ДСП до начала непрерывной загрузки ЖМО, кг;  $c$  - средняя теплоёмкость металла по ходу электроплавки ЖМО, кДж/(кг°C);  $\tau_{OK}$  - время загрузки окатышей в печь, с;  $V_t = dT/dt$  - скорость нагрева металла, °С/мин.

Теплоусвоение ванны рассчитывается [2] по выражению, Вт

$$\Delta q_e = G \cdot \bar{C} \cdot \left( \frac{dT}{d\tau} \right), \quad (9)$$

где  $G$  - текущая масса металла в печи по ходу электроплавки металлизованного сырья, кг.

Энергоэффективность электроплавки металлизованных окатышей в ДСП определяется необходимостью соблюдения соотношения между расходом окатышей и скоростью их плавления. При увеличении расхода металлизированного сырья температура металла в зонах контакта электрических дуг с расплавом снижается, т.е. по мере увеличения охлаждающего эффекта от подачи окатышей уменьшается угар металла. Кроме того, подача металлизированного сырья непосредственно на поверхность высокотемпературной зоны испарения металла под дугами приводит к уменьшению времени их плавления по сравнению с их плавлением вне зоны испарения.

По результатам вычислительного эксперимента получены регрессионные уравнения (10) и (11) для приближённой оценки влияния различных параметров на суммарное время плавления металлизованных окатышей и величину угара при подаче железорудного металлизированного сырья через полые электроды:

$$\begin{aligned} \tau_{\Sigma}^{OK} &= 20,6429 - 0,0020 \cdot \alpha_{\text{эф}} + 1285,214 \cdot r_{OK} - 0,0055 \cdot T_p, \\ R^2 &= 0,68; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} g_{\text{угар}} &= 0,3160 - 0,0453 \cdot V_{OK} + 0,0116 \cdot P_d, \\ R^2 &= 0,99. \end{aligned} \quad (11)$$

При этом величина угаря железа регулируется изменением расхода металлизированного сырья по данным контроля параметров тепловой работы ДСП или изменением расхода электроэнергии на процесс. Таким образом, регулируемый расход окатышей позволяет при текущей скорости плавления снизить угар металла, повысить производительность агрегата [1, 3, 5] и снизить удельный расход электроэнергии на процесс электроплавки стали [2, 4].

### **Выводы**

Рассмотрены особенности нагрева и плавления железорудного металлизированного сырья при его подаче в высокотемпературную зону испарения в ДСП. Установлены условия снижения пылевыделения и угаря металла из зоны испарения при подаче металлизированного сырья в качестве охладителя в зону под дугами.

Показано, что в технологических условиях электроплавки железорудного металлизированного сырья решаются задачи ускорения процессов плавления окатышей с понижением угаря металла на 2-3% по сравнению с технологией электроплавки стали с подачей окатышей вне зоны испарения на шлаковую ванну дуговой печи.

### **Библиографический список**

1. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 320 с.
2. Игнатов И.М., Хайнсон А.В. Математическое моделирование и расчет дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1983. 275 с.
3. Сосонкин О.М. Уменьшение угаря металла при выплавке стали в высокомощных дуговых печах // Сталь. 2008. № 8. С. 40–42.
4. Шишимиров М.В., Крюков А.П., Сосонкин О.М. Исследование возможности снижения угаря металла в ДСП за счет введения охладителя на поверхность ванны // Известия Вузов. Черная металлургия. 2003. № 3. С. 55–59.
5. Черменёв Е.А., Меркер Э.Э. Роль окисленности и обезуглероживания металла при плавлении окатышей в дуговой печи // Изв. ВУЗов «Черная металлургия». 2011. № 9. С. 8–10.
6. Меркер Э.Э., Черменев Е.А., Степанов В.А. Энергосберегающий режим электроплавки металлизированных окатышей в ванне дуговой печи // Электрометаллургия. 2015. № 2. С. 2–7.

# **РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ КАМАЗ**

канд. техн. наук, доц. **Салахов Р.Р.**

студент **Березин В.В.**

студент **Хисматуллин Р.М.**

*Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н.Туполева – КАИ, г. Казань*

**Аннотация.** Разработка системы охлаждения двигателя это сложный процесс, состоящий из множества трудоемких и дорогостоящих этапов. В данной статье предложен способ упростить и удешевить этап экспериментальных исследований. В ходе выполнения проекта создан разборный, универсальный гидравлический («проливочный») стенд для определения характеристик системы охлаждения (перепадов давлений и расходов охлаждающей жидкости на узлах системы охлаждения при штатной компоновке исследуемого двигателя СО при различных оборотах водяной помпы; определения напорных характеристик и характеристик КПД водяной помпы) в любых узлах без запуска двигателя.

Задача системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания (СО) поддержание в требуемых пределах теплового состояния двигателя при различных режимах и условиях работы. Чтобы избежать тепловых перегрузок, все части двигателя, располагаемые вокруг камеры сгорания, должны интенсивно охлаждаться.

Работа выполнена на кафедре ТиЭМ КНИТУ-КАИ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор соглашения - RFMEFI57715X0195), в ходе совместных работ с НТЦ ПАО КАМАЗ, в рамках комплексного проекта по созданию перспективного газового двигателя.

Цель работы: создать универсальный гидравлический («проливочный») стенд для определения характеристик системы охлаждения (перепадов давлений и расходов охлаждающей жидкости на узлах системы охлаждения при штатной компоновке исследуемого двигателя СО при различных оборотах водяной помпы; определения напорных характеристик и характеристик КПД водяной помпы) в любых узлах без запуска двигателя.

## **1. Описание проливочного стенда**

Стенд (рис. 1) спроектирован на платформе ДВС КАМАЗ, при этом стенд после небольших модернизаций, возможно применять к

любому типу двигателей, разработана программа-методика проведения испытаний на стенде, проведены экспериментальные исследования и выполнен анализ гидравлических характеристик узлов и рубашки системы охлаждения.

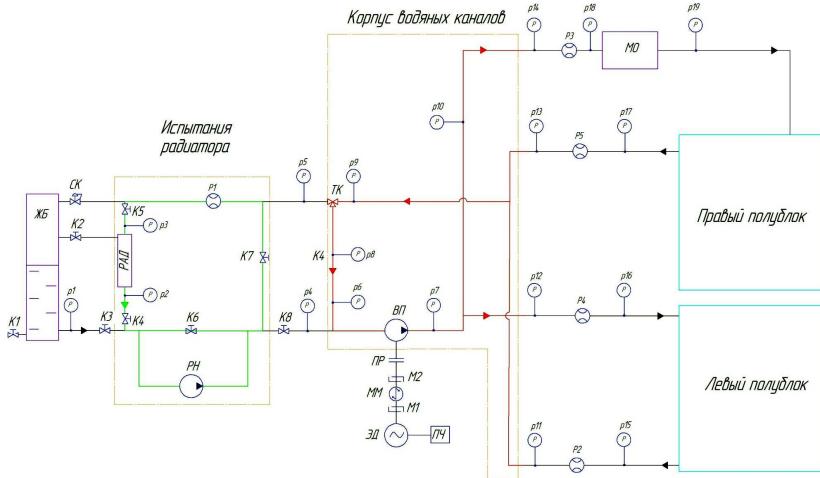


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема стенда:  
 К1-К8 – шаровый кран; ЖБ – жидкостный бак; СК – смесительный клапан;  
 Р1-Р19 – преобразователь (датчик) давления; РАД – жидкостный радиатор;  
 РН – регулируемый консольный насос; ТК – термостатная коробка; ВП –  
 водяная помпа; ПР – привод ременной; М1-М2 – упругая муфта; ММ – датчик  
 момента; ЭД – электродвигатель; ПЧ – преобразователь частоты; МО – масло-  
 охладитель; Р1-Р5 – электромагнитный расходомер

Для упрощения проектирования и изготовления стенд разбит на три участка-платформы:

1. Платформа А, состоящая из бака, радиатора, консольного насоса, расходомера, смесительного клапана и соединительной нержавеющей арматуры.

2. Платформа Б, состоящая из электродвигателя, моментометра, корпуса водяных каналов КАМАЗ, водяной помпы и расходомеров.

3. Платформа В представляет собой газовый двигатель КАМАЗ в сборе.

Стенд является полностью разборным и передвижным. В проектируемой конструкции была применена возможность испытаний с раз-

личными компоновками и конфигурациями оборудования. Проливочный стенд имеет возможность:

- определение перепадов давлений, расходов охлаждающей жидкости на узлах системы охлаждения на различных оборотах водяной помпы;
- определение напорных характеристик и КПД водяной помпы;
- исследование кавитации.

Надо отметить, что простота конструкции стенда делает его легким в обслуживании, эксплуатации и ремонте.

Конструкторская модель проектируемого стенда для гидравлических испытаний системы охлаждения ДВС КАМАЗ представлена на рис. 2.

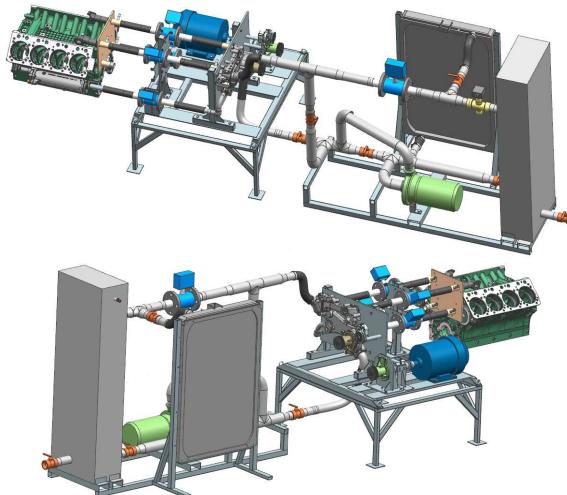


Рис. 2. Общий 3D вид проливочного стенда

Для управления стендом на графическом языке программирования Labview была разработана оригинальная программа управления, которая позволяет задавать:

– «Обороты двигателя (об/мин)»: задаются обороты электродвигателя, приводящего в движение помпу с помощью ременного привода.

Измерять:

– «Момент (Н·м)»: индикация текущего крутящего момента на валу электродвигателя.

– «Мощность (Вт)»: индикация мощности, затрачиваемой помпой системы охлаждения.

## 2. Экспериментальные исследования

В дальнейшем проведены испытания, и верифицированы данные, полученные из НТЦ КАМАЗ.

Определялись следующие характеристики системы охлаждения:

1. Определение перепадов давлений, расходов охлаждающей жидкости на узлах системы охлаждения при штатной компоновке исследуемого двигателя СО при различных оборотах водяной помпы:

Гидравлическое сопротивление большого и малого круга системы охлаждения при 100...4270 об/мин по результатам испытаний на пропливочном стенде представлено на рис. 3.

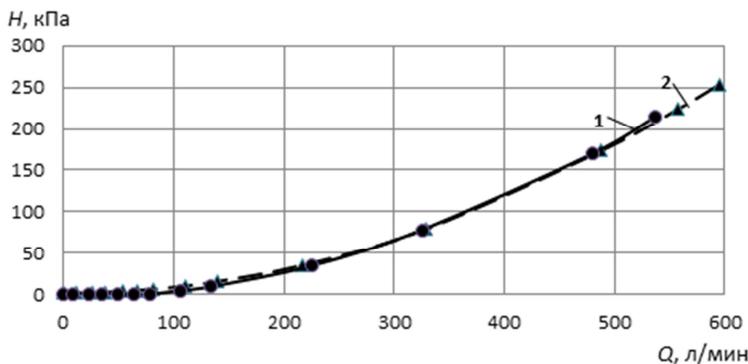


Рис. 3. Гидравлическое сопротивление системы охлаждения:  
1 – сопротивление большого круга; 2 – сопротивление малого круга

Из анализа графика видно, что гидравлическое сопротивление системы, что для режима малого круга, что для режима большого (включая радиатор), практически не отличается. Связано это с высоким гидравлическим сопротивлением термостатной коробки в положении «малый круг».

2. Определение напорных характеристик и характеристик КПД водяной помпы:

Для штатного водяного насоса представлены напорные характеристики (рис. 4) и характеристики КПД (рис. 5) при 2400, 3500 и 4000 об/мин.

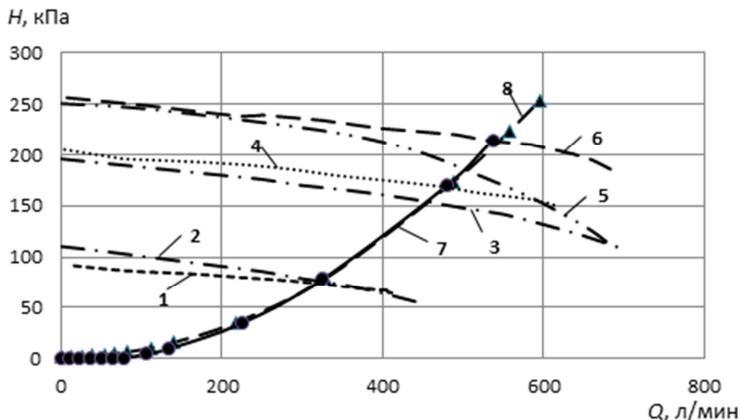


Рис. 4. Напорная характеристика водяного насоса:

1 – испытания при 2400 об/мин; 2 – паспортные данные КАМАЗ при 2400 об/мин; 3 – паспортные данные КАМАЗ при 3500 об/мин; 4 – испытания при 3500 об/мин; 5 – испытания при 4000 об/мин на стенде НТЦ КАМАЗ; 6 – испытания при 4000 об/мин; 7 - гидравлическое сопротивление большого круга системы охлаждения; 8 - гидравлическое сопротивление малого круга системы охлаждения.

Видно, что напорные характеристики, полученные на новом стенде, несколько выше при 3500 об/мин (кривые 3 и 4), и чуть ниже при 2400 об/мин (кривые 1 и 2). Отличие паспортных данных (рис. 4) с результатами эксперимента предположительно связано с тем, что конструкция насоса менялась в ходе модернизации двигателя.

При расходах охлаждающей жидкости 500-600 л/мин разница показаний, по сравнению с данными полученными на проливочном стенде, составляет почти 50 кПа (25% от максимального напора). Напор, создаваемый помпой на стенде НТЦ КАМАЗ (кривая 5) при 4000 об/мин резко падает с увеличением расхода, чего не наблюдается при испытаниях на новом стенде (кривая 6), вызвано это неправильным расположением датчика давления. Штатная водяная помпа в диапазоне 2400 – 4000 об/мин обеспечивает расход охлаждающей жидкости в интервале от 320 до 540 л/мин при давлении, преодолевающем гидравлическое сопротивление рубашки охлаждения.

Анализ эффективности водяного насоса (рис. 5) показал, что его КПД (кривая 1) при 3500 об/мин вырос (кривая 3).

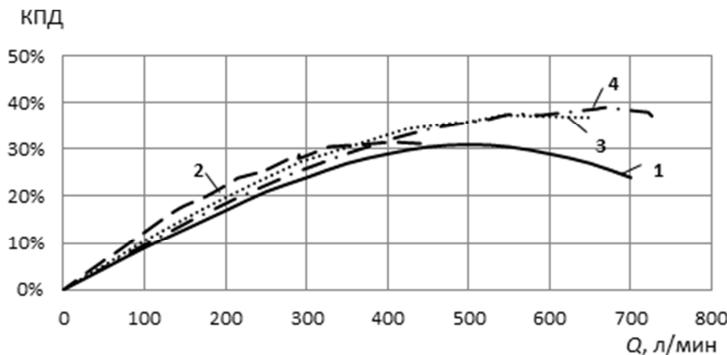


Рис. 5. Характеристика КПД водяного насоса:

1 – паспортные данные КАМАЗ при 3500; 2 – испытания при 2400 об/мин;  
3 – испытания при 3500 об/мин; 4 – испытания при 4000 об/мин.

**Заключение.** В результате проделанной работы был создан универсальный стенд для определения гидравлических характеристик в любых узлах системы охлаждения без запуска двигателя. Проведены испытания и верификация экспериментальных, полученных на стенде с данными полученными из НТЦ КАМАЗ, которые показали высокую сходимость. Целесообразно использовать данный стенд при разработке и исследованиях системы охлаждения ДВС, так как это упрощает и удешевляет проводимые испытания.

#### Библиографический список

1. **Петриченко Р.М., Петриченко М.Р.** Конвективный теплообмен в поршневых машинах: учеб. пособие. М.: Изд. МИСИ и БТИСМ, 1979. 231 с.
2. **Петриченко Р.М.** Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. М.: Изд. МИСИ и БТИСМ, 1975. 224 с.
3. Жидкостное охлаждение автомобильных двигателей: учеб. пособие / А.Л. Кригер, М.Е. Дискин, А.Л. Новенников, В.И. Пикус. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.
4. **Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов Л.И.** Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. М.: Изд. МИСИ и БТИСМ, 1979. 222 с.
5. **Розенблит Г.Б.** Теплопередача в дизелях: учеб. пособие. М.: Изд. Машиностроение, 1970. 448 с.
6. **Чернышев Г.Д., Хачтян А.С., Пикус В.И.** Рабочий процесс и теплонапряженность автомобильных дизелей: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.

# **КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

д-р техн. наук, проф. **Севостьянов В.С.**

аспирант **Горягин П.Ю.**

канд. техн. наук, доц. **Севостьянов М.В.**

аспирант **Ермилов Р.А.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** В данной статье представлены специфические физико-механические свойства техногенных полимерных материалов. Выявлены особенности их переработки. Предложены пути конструктивно-технологического совершенствования измельчителей, а именно создание агрегатов на основе иглофрезерных рабочих органов, обеспечивающих избирательное комплексное воздействие на обрабатываемые материалы консольными концами своих стержневых элементов и создание энергоэффективных механизмов разрушения.

В настоящее время известны различные способы утилизации техногенных полимерных материалов (ТПМ), среди которых можно назвать переработку биоразлагаемых полимеров, термопереработку, химическую переработку и вторичное использование полимерных материалов. Для вторичного использования утилизированных полимерных отходов достаточно стимулов: экологический аспект, спрос потребителей, требования законодательства и низкая стоимость [1].

Вторичная переработка (рециклинг) бывших в употреблении полимеров является важной задачей. Хотя содержание изделий ТПМ в отходах относительно невелико (около 7-8 % по весу), низкий удельный вес делает значимым вопрос утилизации этих отходов (около 18-20 % по объему) [2]. Благодаря высокой стойкости к воздействию окружающей среды данные материалы сохраняются в естественных условиях в течение длительного времени. На основе лабораторных экспериментов, удалось установить, что для полного разложения пластиковой бутылки под действием ультрафиолета и перепадов температур, понадобится от ста до пятисот лет. Некоторые экологи указывают также срок до 1000-и лет [3]. При этом производство продукции из полимерных материалов составляет более трехсот миллионов тонн ежегодно и продолжает расти. В этой связи можно утверждать, что ТПМ является одним из самых опасных загрязнителей окружающей среды.

Полимерные материалы отличаются широким диапазоном физико-механических характеристик, которые сильно зависят от их структуры. Кроме этого, большое влияние на механические свойства вещества могут оказывать различные внешние факторы в процессе переработки [1-3]. К ним относятся: термическое воздействие; частота, длительность или скорость нагружения; вид напряженного состояния; давление; характер окружающей среды и др. Особенностью физико-механических свойств полимерных материалов является их относительно высокая прочность при весьма малой жесткости (по сравнению с металлами) [4].

В связи с этим, целью данной работы является анализ конструктивно-технологических особенностей агрегатов для измельчения полимерных материалов и разработка энергоэффективного оборудования для переработки ТПМ.

Полимеры принято делить на твердые, модуль упругости которых равен  $E=1..10$  ГПа (волокна, пленки, пластмассы), и мягкие высокоэластичные вещества, модуль упругости которых составляет  $E=1..10$  МПа (резины). Закономерности и механизм разрушения тех и других различны [5]. В некоторых случаях, для увеличения производительности измельчителей необходимо предварительно подготавливать полимерные материалы перед стадией дробления. Вид подготовительной технологической операции зависит от физико-механических характеристик отходов, от их количества, геометрических размеров и др. Например, материалы, обладающие малой насыпной плотностью, перед измельчением необходимо предварительно уплотнить [6].

При разработке энергоэффективного оборудования для измельчения ТПМ необходимо учитывать их специфические физико-механические свойства. Новым направлением конструктивно-технологического совершенствования измельчителей может быть создание многофункциональных технологических агрегатов на основе иглофрезерных рабочих органов, обеспечивающих избирательное комплексное воздействие на обрабатываемые материалы консольными концами своих стержневых элементов и создание энергоэффективных механизмов разрушения [7-8]. Из всего многообразия известных в технике наборов стержневых элементов, образующих иглофрезы различных конструкций, можно выделить наиболее распространенные: дисковые, цилиндрические, плоские, пальцевые и др. [9].

Задача по интенсификации процесса измельчения и расширению технологических возможностей реализуется в устройстве для измельче-

ния техногенных материалов с иглофрезерными рабочими органами [10] (рис. 1, 2).

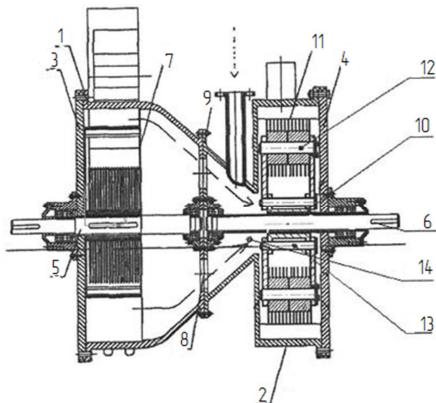


Рис. 1. Установка для измельчения техногенных материалов: 1, 2 – цилиндрические камеры; 3, 4 – крышка; 5, 6 – вал; 7 – перегородка первой камеры; 8 – переходное отверстие; 9 – межкамерная перегородка; 10 – ступица; 11 – щетка; 12 – ось; 13 – шплинт; 14 – входные отверстия второй камеры

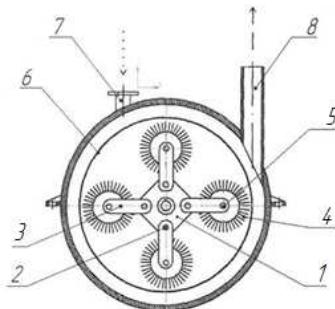


Рис. 2. Камера тонкого помола: 1 – ступица; 2, 5 – ось; 3 – серьга; 4 – щетка; 6 – барабан; 7 – патрубок добавок; 8 – выгрузочный патрубок

Установка содержит корпус, состоящий из двух горизонтально размещенных друг за другом камер: грубого помола 1 и тонкого помола 2. Согласно изобретению, иглофрезерные рабочие органы камеры тонкого помола выполнены из набора стержневых элементов, собранных в пакеты и жестко закрепленных одним концом на держателе. Такой ротор имеет развитую рабочую поверхность, которая обеспечивает эффективное измельчение материала, расширяет технологические возможности агрегата.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработка устройств с иглофрезерными рабочими органами является инновационным направлением конструктивно-технологического совершенствования измельчителей, учитывающее специфические физико-механические свойства ТПМ. Использование иглофрезерных рабочих органов повышает энергоэффективность измельчителей, за счет уве-

личения числа единичных контактов рабочего органа и материала. Кроме того, одновременно возникают ударные, срезающие, скальвавшие и разрывающие напряжения в контактных зонах, что не только интенсифицирует процесс измельчения полимерных материалов, но и обеспечивает одноразмерность получаемого продукта.

### **Библиографический список**

1. Анализ существующих способов утилизации и переработки отходов полимеров / Э.В. Гоголь, И.Х. Мингазетдинов, Г.И. Гумерова и др. // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 10. С.163–168.
2. **Свергузова С.В.** Промышленная экология как непременное условие стабильного развития: Уч. пос.. Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. 155 с.
3. Переработка использованной полиэтиленовой тары / В.С. Севостьянов, О.А. Носов, Г.Р. Варданян, О.Л. Бережной // Экология: образование, наука, промышленность и здоровье: Сб. докл. V междунар научно-практической конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. С. 152–156.
4. **Быстров Г.А., Гальперин В.М., Титов Б.П.** Обезвреживание и утилизация отходов в производстве пластмасс. Л.: Химия, 1982. 264 с.
5. Техника и технология измельчения вторичного полимерного сырья / В.С. Севостьянов, О.А. Носов, О.Л. Бережной, Г.Р. Варданян // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды: Сб. докл. международной научно-практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. С. 50–54.
6. Энергосберегающие технологические комплексы и агрегаты для утилизации техногенных материалов / В.С. Севостьянов, С.А. Михайличенко, М.В. Севостьянов и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2007. № 1. С. 85–90.
7. **Севостьянов В.С., Сиваченко Т.Л.** Иглофрезерные измельчители, их технологические возможности и пути развития // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. № 1. С. 69–78.
8. **Севостьянов В.С., Сиваченко Т.Л., Михайличенко С.А.** Технологические аппараты с иглофрезерными рабочими органами для комплексной переработки композиционных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 50–57.
9. Технологические комплексы и оборудование для переработки и утилизации техногенных материалов / В.С. Севостьянов, В.И. Уральский, М.В. Севостьянов, О.А. Носов. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. 321 с.
10. Пат. 2540549 Рос. Федерация, МПК B02C 18/00. Установка для измельчения волокнистых материалов / Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Севостьянов М.В. и др.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2013141378/13; заявл. 09.09.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4. 11 с.

# **РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ**

д-р техн. наук, проф. Севостьянов В.С.<sup>1</sup>

аспирант Ермилов Р.А.<sup>1</sup>

аспирант Горягин П.Ю.<sup>1</sup>

ведущий инженер Оболонский В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический

университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород

<sup>2</sup>ООО «ТК «Экотранс», г. Белгород

**Аннотация.** Представлен технологический комплекс для производства композиционных смесей из техногенных полимерных материалов. Рассматривается разработка ресурсосберегающей технологии и специального оборудования для комплексной переработки техногенных полимерных материалов с различными физико-механическими характеристиками. Построены функции дисперсного состава измельченных полимерных материалов при различных условиях и установлены рациональные режимы работы роторно-центробежного агрегата. Для повышения эффективности и расширения технологических возможностей роторно-центробежного агрегата разработана патентно-защищенная конструкция сепаратора комбинированного действия с постадийным выделением материала различных фракций.

Необходимость проведения исследований по разработке технологических комплексов для переработки полимерных отходов с использованием научно-методологических основ комплексной утилизации техногенных материалов обусловлена необходимостью минимизации антропогенного воздействия объектов промышленности на окружающую среду.

Целью данной работы является разработка технологического комплекса для переработки полимерных отходов и определение его оптимальных режимов работы для минимизации антропогенного воздействия объектов промышленности на окружающую среду.

В Белгородской области на ООО «ТК «Экотранс» организован сбор, сортировка, переработка и утилизация техногенных материалов (ТМ). Одной из технологических задач является снижение энергозатрат процесса и улучшение качества измельчения классифицированных ТМ, в частности, ПЭТ бутылок [1, 2]. Для решения этой важной научно-производственной задачи рассмотрим разработанный технологический комплекс производства композиционных смесей из техногенных полимерных материалов (рис. 1) [3].

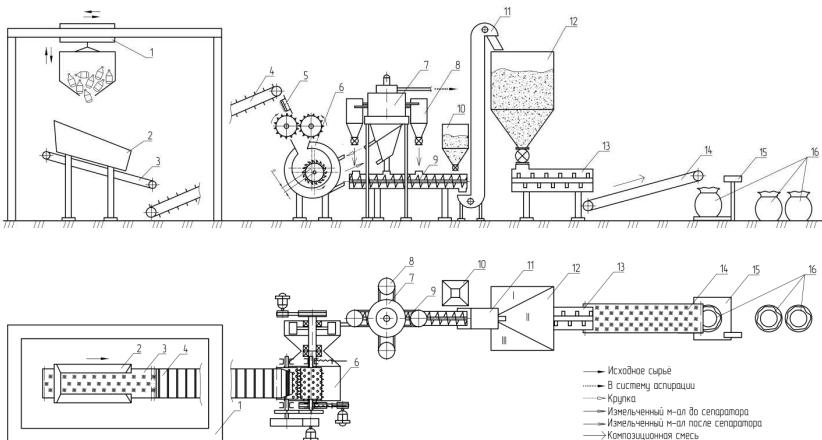


Рис. 1. Технологический комплекс производства композиционных смесей из техногенных полимерных материалов:

- 1 – тельфер; 2 – приёмный лоток; 3, 14 – ленточный конвейер; 4 – пластиначатый питатель; 5 – магнит; 6 – роторно-центробежный агрегат; 7 – сепаратор; 8 – циклон; 9 – шнековый питатель; 10 – бункер дополнительных компонентов; 11 – элеватор; 12 – бункер компонентов композиционных смесей; 13 – смеситель; 15 – весы; 16 – бигбэг

Технологический комплекс работает следующим образом. Исходный материал с помощью тельфера 1 подается на приемный лоток 2. В нижней части лотка установлен ленточный конвейер 3. С помощью ленточного конвейера и пластиначатого питателя 4 материал подается в роторно-центробежный агрегат (РЦА) 6. Для улавливания металлических включений перед РЦА установлен наклонный лоток с магнитом. В верхней части РЦА установлены шипованные валки, для подготовки ПЭТ бутылок к измельчению, спрессовывая и проделывая в них отверстия для выхода воздуха. В первой камере грубого помола, материал размалывается дисковыми фрезами и, под действием центробежных сил, перемещается в камеру тонкого помола. Там полимерный материал измельчается иглофрезами до порошкообразного состояния. После РЦА измельченный материал с помощью пневмотранспортировки попадает в сепаратор 7. Под действием пневмопотоков шихта разделяется на фракции. Недоизмельченный материал осаждается в нижнем конусе и возвращается на домол во вторую камеру РЦА. Пылевидная фракция перемещается через верхнее отверстие в систему аспирации.

Кондиционный материал, осаждаясь в циклонах 8, поступает в шнековый питатель 9. С помощью питателя 9 и элеватора 11, сырье попадает в бункер компонентов композиционных смесей 12. Бункер оснащен перегородками, разделяющими его на три зоны для раздельного накопления и хранения компонентов. Перед «Норией» установлен бункер дополнительных компонентов композиционных смесей 10. Из бункера добавок 10, по вертикальному элеватору, компоненты транспортируются в отсеки бункера 12. В нижней части каждого отсека установлены ячейковые питатели. Из бункера 12 компоненты попадают в лопастной смеситель 13, где осуществляется их смешивание. После чего композиционная смесь по ленточному транспортеру 14 подается на упаковку и взвешивание [4].

В данной работе нами исследовалось изменение гранулометрического состава материала при его измельчении. Это обусловлено необходимостью использования сепаратора, обеспечивающего рециркуляцию материальных потоков и их разделение на отдельные фракции.

Для исследования процесса тонкого измельчения техногенных полимерных материалов во второй камере РЦА проводилась серия экспериментов. Молотковая дробилка в поисковых экспериментах выступает в качестве аналога второй камеры РЦА с иглофрезерным ротором.[5]. Дробленый материал взвешивался и делился на порции массой 100 гр. Далее проводилась серия экспериментов по измельчению ПЭТ бутылок молотковой дробилкой. В дробилку была установлена сетка с диаметром отверстий 2 мм. Измельчение материала производилось за время 1, 4 и 7 минут. Для определения фракционного состава материала, после каждого эксперимента измельченный материал, выпавший в мешок, и материал, который остался в камере дробилки, собирались отдельно, просеивались на ситах с разным диаметром отверстий и взвешивались (рис. 2-4). При проведении экспериментов использовались сита с диаметром отверстий равным 2, 4, 7 и 10 мм.

По результатам экспериментов построены функции дисперсного состава измельченного материала для различного времени измельчения (рис. 5). Из графиков видно, что при увеличении времени измельчения материала, уменьшается размер фракций материала.

В ходе экспериментов было установлено, что измельченный материал, размер которого превышает диаметр отверстий сетки, ввиду своих упругопластических свойств, проходит через сетку. При этом часть тонкоизмельченного в дробилке продукта улавливается в аспирационной системе.



Рис. 2. Материал с размером частиц  $4 \text{ mm} \leq d < 7 \text{ mm}$



Рис. 3. Материал с размером частиц  $2 \text{ mm} \leq d < 4 \text{ mm}$



Рис. 4. Материал с размером частиц  $d < 2 \text{ mm}$

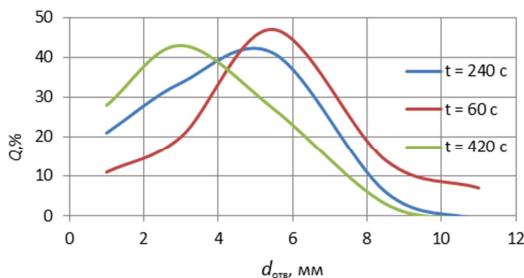


Рис. 5. Дифференциальные кривые распределения частиц по размерам.

Для увеличения эффективности процесса измельчения и возврата на доизмельчение частиц, проходящих через сетку молотковой дробилки, необходимо использовать сепаратор совместно с РЦА.

Конструкция используемого сепаратора комбинированного действия с постадийным выделением материала различных фракций (рис. 6) состоит из двух ступеней. Первая ступень служит для выделения грубого продукта, вторая – тонкого продукта [6].

Сепаратор работает следующим образом. Исходный газоматериальный поток поступает тангенциально в нижний усечённый конус 6 по загрузочному патрубку 8. Поднимаясь по спирали по восходящей линии, наиболее крупные частицы смеси прижимаются под действием центробежной силы к внутренней поверхности усеченных конусов 5 и 6. Частицы теряют свою скорость, ввиду увеличивающегося сечения классификатора и выпадают в желобообразный канал.

Разгрузка продукта осуществляется через выгрузочный патрубок 7. Степень классификации смеси может регулироваться за счет изменения давления сжатого воздуха. Для обеспечения свободного истечения частиц через выгрузочный патрубок 7 угол его наклона к вертикальной оси должен совпадать с углом естественного откоса материала. Попадая в верхнюю часть корпуса классификатора, тонкодисперсные частицы по тангенциальному встроенным патрубкам поступают в выносные элементы 14, где газоматериальный поток совершает вращательные движения в кольцевом канале. Основная масса частиц, попавших в центральную камеру, переходит из нее вместе с газоматериальным потоком в часть верхней камеры 1. Откуда наиболее мелкие частицы под действием избыточного давления и дополнительного разрежения, создаваемого электроприводом сепаратора 3, попадают в пылеуловитель 9. Затем в цилиндрические сетчатые каркасы 12 и матерчатые рукава 13. Установленная в верхней части пылеуловителя 9 перегородка с отверстиями 11, выполненная из газонепроницаемого материала, препятствует попаданию большого числа частиц материала в верхнюю часть классификатора. Это, в свою очередь, препятствует их попаданию в атмосферу, а отверстия, выполненные на ней, служат для прохождения газоматериального потока и создания дополнительного разрежения электроприводом ротора 3. Уловленные в пылеуловителе 9 частицы выгружаются из него через выгрузочный патрубок 10.

Использование в технологическом процессе сепаратора совместно с РЦА позволяет отделить мелкие частицы от общей массы измельча-

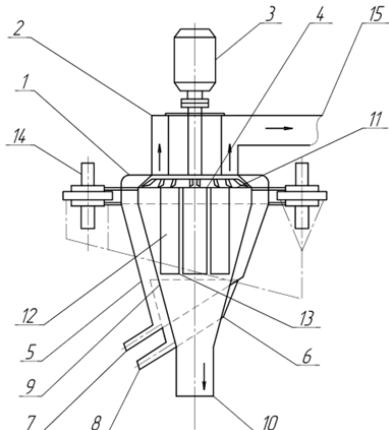


Рис. 6. Общий вид сепаратора:  
 1 – верхняя часть корпуса; 2 – улитка;  
 3 – электропривод сепаратора;  
 4 – крыльчатка с лопастями;  
 5, 6 – верхний и нижний усечённые конусы, соответственно; 7, 8 – выгрузочный и загрузочный патрубки, соответственно; 9 – пылеуловитель;  
 10 – центральный выгрузочный патрубок; 11 – перегородка с отверстиями; 12 – цилиндрические сетчатые каркасы; 13 – матерчатые рукава;  
 14 – выносные элементы; 15 – трубопровод очищенного газа

емого материала и предотвратить переизмельчение и снижение производительности РЦА.

Таким образом нами разработана ресурсосберегающая технология и специальное оборудование для комплексной переработки техногенных полимерных материалов с различными физико-механическими характеристиками. Разработана конструкция для комбинированного измельчения. По результатам исследований режимов работы РЦА построены функции дисперсного состава измельченных полимерных материалов при различных условиях, которые позволили установить рациональные режимы работы РЦА и его эффективность при различном времени измельчения. Для повышения эффективности РЦА разработана патентно-защищенная конструкция сепаратора комбинированного действия с постадийным выделением материала различных фракций.

Применение РЦА в комплексе с сепаратором по замкнутому циклу позволяет расширить технологические возможности:

- регулирование аэродинамических параметров сепаратора с возможностью использования полидисперсных материалов с различной гранулометрией и плотностью;
- возможность воздушного охлаждения измельченных полимерных материалов и предотвращение их самопроизвольного термопластического агрегирования за счёт снижения их адгезионной способности.

### **Библиографический список**

1. Арашкевич Д.А. Вторичная переработка отходов пластмасс и специальные роторные дробилки // Пластические массы. 2003. № 3. С. 5–13.
2. Иванова О. А., Реховская Е.О. Утилизация и переработка пластиковых бутылок // Молодой ученый. 2015. №21. С. 54–56.
3. Технологические комплексы и оборудование для переработки и утилизации техногенных материалов: учебное пособие / В.С. Севостьянов, В.И. Уральский, М.В. Севостьянов, О.А. Носов. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 321 с.
4. Супрун Л.В., Романенко С.В., Цыганкова Т.С. Анализ и решение проблемы утилизации и вторичной переработки полизтилентерефталат (ПЭТ) отходов // Вестник науки Сибири. 2012. № 4 (5). С. 107–112.
5. Севостьянов М.В. Ресурсосберегающее оборудование для комплексной переработки техногенных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 140–145.
6. Пат. RU 2264268 C1 Рос. Федерация, МПК B 07 B 7/086. Вихреакустический классификатор / А. М. Гридчин , В. С. Севостьянов, В. С. Лесовик и др; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В. Г. Шухова № 2004123996/03; заявл. 5.08.2004; опубл. 20.11.2005, Бюл. № 32. 11 с.

# АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СМЕСИТЕЛЕЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ

канд. техн. наук, доц. **Севостьянов М.В.**

д-р техн. наук, проф. **Севостьянов В.С.**

аспирант **Мартаков И.Г.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена классификация смесителей циркуляционного действия. Проведен анализ их конструкционных особенностей и недостатков. Выявлена необходимость создания комбинированных смесительных аппаратов. Предложена конструкция комбинированного смесительного аппарата.

Одним из важнейших технологических этапов большинства производств является процесс перемешивания различных сыпучих и вязких компонентов. Это характерно для различных отраслей промышленности – строительных материалов пищевой, металлургической, фармацевтической, агрехимии и сельского хозяйства, химической и др. Основной целью процесса смешивания является получение однородной смеси из отдельных компонентов.

При осуществлении процесса смешивания сыпучих материалов, различающихся плотностью или размерами частиц, негативное влияние на качество готовой смеси оказывает ее сегрегация, разделение частиц по их размерам или плотности.

Одним из эффективных методов противодействия этому процессу является упорядоченная загрузка компонентов смеси и ее гомогенизация в циркуляционном смесителе [1, 2].

При этом сегрегация может не препятствовать, а способствовать получению высококачественных смесей. Это связано с тем, что в циркуляционных смесителях имеет место упорядоченный характер движения компонентов (движение потока материала происходит по замкнутому контуру различной сложности) и зоны сегрегированного состояния смеси легко прогнозируемы.

Целью данного работы является анализ конструкций смесителей циркуляционного действия и разработка конструкции смесителя комбинированного действия.

Среди смесителей циркуляционного типа наибольшее распространение в промышленности получили планетарно - шnekовые, ло-

пастные, волчковые центробежные и шнековые с центральной циркуляционной трубой. Они рекомендуются для смешивания легкоподвижных несвязанных и связно-сыпучих материалов, а также для смешивания сыпучих материалов с небольшим количеством жидкости.

Смеситель с планетарно-шнековой мешалкой [3] состоит из следующих основных узлов (рис. 1): конического корпуса 1; коробки передач 2; шнеков 3; привода 4.

Недостатками таких смесителей являются сложность конструкции, обусловленная большим количеством, водил, и наличие застойной зоны в центральных частях смесителя.

Лопастные смесители [4] состоят из следующих основных узлов (рис. 2): вертикального цилиндрического корпуса 1; разгрузочного устройства 2; рабочего органа 3; привода 4.

Недостатками таких смесителей являются повышенные энергозатраты и засточные зоны, зависящие от типа рабочего органа.

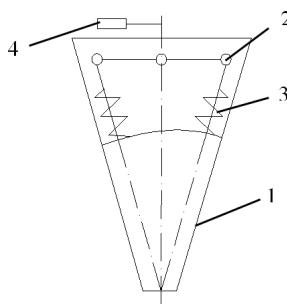


Рис. 1. Смеситель планетарно-шнековый:  
1 – конический корпус; 2 – коробка передач; 3 – шнеки; 4 – привод

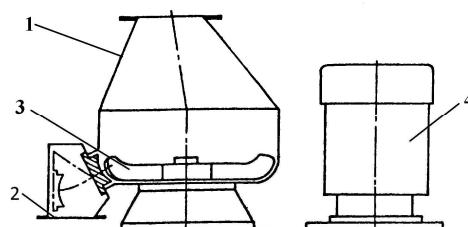


Рис. 2. Смеситель лопастной:  
1 – вертикальный цилиндрический корпус; 2 – разгрузочное устройство; 3 – рабочий орган; 4 – привод

Волчковый центробежный смеситель [5] состоит из следующих основных узлов (рис. 3): цилиндроконического корпуса 1; приводного вертикального вала 2 с ротором 3; полого усеченного конуса 4 и радиальной мешалки 5; лопасти 6; привода 7.

Недостатками таких смесителей являются повышенные энергозатраты и сложность конструкции ротора с лопастями.

Смеситель с центральной циркуляционной трубой [6] состоит из следующих основных узлов (рис.4): вертикального корпуса 1; с установленной в нём вертикальной циркуляционной трубой 2; трубы ввода газа 3; сопла 4; разгрузочного устройства 5; загрузочного патрубка 6 и воздушного фильтра 7.

Недостатками таких смесителей являются сложность конструкции, обусловленная наличием системы подачи и фильтрации газа, и застойные зоны в боковых частях смесителя.

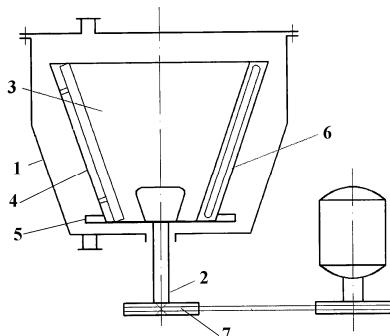


Рис. 3. Смеситель волчковый центробежный: 1 – цилиндроконический корпус; 2 – приводной вертикальный вал; 3 – ротор; 4 – полый усечённый конус; 5 – радиальная мешалка; 6 – лопасти; 7 – привод.

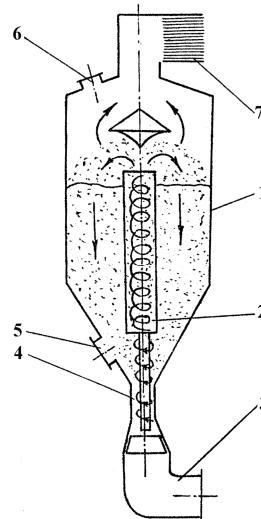


Рис. 4. Смеситель с центральной циркуляционной трубой:  
1 – вертикальный корпус; 2 – вертикальная циркуляционная труба; 3 – труба ввода газа; 4 – сопло; 5 – разгрузочное устройство; 6 – загрузочный патрубок; 7 – воздушный фильтр

Анализ существующих конструкций показал, что рабочим органом смесителей, создающих циркуляционное движение, являются мешалки, выполненные в виде шнеков, радиальных лопастей, пропеллеров или дисков.

Реализация процесса смешения с использованием этих конструкций не гарантирует получение качественной смеси без обеспечения определённых режимов работы.

Решением данной проблемы является создание комбинированных смесительных установок, которые позволяют сочетать различные режимы работы смесителей с различными видами рабочих органов. И обеспечивают возможность создания различных турбулентно-ламинарных потоков и получения качественных гомогенизированных смесей с различными физико-механическими характеристиками входящих компонентов.

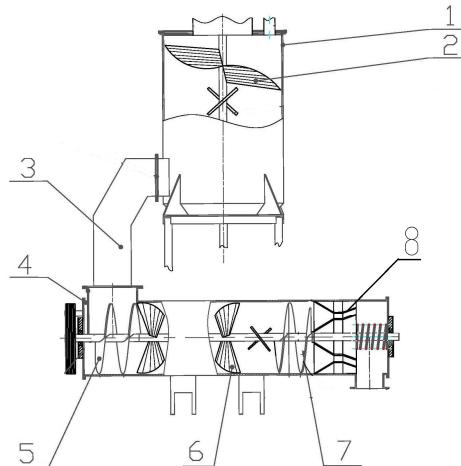


Рис. 5. Технологический модуль смешения:

1 – вертикальный смеситель; 2 – односторонние двухзаходные винтовые лопасти; 3 – патрубок; 4 – горизонтальный смеситель; 5, 7 – винтовые лопасти; 6 – противоположно направленные двухзаходные винтовые лопасти; 8 – блок для механического предварительного уплотнения смеси

В разработанном технологическом модуле [7] осуществляется комбинированное смешение материалов (рис. 5). Реализации смешения техногенных волокнистых материалов с различными физико-механическими характеристиками осуществляется за счет постадийного высокоскоростного смешения смеси с организацией внутреннего рецикла на каждой стадии их смешения, и последовательного увеличения её плотности посредством механического предуплотнения и микрограммулирования. За счет последовательно установленных верти-

кального и горизонтального смесителей с лопастями, смешение осуществляется в две стадии. На первой стадии происходит турбулентно-гирационное смешение. На второй стадии происходит рециркуляционное смешение с пароувлажнением.

В результате проведенного анализа было установлено, что конструкции смесителей циркуляционного действия не обеспечивают необходимого качества готовой смеси. Применение предложенной конструкции смесителя комбинированного действия позволяет получать готовые смеси необходимого качества с различными физико-механическими характеристиками входящих компонентов.

### **Библиографический список**

- 1. Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф.** Некоторые аспекты практического использования циркуляционных смесителей // Химическая промышленность сегодня. 2011. № 2. С. 51–56.
2. Ресурсо-энергосберегающие модули для комплексной утилизации техногенных материалов / С. Н. Глаголев, В. С. Севостьянов, А. М. Гридчин и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2013. № 6. С. 102–106.
3. АС СССР №1011220, МПК B01F 7/02. Планетарно-шнековый смеситель / Г. И. Орлов, Н. А. Куприянов и Ю. В. Баташова (СССР). №3 359369/23-26; заявл. 05.11.81; опубл. 15.04.83, Бюл. №14. 3 с.
4. АС СССР № 1494957, МПК B01F 7/18. Центробежный лопастной смеситель / П. С. Растворин, В. Л. Бурмака и С. Д. Манивчук (СССР). № 4116079/23-26; заявл. 01.07.86; опубл. 23.07.89, Бюл. №27. 2 с.
5. Патент РФ. № 97935, МПК D03J 3/00. Волчковый центробежный смеситель / В. Я. Борщев; заявитель и патентообладатель Тамбов. гос. тех. универ. № 2010114959/05; заявл. 14.04.2010; опубл. 27.09.2010. 6 с.
6. АС СССР № 1816490, МПК B01F 5/24. Пневматический смеситель / М. Д. Фиялка (СССР). № 4921336/26; заявл. 01.02.91; опубл. 23.05.93, Бюл. № 19. 3 с.
7. Патент РФ № 2624306, МПК B01F 7/04 (2006.01), B01F 7/18 (2006.01), B01F 13/10 (2006.01)03.07.2017. Технологический модуль и способ смешения техногенных волокнистых материалов / М.В. Севостьянов, С.Н. Глаголев, А.М. Гридчин и др.; заявитель и патентообладатель Белгород. гос. технол. универ. № 2016140757; заявл. 17.10.2016; опубл. 03.07.2017.

## **ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ БАЗАЛЬТОВЫХ ОТХОДОВ**

д-р техн. наук, проф. **Севостьянов В.С.**

канд. техн. наук, доц. **Шаталов А.В.**

канд. техн. наук, доц. **Севостьянов М.В.**

магистрант **Крутов В.С.**

студент **Шаталов В.А.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** При производстве минеральной ваты, образуется большая доля некондиционных отходов продукции. Помимо затрат на их изготовление, также требуются затраты на их переработку и утилизацию (транспортировка, размещение, консервация и т.д.). Кроме того, отходы оказывают вредное влияние на окружающую среду. Все это предопределяет необходимость проведения исследований направленных на изучение физико-механических характеристик материалов, возможностей и способов их вторичной переработки, использования при производстве тепло-ресурсосберегающей продукции.

Одним из важных направлений ресурсо-энергосбережения является обеспечение теплоизоляции производственных и жилых зданий ввиду постоянного роста стоимости затрат на их отопление. В результате этого существенно повышается спрос на экологически чистые утеплители, при изготовлении которых используются различные теплоизоляционные материалы, в т.ч. - базальтовые волокна [1].

В существующих способах получения базальтового волокна отходы при его производстве могут составлять до 15%, которые чаще всего просто утилизируют. Все это, несомненно, оказывает пагубное влияние на окружающую среду.

Целью наших исследований было выявление возможных путей использования отходов при производстве базальтового волокна, изучению его физико-механических характеристик и определение оптимального фракционного состава для использования в готовых изделиях [2]. Также перед нами ставилась задача по созданию устройства и способа для дезагломерации техногенных волокнистых материалов [3].

Базальтовое волокно получают из расплава базальта в плавильных печах путем его свободного вытекания через фильерные пластины, изготовленные из жаростойких металлов. Так как сырьем для производства каменной ваты являются горные породы, то благодаря этому

теплоизоляционные изделия соответствуют требованиям пожарной безопасности и могут использоваться в качестве противопожарной изоляции и огнезащиты. Предел температуры спекания базальтовых волокон составляет  $1000^{\circ}\text{C}$ , что обуславливает высокие значения максимальных рабочих температур [4].

В процессе изготовления минеральной ваты, помимо участков обрезки края ковра (6...8 %), образуются дополнительные некондиционные остатки продукта и нетоварные продукты (5...8 % общего объема выпущенной продукции). Таким образом, от 5 до 15 % продуктов общего объема производства из-за своего состояния не подходят для реализации и использования. Во многих случаях невозможно направить на повторную переработку образующиеся объемы обрезков краев, а остатки приходится удалять в качестве отходов.

Бракованная продукция и обрезки краев вывозится для утилизации на специальные полигоны. Это, в свою очередь, оказывает пагубное влияние на окружающую среду. Кроме того, частицы материала получаемые при переработке базальтового волокна могут попадать в легкие человека и вызвать нежелательные последствия. С этой целью в состав вводят связующие компоненты, что позволяет создать относительно безопасный основной продукт, для использования его при изготовлении теплозащитных материалов. Но все же искусственные строительные материалы могут содержать остаточные компоненты, которые вредно действуют на организм человека.

Базальтовая фибра, кроме вышеуказанного, является эффективной микроподкрепляющей добавкой в бетоны и другие растворы на цементной или гипсовой основе. Она повышает устойчивость бетона к деформации на начальном этапе. Когда же бетон начинает давать усадку (на более позднем этапе) - базальтовые фиброволокна предотвращают растрескивание бетона, тем самым снижая риск разлома. В производстве декоративных изделий из цемента или гипса - базальтовая фибра уменьшает количество брака изделий на 90...100%.

Использование базальтовой фибры в бетонных растворах снижает образование усадочных трещин на раннем этапе на 90% (арматурная сетка уменьшает этот показатель всего на 6%). Но, в монолитном домостроении, базальтовая фибра все же не может быть использована в качестве замены стальной арматуры. Здесь допустимо использовать арматуру из базальтопластика.

Применение базальтовой фибры позволяет замедлить процесс гидратации бетона, тем самым снизить внутренние напряжения при

температурных колебаниях. Базальтовая фибра устойчива к физическим повреждениям во время перемешивания, а также ко всем химическим веществам, входящим в состав бетона и к щелочам, применяемым в производственных процессах. Термостойка, не подвержена коррозии (что характерно для стальной фибры), легко распределяется не образуя сгустков, долговечна, совместима с любыми добавками и присадками в бетоны, в том числе и пластификаторами, противоморозными добавками, ускорителями твердения и замедлителями схватывания [5].

Исходя из приведенного выше анализа областей использования базальтовых волокон, возникает не только задача обеспечения необходимых технологических условий переработки техногенных материалов, но и получения из них продукта – микрофибрированных наполнителей с заданными физико-механическими характеристиками: размерами, формой, дисперсностью и др.

Для решения проблемы утилизации отходов производства изделий из базальтового волокна предлагается его использование для дисперсного армирования бетона. Нами были проведены патентные исследования, с целью поиска технических решений, используемых для дезагломерации отходов производства базальтового волокна [6].

Техническое предложение, предлагаемое нами, представлено на рис. 1.

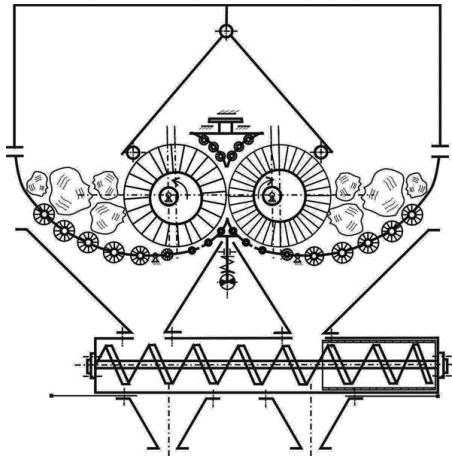


Рис.1. Устройство для дезагломерации

Способ дезагломерации техногенных волокнистых материалов заключается в многократном воздействии иглофрезерных рабочих элементов, закреплённых на валках. Валки, имеющие различные окружные скорости, обеспечивают растягивающие усилия и воздействуют на спрессованные волокнистые материалы. Устройство позволяет отсеивать мелкозернистые материалы, а также за счет вибровоздействия исключает уплотнение материалов между вращающимися навстречу друг другу игло-фрезерными валками и способствует пространственной ориентации расщепленных волокон в направлении движения потока. Способ также предусматривает отбор дезагломерированного материала по отдельным фракциям.

Таким образом, предлагаемый нами способ и конструкция устройства позволит эффективно разделить волокнистые материалы, а также произвести отбор дезагломерированного материала по необходимым отдельным фракциям. Полученная в результате этого базальтовая фибра может быть использована в качестве эффективной микроармирующей добавки в бетоны и другие растворы. Все это позволит решить проблему утилизации базальтовых отходов и снизить себестоимость продукции.

### **Библиографический список**

1. Технологический модуль замкнутого цикла измельчения / В.И. Уральский, Е.В. Синица, А. В. Уральский, Е.А. Сажнева // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2017. № 10. С.144–148.
2. **Севостьянов М.В.** Ресурсоохраняющее оборудование для комплексной переработки техногенных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С.140-145.
3. **Севостьянов В.С.** Энергосберегающие помольные агрегаты / Монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. 436 с.
4. Базальтовые технологии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.basaltech.org/forum/forum73/topic481/messages>.
5. Строительные материалы [Электронный ресурс]. URL: <http://budmat.kiev.ua/statjy/statjy/bazaltovayafibra.html>.
6. **Шаталов А. В., Дубинин Н.Н., Шевляков В.И.** Энергосберегающий помольный комплекс // Экология и рациональное природопользование как фактор устойчивого развития: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. С. 363-366.

# **ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЖИДКИ МАСЕЛ**

д-р техн. наук, проф. **Севостьянов В.С.**

канд. техн. наук, доц. **Шинкарев Л.И.**

магистрант **Белых М.М.**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены проблемы утилизации отработанных масел, а также способов их регенерации. Проанализированы способы, методы, а также технические средства для регенерации загрязненных масел. Проведены исследования по изучению фильтрующих материалов и технических средств для их реализации. На основе проведенных исследований авторами предлагается использовать вибро-центробежный агрегат для регенерации загрязненных масел.

На сегодняшний день по всему миру в виду увеличения числа автомобилей растет и потребление масел и, как следствие – увеличивается и число отходов в виде отработки, которая на сегодняшний день практически не утилизируется, а используется как топливо или сливается в водоемы и на почву.

В России, перерабатываются в среднем около 2-4 % отработанных масел. Это в значительной степени меньше, чем в большинстве европейских стран, в которых перерабатывается в среднем от 32 до 40 % отработанных масел. Поэтому переработка отработанных масел является актуальной для нашей страны [1].

Цель работы проанализировать существующие способы и технические средства очистки загрязненных масел для создания фильтрационного агрегата.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что в настоящее время наибольшее распространение получили такие способы, как например: химико-технологические, здесь загрязненное масло подвергают обработке в серной кислоте [2]; Механические, могут быть использованы способы, использующие процесс отделения твердых частиц (масло пропускают через фильтрующую поверхность), пропускание масла через силовые поля и другие [3]; Электростатические, в агрегате масло пропускают через электрическое поле (процесс электрофореза). Для более качественной фильтрации может применяться гофрированная бумага [4].

Для очистки загрязненных масел применяются такие агрегаты, как например электростатический очиститель омэ01-03, установки для регенерации зарубежных компаний «PALL», и «Wotec», а также фильтр-пресссы «Саратовского завода технологического машиностроения» [5].

Для разработки технологической схемы очистки отработанных масел были рассмотрены принципиальные схемы переработки и утилизации масел.

На основании проведенных исследований была построена установка для регенерации отработанных масел. Она представлена на рис. 1.

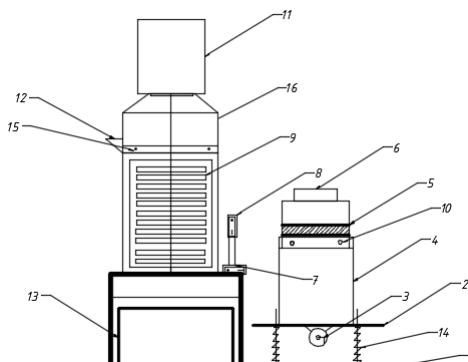


Рис. 1. Схема установки для регенерации отработанных масел:

1 – станина; 2 – виброплощадка; 3 – электромотор; 4 – фильтр; 5 – фильтрующие элементы; 6 – заливная горловина; 7 – переключатель виброплощадки; 8 – переключатель смесительной установки; 9 – лопасть; 10, 15 – фланцевые соединения; 11 – электродвигатель; 12 – приемное отверстие; 13 – блок питания; 14 – пружины; 16 – емкость смешивания

На данной установке проведены экспериментальные исследования процессов регенерации масла с добавлением адсорбента, отстаивания и последующей фильтрации.

Перед началом экспериментов с адсорбентом, были осуществлены опыты по поиску фильтрующего материала для очистки масла.

В экспериментах использовалось полусинтетическое моторное масло, SL/CF SAE 5W-40 [6].

В ходе экспериментальных исследований в качестве адсорбента применялись: активированный уголь, перлит, вермикулит, целлюлоза. Проверялись различные типы фильтров, а именно из: перлита, вермикулита, активированного угля, бумаги, опилок, древесной муки и пыли.

Проводились поиски фильтрационного элемента для регенерационной камеры. В ходе экспериментов применялись такие фильтрующие элементы, как перлит, вермикулит, активированный уголь, измельченная бумага, древесная мука [7].

На первом этапе исследований использовался метод статической фильтрации (отстаивания) загрязненных масел через различные фильтрующие материалы. Среднее время фильтрации 200 мл масла варьировалось в пределах 1,5 – 2 часов, а в отфильтрованном масле наблюдалось в среднем около 10-30% загрязнений.

В дальнейшем, ввиду слишком длительного времени фильтрации была использована вибрация. При этом количество оборотов эл. двигателя составляло около 2500-3000 об/мин, а амплитуда колебаний в пределах (0,5-1) мм. Серии экспериментов показали, что время фильтрации уменьшилось, в среднем на 30-50% и составило около пятидесяти - девяноста минут. Наиболее эффективными фильтрующими элементами были перлит, активированный уголь и целлюлозно-бумажные отходы измельченные в молотковой дробилке, в отфильтрованном масле наблюдалось увеличение количества загрязнений.

В виду того, что увеличилось количество загрязнений, нами было принято решение применить двойной фильтр. В экспериментах применялись такие фильтрующие элементы, как перлит и измельченные ЦБО (целлюлозно-бумажные отходы), вермикулит и измельченные ЦБО, активированный уголь и измельченные ЦБО. Среднее время фильтрации 200 мл отработки составило в среднем 120-140 минут, но при этом количество механических примесей и воды сократилось.

Так как увеличилось время фильтрации, нами было принято решение применить способ вакуумирования. Были сконструированы три камеры, которые представлены на рис. 2. Среднее время фильтрации по каждой камере (200 мл масла) составило около десяти минут. В первой камере наблюдалось наибольшее количество механических примесей, на второй это число уменьшилось. В последней камере механические загрязнения практически не наблюдались.



Рис. 2. Камеры фильтрации

В результате полученных данных была создана 3-Д модель фильтрационной камеры под вибрационно-смесительного агрегата, у которого частота вращения кривошипа 250-400 об/мин. Величина эксцентрикитета кривошипа составляла 20 мм. 3-Д модель камеры представлена на рис. 3. Далее нами создана специальная камера для модели данного агрегата, произведены опыты по фильтрации с использованием способов вибрации и вакуумирования. Данная модель агрегата представлена на рис. 4. После проведения серии экспериментов на миниатюрной установке нами было получено отфильтрованное от механических примесей и воды масло. Время фильтрации 400 мл отработки в среднем составило около 8 минут, а исходя из расчетов средняя производительность агрегата для очистки загрязненных автомобильных масел составляла около 2,5 литров в час.

Установка работает следующим образом, отработанное масло заливается в камеру фильтрации (2), затем подключается питание от блока питания (4) на установку (5) и пылесос (6), который выполняет функции насоса, вытягивая воздух из камеры через шланг (1).

Технические характеристики модели:

частота вращения вала.....10-300 об./мин.;  
амплитуда колебаний .....20 мм;  
мощность насоса .....60 л./мин.;  
создаваемое давление .....~ 2-4 атм.

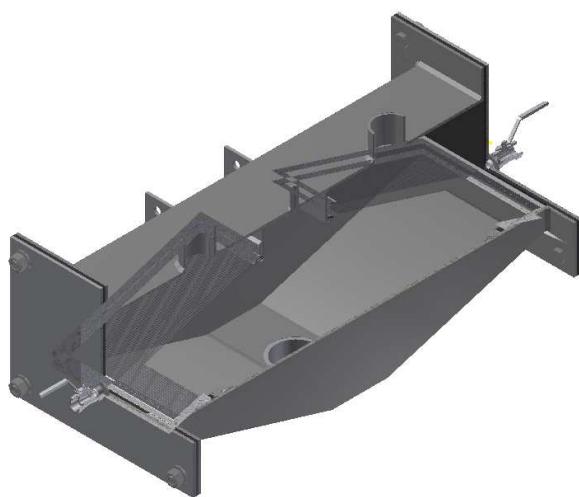


Рис. 3. 3-D модель камеры для очистки загрязненных масел

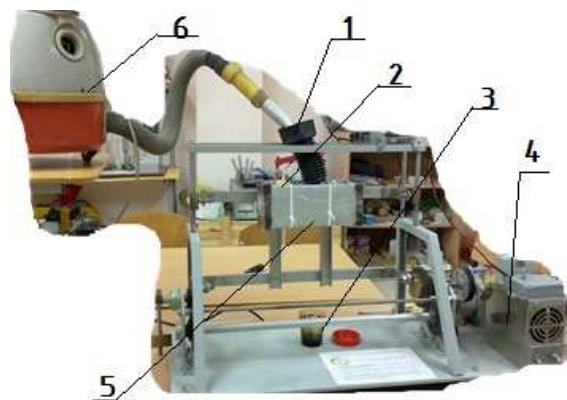


Рис. 4. Модель агрегата для очистки загрязненных масел:  
1 – патрубок насоса; 2 – фильтрационная камера; 3 – емкость с отфильтрованным маслом; 4 – блок управления; 5 – установка вибро-центробежной очистки; 6 – насос

Используя данную модель можно спроектировать фильтрационный агрегат, который будет восстанавливать первоначальные свойства масел за счет смешивания отработки с адсорбентом и, проводя несколько стадий фильтрации, масло восстановит свои первоначальные свойства, что позволит использовать его повторно. Такой технологический агрегат для очистки отработанных автомобильных масел является многофункциональным и может быть использован не только для очистки отработанного масла, но и в перспективе для других загрязненных жидкых сред смежных отраслей промышленности [8]. Главной целью такого агрегата является регенерация загрязненных масел.

Для России разработка такого технологического оборудования, позволит уменьшить использование ценных ресурсов страны, т.к. будут использоваться отработанные материалы, цена на которые в несколько раз ниже, чем новые.

### **Библиографический список**

1. Очистка масла от механических примесей и воды. [Электронный ресурс]. URL: [http://ig.ua/ru/ochistka\\_ot\\_mekhanicheskikh\\_primesei\\_i\\_vody](http://ig.ua/ru/ochistka_ot_mekhanicheskikh_primesei_i_vody) (дата обращения: 16.09.2017).
2. Химико-технологические аспекты процесса регенерации нефтеотходов / Л.В. Чупрова, Э.Р. Муллина, О.В. Ершова, Н.И. Родионова // Молодой ученик. 2013. № 6. С. 235–237.
3. **Брай И.В., Клейменова К.Ф., Яковлева З.И.** Регенерация трансформаторных масел: учебник. Л.: Изд-во «Химия», 1972. 168 с.
4. Тэнэсеску Ф., Крамарюк Р. Электростатика в технике: Пер. с румын. М.: Энергия, 1980. 296 с.
5. Экологические проблемы рационального использования смазочных материалов / И.Г. Фукс, А.Ю. Евдокимов, В.Л. Лашхи, Ш.М. Сайдахмедов. М.: Изд. «Нефть и газ», 1993. 158 с.
6. ЛУКОЙЛ ЛЮКС Синтетическое 5W-40 [Электронный ресурс]. URL: <http://lukoil-masla.ru/ru/Products/ProductCard?product=52>. (дата обращения: 17.09.2017).
7. Кожевников В.П., Токач Ю.Е. Современные решения по переработке твердых бытовых отходов в БГТУ им. В.Г. Шухова / Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. № 1. С. 172 – 174.
8. Свергузова С.В., Сакалова Г.В., Мальованый М.С. Эффективность очистки сточных вод гальванического производства адсорбционным методом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 153-156.

## **ПРОБЛЕМНЫЕ ЗАДАЧИ В ОБЛАСТИ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

д-р техн. наук, проф. Сиваченко Л.А.<sup>1</sup>

д-р техн. наук, проф. Севостьянов В.С.<sup>2</sup>

д-р техн. наук, проф. Ильина Т.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусско-Российский университет, г. Могилев

<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический  
университет им В.Г. Шухова, г. Белгород

**Аннотация.** Рассмотрены актуальные проблемы рационального использования минерального сырья, включая этапы добычи, переработки и утилизации отходов с использованием современных технологий. Предложена классификация и дан перечень основных направлений ресурсо-и энергосбережения в производственной среде и сфере смежных процессов и факторов.

**Введение.** Из всего добываемого минерального сырья, составляющего около 150 млрд. т./год, в качестве полезных продуктов используется всего около 2%, остальные в химически малоизмененном состоянии составляют отходы [1].

Если к этому добавить огромные объемы переработки и соответствующие им количества отходов в сельском хозяйстве, пищевой промышленности, химическом производстве, лесопереработке, коммунально-бытовом секторе и во многих других отраслях, то проблема ресурсосбережения приобретает мировое значение.

Более 90% всех производственных издержек и, прежде всего, связанных с расточительным использованием ресурсов всех видов, осуществляется на крупных промышленных объектах [2]. Поэтому для реализации проблем энергосбережения актуальной задачей является поиск и оценка источников снижения ресурсопотребления в базовых отраслях народного хозяйства, преимущественно в процессах переработки и преобразования различных материалов и получения готовой продукции.

### **Цель работы:**

- выявить основные направления повышения эффективности технологической сферы производства;
- выделить наиболее важные составляющие, которые оказывают существенное влияние на рациональное использование всех видов ресурсов;

– представить способы решения проблем энерго- и ресурсосбережения в технологиях различных отраслей народного хозяйства.

Для целостного восприятия анализируемой проблемы всю систему технологического ресурсосбережения условно разделим на производственную среду и сферу смежных процессов и факторов. Рассмотрим более предметно каждые из ее составляющих.

Производственная среда технологического ресурсосбережения:

- оптимизация разведки и добычи полезных ископаемых;
- снижение расхода топлива и первичной энергии;
- первичная подготовка и переработка сырья;
- повышение степени переработки и извлечения полезных ископаемых;
- увеличение доли вовлечения в производство сырья, материалов и отходов;
- синтез новых соединений и композиций;
- оптимизация технологических процессов и повышение их безотходности;
- повышение сроков эксплуатации производимой продукции.

Здесь уместно изначально выделить разведку и добычу полезных ископаемых, так как при этом приходится добывать огромное количество материалов и образовывать наибольшие объемы первичных отходов. Это касается разведки и добычи рудных и нерудных материалов, энергетического сырья, воды, продуктов для горной химии и т.д. Одним из примеров рационального ресурсосбережения здесь можно рассмотреть, например, использование вскрышных пород на горно-обогатительных предприятиях Курской магнитной аномалии [3, 4].

Важнейшим направлением ресурсосбережения можно считать снижение использования первичной энергии, удельное душевое потребление которой в мире за 2015 г. составило 1,85-1,90 тонн нефтяного эквивалента [5]. Снижение этого показателя самым активным образом влияет на многие аспекты ресурсосбережения: объемы добычи сырья и материалов, транспортные издержки, затраты на экологию, строительство различных объектов и многое другое. Основные пути их решения известны и развиваются [5, 6]. Однако для ряда стран, в т.ч. России и Беларуси, они являются первостепенными для устойчивого развития.

Стадия первичной подготовки и переработки сырья формирует весь последующий цикл технологического производства материалов. Это многоглавые технологии, но их становой хребет образуют дез-

интеграторные переделы, на которые расходуется около 10% всей вырабатываемой электроэнергии и теряется на износ до 2% производимого металла [7]. При этом ресурсные потери не менее велики. Примером может служить ПО «Гранит» г. Микашевичи Брестской области, где ежегодно добывается в качестве горной массы на гранитный щебень 18 млн. тонн, из которой 4 млн. тонн составляет отсев крупностью не менее 5 мм и на 95% идущий в безвозвратные потери. Подобного рода ресурсные отходы встречаются повсеместно и их практическая реализация имеет большие перспективы, но связана со многими трудностями, в основном, организационного плана.

Повышение степени переработки и извлечения полезных ископаемых является фундаментальной проблемой технологической сферы производства и во многом определяет ее эффективность. Эта проблема ускоренно обостряется в связи с истощением природных ресурсов и необходимостью использовать тонковрапленные и трудно доступные ископаемые. Одним из комплексных решений в этом направлении может служить селективная рудоподготовка [7].

Заслуживает особого внимания проблема увеличения доли вовлекаемых в производство сырья, материалов и отходов. Речь при этом следует вести о расширении сырьевой базы промышленности за счет разработки новых технологий переработки отходов, утилизации вредных пылевых выбросов, эффективной очистки воды и других стоков, разумное обращение с лесным фондом и т.д. В последние десятилетия значительно возрастает доля перерабатываемых неоднородных и сложных по составу и свойствам материалов, что требует создания новых технологий и оборудования [8, 4].

Синтез новых соединений и композиций входит в сферу передовых технологий и основывается на современных достижениях науки и техники. Его диапазон начинается от нанотехнологий и заканчивается самыми многотоннажными производствами, где энергия льется рекой, а материалы расходуются эшелонами. Применяемые технологии здесь характеризуются как очевидной архаичностью, так и несомненной совершенностью, а в крупнотоннажных производствах они отличаются устойчивым консерватизмом и низкой интенсивностью развития. В качестве примера технологий последнего ряда может служить производство бетонных изделий, в частности процессы механоактиваций компонентов бетонной смеси [9].

Ресурсосбережение на основе повышения сроков эксплуатации производимой продукции следует рассматривать как наиболее простой

путь экономии материальных ресурсов всех видов. Изначально он требует увеличения затрат на создание высококачественных материалов и изделий, но снижает первичные издержки на производство и последующие эксплуатационные расходы. Фактор надежности успешно работает на изделиях длительного пользования и не является определяющим при выпуске продукции для рынка с высокими конкурентными предложениями или ажиотажным спросом. Отсюда вывод-оценка данного направления требует дифференцированного подхода и конкретных обоснований.

Сфера смежных процессов и факторов включает:

- функциональное проектирование;
- оптимизация строительных сооружений;
- технологическое энергосбережение и электропривод;
- технологический транспорт материалов;
- использование возобновляемых источников энергии;
- инновационный менеджмент технологической среды;
- подготовка кадров.

Сфера смежных процессов и факторов, оказывающих также определённое влияние на ресурсосбережение, складывается из направлений, которые применительно к вопросам энергосбережения предметно описаны в работе [6] и охватывают функциональное проектирование всех видов технологий, оптимизацию строительных сооружений, технологическое энергосбережение, технологический электропривод, технологический транспорт материалов, использование возобновляемых источников энергии, инновационный менеджмент технологической среды, а также подготовку кадров.

Это чисто субъективная оценка непроизводственной сферы технологического ресурсосбережения, которая позволяет расширить представления о потенциале и возможностях данного направления дополнительно к производственной сфере технологического ресурсосбережения. Полномасштабный анализ технологической среды, требует дополнительных исследований и сбора статистической, экспертной и другой информации.

По нашему мнению, следует выделить наиболее важные проблемы и нерешенные задачи в сфере современного ресурсосбережения:

- повышение степени переработки и извлечения полезных компонентов;
- увеличение доли вовлекаемых в практическое использование сырья, материалов и отходов;

- синтез новых соединений и композиций, обеспечивающих полезное использование сырья, техногенных материалов и отходов;
- оптимизация технологических процессов, способствующих повышению качества и экономии дорогостоящих компонентов;
- несоответствие уровня развития технологического машиностроения достижениями в области материаловедения;
- разрозненность научно-технической и проектной базы и корпоративные барьеры в сфере технологического ресурсосбережения;
- отсутствие единого мирового центра по организации и управлению развитием технологического ресурсосбережения.

В настоящее время материаловедение шагнуло далеко вперед, что позволяет создавать новые эффективные материалы, изделия и технологии, но их практическое использование ограничивается крайне отсталым технологическим оборудованием, системами контроля и управления. Мировой наукой наработано большое число самых различных по своей природе и условиям протекания аномальных эффектов в процессах технологической переработки материалов. Однако в промышленных технологиях они используются чрезвычайно мало. Так, в частности, предложенный авторами механизм абсорбционного повышения прочности дисперсных структур, показанный на примере введения твердых природных адсорбентов в бетонные смеси [10,11], ждет своего применения. Предполагается, что после проведения полномасштабных исследований его функции могут далеко выйти за рамки предложенного эффекта Ребиндера.

Наиболее тяжелое положение с инновационным развитием в сфере так называемых производственных технологий характерно для России и Беларуси. Здесь сложилась парадоксальная ситуация, когда зарубежные производители имеют широкий доступ на наши рынки с весьма посредственным оборудованием и технологиями, а свои разработчики, способные и желающие создать высококлассное оборудование мирового уровня, не имеют возможности самореализоваться в условиях отечественного рынка [12,13].

**Выводы.** Из анализа вышеизложенных научно-производственных задач в области ресурсо-и энергосберегающих технологий следует, что использование новых форм организации творческих коллективов, объединяющих в своих рядах специалистов различных профилей, способно обеспечить эффективное энергосбережение на основе создания новых материалов, технологий, машин и комплексов.

## **Библиографический список**

1. **Демьянова В.С., Калашников В.И., Казина Г.Н** Экологические и технико-экономические аспекты использования отходов нерудной промышленности в производстве цемента // Строительные материалы. 2006. № 11. С.52–53.
2. Технологические переделы с максимальным потенциалом энергосбережения / Л.А. Сиваченко, У.К. Кусебаев, И.А. Реутский, А.М. Ровский // Энергоэффективность, Минск. 2015. № 10. С. 24–30.
3. **Гибелев Е.И., Ильина Т.Н.** Вскрышные породы горнодобывающих предприятий в технологии гранулирования органоминеральных удобрений // Материалы Десятого Международного симпозиума ФГУП ВИОГЕМ. Белгород: Изд-во ВИОГЕМ, 2009. С. 337–342.
4. **Ильина Т.Н.** Процессы агломерации в технологии переработки дисперсных материалов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. 229 с.
5. Перспективы мировой экологии до 2040 г. / А. Макаров, А. Галкина, Е. Грушевенко и др. // Мировая экономика и международные отношения. 2014. № 1. С.3–20.
6. **Сиваченко Л.А., Сиваченко Т.Л.** Технологическое машиностроение – инновационный резерв мировой экономики: монография. Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2017. 254 с.
7. Селективное разрушение минералов / В. И. Ревнивцев, Г. В. Гапонов, Л. П. Зарогатский. М.: Недра, 1988. 286 с.
8. Технические основы переработки и утилизации техногенных материалов / В.С. Севостьянов, Л.И. Шинкарев, М.В. Севостьянов и др. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 263 с.
9. Механоактиваторы адаптивного действия и их развитие / Л.А. Сиваченко, В.С. Севостьянов, Т.Л. Сиваченко, С.Ж. Багитова // Сб. науч. ст. Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. Том 1. Курск: ЮЗГУ, 2016. С. 104–117.
10. **Севостьянов В.С., Сиваченко Л.А., Ильина Т.Н.** Основные положения физико-химической механики в совершенствовании технологических процессов / Экология и рациональное природопользование как фактор устойчивого развития: Сб. тр. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. С. 263-270.
11. **Ильина Т.Н.** О взаимодействии водорастворимых компонентов с компонентами гранулируемых шихт // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 2. С.110–113.
12. **Ильина Т.Н., Севостьянов М.В., Шкарпеткин Е.А.** Конструктивно-технологическое совершенствование агрегатов для гранулирования порошкообразных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 2. С.100–102.
13. Исследование условий процесса микрогранулирования в дисперсных системах / В.С. Севостьянов, Т.Н. Ильина, М.В. Севостьянов, Е.А. Шкарпеткин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 1. С.81–86.

# СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ПЛОТНОЙ ШАРОВОЙ ЗАГРУЗКИ ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

магистрант Стронин А.А.

д-р техн. наук, проф. Барбанягрэ В.Д.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, г. Белгород

*Аннотация.* Авторами данной статьи проводится сравнительный анализ эффективности использования нескольких типов плотной шаровой упаковки для производства цемента. Данный анализ основывается на изучении степени влияния на кинетику процесса измельчения клинкера в мельнице открытого цикла разного ассортимента шаров без использования интенсификатора помола и в случае его использования. Доказывается возможность отказа от применения интенсификатора в случае рационального подбора мелющих тел.

Клинкер характеризуется малой величиной размалываемости, поэтому процесс его измельчения связан с большими энергетическими затратами, составляющими  $45 \pm 5$  кВт·ч/т кл. [1]. Как известно производительность цементной мельницы ограничивается агрегацией частиц измельчаемого материала, налипанием их на мелющие тела и бронефутеровку, снижая тем самым эффективность процесса измельчения в помольном агрегате, что сопровождается увеличением удельного расхода электроэнергии [2].

Это обстоятельство вызывает необходимость в поиске способов, позволяющих сократить удельный расход электроэнергии цементными мельницами и повысить их производительность. В данной работе рассмотрено применение некоторых из них: использование плотной шаровой упаковки (ПШУ) [3] и интенсификатора помола [4].

Целью работы было изучение влияния разных типов плотной шаровой загрузки на дисперсные характеристики клинкера, такие как удельная поверхность и остаток на сите № 008, а также оценить степень их воздействия на указанные параметры в присутствии интенсификатора помола, в качестве которого использовался «Литопласт 4И» компании ООО «Полипласт Новомосковск».

Исследования проводились на клинкере завода ОАО «Осколцемент». Клинкер фракции 10-0 мм без добавления к нему гипса пода-

вался в мельницу ГИПРОЦЕМента  $0,5 \times 0,28$  м. Масса загружаемого материала во всех опытах составляла 4 кг.

Материал измельчался в первой камере 10 мин, во второй 15 мин и 10 мин. Через указанные интервалы времени помола от клинкера отбирались пробы для установления величины удельной поверхности и полного остатка на стандартном сите № 008. Определение удельной поверхности осуществляли методом воздухопроницаемости.

Гранулометрический состав портландцементного клинкера, измельченного в мельнице в течение 35 мин, определяли на лазерном анализаторе частиц ANALYSETTE 22 NanoTec plus фирмы FRITSCH.

Весь процесс измельчения проходил в одной камере мельницы. В первую камеру всегда загружался постоянный ассортимент шаров: Ø74/Ø54 с соотношением шаров по массе 2:1 ( $\phi = 0,2$ , масса мелющих тел 55 кг), затем после 10 мин измельчения клинкера из камеры мельницы извлекалась данная шаровая загрузка, и загружался другой ассортимент шаров, соответствующий уже второй камере: Ø60/Ø17 = 1:2 или Ø40/Ø17 = 2:1.

В случае использования комбинированной загрузки материал измельчался только в одной камере в течение 35 минут, с отбором проб через вышеуказанные промежутки времени.

Проведение исследований начали с комбинированной загрузки: Ø74/Ø54/Ø40/Ø17 = 1,3:0,4:2,2:1,0;  $\phi = 0,2$ , масса шаров составляет 55 кг, энерговооруженность 13,75. Через 35 мин помола удельная поверхность клинкера составляет  $329,4 \text{ м}^2/\text{кг}$ , остаток на сите № 008 – 7,1%, содержание фракции 5–30 мкм = 68,9%.

В случае использования плотной шаровой упаковки с диаметрами шаров Ø60/Ø17, массой мелющей загрузки 55 кг,  $\phi = 0,2$  и энерговооруженностью – 13,75 через тот же промежуток времени указанные параметры имеют следующие значения:  $S_{уд} = 345,49 \text{ м}^2/\text{кг}$ ,  $R_{008} = 1,34\%$ , 5–30 мкм = 74,15%.

Применение ПШУ Ø40/Ø17, имеющей массу мелющих тел 80 кг, коэффициент загрузки 0,3 и энерговооруженность 20 приводит к следующим результатам:  $S_{уд} = 411,28 \text{ м}^2/\text{кг}$ ,  $R_{008} = 3,94\%$ , 5–30 мкм = 69,59%.

На этом этапе исследований из полученных данных (табл. 1), видно, что рациональным ассортиментом мелющих тел является плотная шаровая упаковка Ø60/Ø17, т.к. она позволяет получать материал с остатком на стандартном сите № 008 в 5 раз меньше, чем при использовании комбинированной загрузки и в 3 раза меньше, по сравнению с

плотной шаровой загрузкой Ø40/Ø17. По величине содержания фракции 5–30 мкм все три образца имеют приблизительно одинаковое значение.

Таблица 1  
Влияние ассортимента мелющих тел на дисперсные характеристики портландцементного клинкера

Ассортимент мелющей загрузки	Отношение фр. 5–30 мкм к фр. 0–5 мкм	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	Остаток на сите № 008, %	Содержание фр. 5–30 мкм, %
Комб. загр.	4,7	329,4	7,1	68,9
ПШУ Ø60/Ø17	5,1	345,5	1,3	74,1
ПШУ Ø40/Ø17	4,7	411,3	3,9	69,6

Затем повторили предыдущие опыты, но уже с введением интенсификатора помола (0,1% по масс.) во вторую камеру, в первую он не вводился. При комбинированной загрузке добавка была введена в мельницу через 10 мин помола клинкера, с целью обеспечения возможности в дальнейшем сравнивать полученные результаты. Данные проведенных исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Совокупное влияние ассортимента мелющих тел и интенсификатора помола на дисперсные характеристики портландцементного клинкера

Ассортимент мелющей загрузки	Отношение фр. 5–30 мкм к фр. 0–5 мкм	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	Остаток на сите № 008, %	Содержание фр. 5–30 мкм, %
Комб. загр.	6,6	377,3	1,4	87,9
ПШУ Ø60/Ø17	5,9	358,8	0,2	83,3
ПШУ Ø40/Ø17	5,4	394,1	2,4	85,5

Ввод добавки к комбинированной загрузке приводит к снижению R<sub>008</sub> приблизительно на 80%, увеличению удельной поверхности и содержания фр. 5–30 мкм примерно на 14,5% и 28% соответственно.

Введение добавки в помольную камеру с ПШУ Ø60/Ø17 сопровождается только уменьшением величины полного остатка на сите № 008 на 85%. Изменение удельной поверхности и содержания фр. 5–30 мкм не значительно.

К аналогичному результату приводит замена ПШУ Ø60/Ø17 на ПШУ Ø40/Ø17: наблюдается только снижение  $R_{008}$  на 39%. Остальные параметры почти не изменяются.

Отсюда видно, что ввод в мельницу интенсификатора помола приводит снижению величины полного остатка на сите № 008 на 80%, в случае использования во второй камере только либо комбинированной загрузки, либо ПШУ Ø60/Ø17.

Все результаты, полученные в ходе проведения данной работы, приведены в общем виде на рис. 1 и 2.

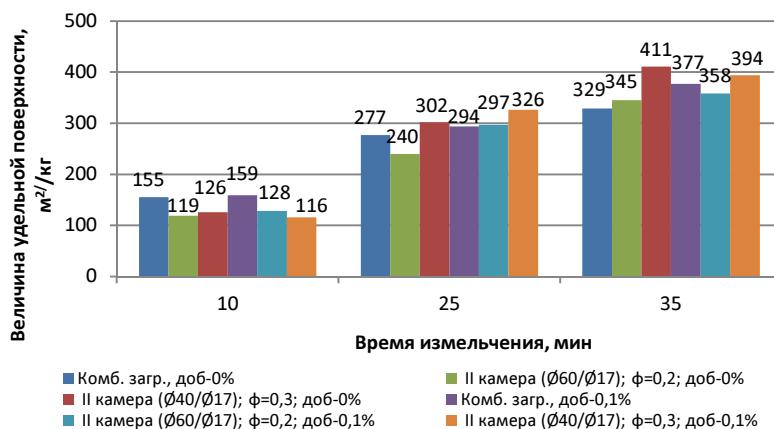


Рис. 1. Зависимость величины удельной поверхности от времени помола

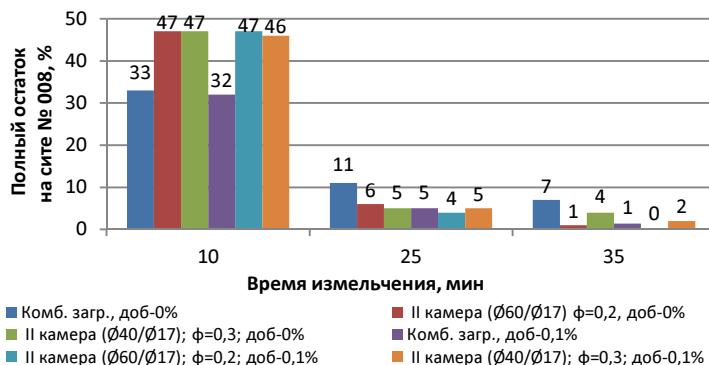


Рис. 2. Изменение величины полного остатка в процессе измельчения

По результатам исследований установлено, что ПШУ Ø40/Ø17 уступает ПШУ Ø60/Ø17 по остатку на контрольном сите № 008, в случае измельчения клинкера в мельнице более 25 мин, на ранней стадии эффективность у них одинакова. При производстве рядового цемента использование обоих типов плотной шаровой упаковки целесообразно в отсутствии интенсификатора помола.

Если принять в качестве критерия готовности продукта величину удельной поверхности находящейся в промежутке 300–320 м<sup>2</sup>/кг, то можно провести сравнительную оценку эффективности использования разного типа ассортимента шаров. Производительность мельницы в данном случае будет зависеть от времени затрачиваемого для достижения заданной тонкости помола.

Так в случае, использования плотной шаровой упаковки с диаметрами шаров Ø40/Ø17 на это потребуется 25 мин, во всех остальных случаях – примерно 30 мин. Отсюда следует важный вывод, что не всегда использование интенсификатора помола приводит к росту производительности, а в случае грамотного подбора ассортимента мелющих загрузки отпадает необходимость его применения при выпуске рядового цемента.

Проведенные исследования доказывают целесообразность в продолжении исследований по изучению влияния ассортимента мелющих тел на кинетику процесса измельчения клинкера в шаровой мельнице. В работе показано, что рациональный подбор тел измельчения позволяет получать цемент с высокими дисперсными характеристиками, без применения интенсификаторов помола, что обеспечивает снижение себестоимости выпускаемого предприятием цемента, а также рост производительности мельницы и уменьшение удельного расхода электроэнергии.

### **Библиографический список**

1. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. 308 с.
2. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. 239 с.
3. Интенсификация тонкого измельчения материалов в шаровых трубных мельницах / В.Д. Барбанягэр, А.Ф. Матвеев, Д.В. Смаль, Д.С. Москвичев // Научно-техническая конференция РФФИ: Сб. докл. регион. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. С. 20–27.
4. Карабаев К.К. Поверхностно-активные вещества в производстве вяжущих материалов. Алма-Ата: Изд-во «Наука», 1980. 336 с.

# **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВЧ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ КЕРАМИКИ**

канд. техн. наук, доц. Тригорлы́й С.В.

аспирант Захаров В.В.

*Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А., г. Саратов*

**Аннотация.** Приведена математическая модель СВЧ рабочей камеры бегущей волны для высокотемпературной обработки керамики, представляющая собой связанную задачу электродинамики и теплопроводности. Математическое моделирование проводилось с использованием метода конечных элементов. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о возможности применения данной рабочей камеры для термообработки отдельных видов керамики.

Известно, что по сравнению с традиционными методами нагрева СВЧ нагрев обладает следующими преимуществами [1]:

- обеспечивает высокую концентрацию энергии в единице объема при сравнительно малых значениях напряженности электрического поля;
- имеет лучшие экономические показатели из-за более высокого коэффициента полезного действия преобразования электромагнитной энергии в тепло, выделяющееся в объеме нагреваемого тела;
- позволяет реализовать различное распределение источников тепла в объектах термообработки, не осуществимое при традиционных видах нагрева;
- способствует повышению качества продукции.

Благодаря наличию вышеуказанных преимуществ имеется научный интерес к применению СВЧ нагрева в технологиях высокотемпературной термообработки керамики [2].

При разработке СВЧ электротехнологических установок в целях прогнозирования распределения температурного поля в обрабатываемом изделии является актуальным проведение математического моделирования процесса нагрева с учетом изменений тепло- и электрофизических свойств обрабатываемого изделия, а также конструктивных элементов рабочей камеры.

Целью работы является исследование возможности высокотемпературной термообработки керамических заготовок, имеющих форму параллелепипеда с размерами 145x20x14 мм в СВЧ рабочей камере,

работающей в режиме бегущей волны, путем проведения численного моделирования.

Математическая модель СВЧ нагрева керамической заготовки представляет собой связанную задачу электродинамики и теплопроводности:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = J + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0, \operatorname{div} \mathbf{B} = 0;$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q,$$

где  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  - векторы напряженности магнитного и электрического поля;  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{B}$ , - векторы электрической и магнитной индукции,  $J$  - плотность тока,  $c$  - удельная теплоемкость,  $\rho$  - плотность,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $T$  - температура,  $Q = 0,5\omega\epsilon_0\epsilon''|\mathbf{E}|^2$  представляет собой внутренние источники теплоты в уравнении теплопроводности, где  $\omega$  - круговая частота,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon''$  - мнимая часть диэлектрической проницаемости.

При численном моделировании целесообразно рассмотрение волновой формы уравнений Максвелла [3].

Границные условия сопряжения для задачи электродинамики записываются в виде:

$$[\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1 \mathbf{n}] = 0, [\mathbf{n}, \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1] = 0,$$

$$\mathbf{n}(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = 0, \mathbf{n}(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0,$$

где  $\mathbf{H}_2$ ,  $\mathbf{H}_1$ ,  $\mathbf{E}_2$ ,  $\mathbf{E}_1$  - векторы напряженности магнитного и электрического поля;  $\mathbf{D}_2$ ,  $\mathbf{D}_1$ ,  $\mathbf{B}_2$ ,  $\mathbf{B}_1$  - векторы электрической и магнитной индукции для сред 2 и 1 соответственно,  $\mathbf{n}$  - единичный вектор нормали к поверхности, направленный из среды 1 в среду 2.

Внутренняя поверхность рабочей камеры рассматривается как идеальный проводник ( $\mathbf{E} \times \mathbf{n} = 0$ ).

В задаче теплопроводности на внешних поверхностях рабочей камеры, контактирующих с окружающей средой, задаются граничные условия в виде теплообмена по закону Ньютона-Рихмана.

Для внешних поверхностей керамической заготовки и конструктивных элементов рабочей камеры, нагреваемых до высоких температур задаются граничные условия радиационного теплообмена.

Для контактирующих поверхностей керамической заготовки и конструктивных элементов рабочей камеры задаются граничные условия сопряжения температур и тепловых потоков.

Для решения указанной задачи использовался метод конечных элементов, реализованный в программном обеспечении COMSOL Multiphysics, позволяющем решать связанные мультидисциплинарные задачи с получением наглядных результатов.

В качестве исходных данных задавались тепло- и электрофизические свойства керамической заготовки и конструктивных элементов камеры, с учетом их изменения в процессе нагрева. Мощность СВЧ генератора изменялась от 1,4 до 2,2 кВт.

Результаты моделирования приведены на рис. 1, 2.

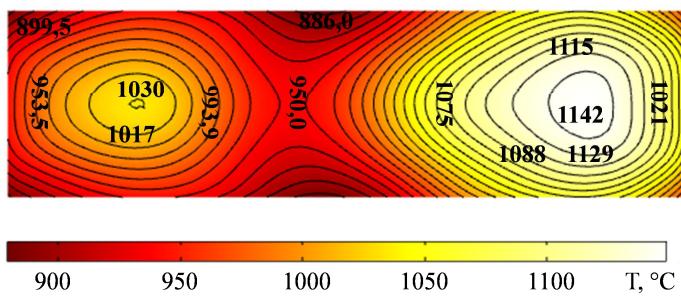


Рис. 1. Изотермы в горизонтальном продольном сечении керамической заготовки для момента времени 60 мин

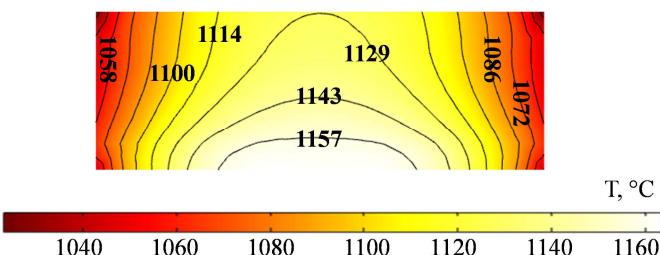


Рис. 2. Изотермы в поперечном сечении керамической заготовки для момента времени 60 мин

На основании результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Максимально достижимая температура керамической заготовки при заданной мощности СВЧ генератора составила около 1160 °C.
2. По длине керамической заготовки имеются два температурных максимума, наличие которых обусловлено конфигурацией электромагнитного поля в камере.
3. Вблизи одного из максимумов, занимающего, порядка 40 % керамической заготовки равномерность нагрева достаточно высока, при этом разность температур не превышает 5 %.
4. Температурное поле в процессе СВЧ нагрева имеет максимум в центре заготовки и спадает к периферии, что на начальной стадии термообработки позволит интенсифицировать процесс удаления влаги и органических прекурсоров из внутренних областей керамической заготовки к наружной поверхности.
5. Результаты проведенного математического моделирования позволяют сделать вывод о возможности применения рассмотренной СВЧ рабочей камеры для высокотемпературной термообработки отдельных видов керамики.

#### **Библиографический список**

1. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
2. Быков Ю.В., Рыбаков К.И., Семенов В.Е. Микроволновая высокотемпературная обработка материалов // Вакуумная СВЧ электроника: сборник обзоров. 2002. С. 26–33.
3. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

**Белоусов Александр Владимирович**, председатель

Канд. техн. наук, доцент., директор института энергетики, информационных технологий и управляющих систем, зав. каф. электроэнергетики и автоматики БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород).

**Трубаев Павел Алексеевич**, зам. председателя

Д-р техн. наук, доц., профессор кафедры энергетики теплотехнологий БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

**Авербух Михаил Александрович**

Д-р техн. наук, проф. кафедры электроэнергетики и автоматики БГТУ им В.Г. Шухова (Белгород)

**Борисов Иван Николаевич**

Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой технологии цемента и композиционных материалов БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

**Ботвиньев Алексей Николаевич**

Заместитель начальника департамента жилищно-коммунального хозяйства Белгородской области – начальник управления развития топливно-энергетического комплекса (г. Белгород)

**Вендин Сергей Владимирович**

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. электрооборудования и электротехнологий в АПКБелгородской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Я. Горина (г. Белгород)

**Ильина Татьяна Николаевна**

Д-р техн. наук, доц., проф. кафедра теплогазоснабжения и вентиляции БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

**Карпук Игорь Анатольевич**

Декан факультета автоматизации и электротехнических систем Донбасского государственного технического университета (г. Алчевск)

**Кожевников Владимир Павлович**

Канд. техн. наук, доцент, заслуженный энергетик РФ, зав. каф. энергетики теплотехнологий БГТУ им В.Г. Шухова (Белгород)

**Кудинов Роман Геннадьевич**

Генеральный директор ОАО «Белгородский институт альтернативной энергетики» (г. Белгород)

**Погонин Анатолий Алексеевич**

Д-р техн. наук, проф., заслуженный машиностроитель РФ, заслуженный изобретатель РФ, проф. кафедры технологии машиностроения БГТУ им В.Г. Шухова (Белгород)

**Полевой Игорь Николаевич**

Заместитель начальника Департамента экономического развития Белгородской области – начальник управления инвестиций и инноваций (г. Белгород)

**Решетников Сергей Анатольевич**

Заместитель главного инженера - начальник управления высоковольтных сетей филиала ПАО «МРСК Центра» - «Белгородэнерго» (г. Белгород)

**Радченко Вадим Витальевич**

Канд. эк. наук, депутат Совета депутатов города Белгорода, директор ООО «Центр энергосервисных технологий» (г. Белгород)

**Рыбалкин Олег Михайлович**

Д-р техн. наук, проф., профессор кафедры электроснабжение Юго-Западного государственного университета (г. Курск)

**Сапрыка Александр Викторович**

Д-р техн. наук, проф., Харьковский университет городского хозяйства (г. Харьков)

**Севостьянов Владимир Семенович**

Д-р техн. наук, проф., , заслуженный изобретатель РФ, зав. каф. технологических комплексов, машин и механизмов БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород)

**Удовиченко Злата Викторовна**

Канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской архитектурно-строительной академии (г. Макеевка)

**Шаповалов Николай Афанасьевич**

Д-р техн. наук, проф., первый проректор БГТУ им. В.Г. Шухова (г. Белгород)

**Шаповалов Сергей Михайлович**

Канд. техн. наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства БГТУ им. В.Г. Шухова (г. Белгород)

**Шаптала Владимир Григорьевич**

Д-р техн. наук, проф. кафедры высшей математики БГТУ им. В.Г. Шухова (г. Белгород)

**ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

**Глаголев Сергей Николаевич**, председатель, д-р экон. наук, профессор, ректор БГТУ им. В.Г. Шухова

**Белоусов Александр Владимирович**, зам. председателя, канд. техн. наук, доцент, директор института ЭИТУС БГТУ им. В.Г. Шухова

**Трубаев Павел Алексеевич**, д-р техн. наук профессор БГТУ им. В.Г. Шухова;

**Скурягин Юрий Васильевич**, канд. техн. наук, доцент каф. «Электроэнергетика и автоматика» БГТУ им. В.Г. Шухова, зам. директора института ЭИТУС БГТУ им. В.Г. Шухова по научной работе

**Кошлич Юрий Алексеевич**, канд. техн. наук, директор ООО «НТИ АСП», доцент кафедры электроэнергетики и автоматики

**Фиронова Елена Витальевна**, начальник отдела развития топливно-энергетического Комплекса и инженерной инфраструктуры Департамента жилищно-коммунального хозяйства Белгородской области

Научное издание

# **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

**Сборник докладов  
II Международной  
научно-технической  
конференции**

Подписано в печать 10.12.17. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл.-печ. л. 33,2. Уч.-изд. л. 35,3.  
Тираж 500 экз. Заказ Цена 500 руб.

Макет подготовлен в Белгородском государственном  
технологическом университете им. В.Г. Шухова  
308015, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Тиражировано ИП Осташенко А.А.  
308036, г. Белгород, ул. Буденного, д. 10, оф. 14