

ICES-2018
BELGOROD

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Белгородский государственный
технологический университет
им. В. Г. Шухова»



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

**III Международная
научно–техническая
конференция**

Сборник трудов

(Белгород, 29–30 ноября 2018 г.)

**Белгород
2018**

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
Донецкий национальный технический университет (г. Донецк)
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (г. Макеевка)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

III Международная
научно-техническая
конференция

Сборник трудов

(г. Белгород, 29–30 ноября 2018 г.)

Белгород
2018

УДК 620.9(082)

ББК 3

Э65

Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов, Белгород, 29-30 нояб. 2018 г. / Белгор. гос. технол. ун-т; отв. ред. П.А. Трубаев. – Белгород, 2018. – 340 с.

ISBN 978-5-361-00663-2

В сборнике представлены работы, освещающие современное состояние теоретических и экспериментальных исследований по следующим направлениям: теплоэнергетика и теплотехника; электроэнергетика и электротехника; энергосбережение и энергоэффективность, экология энергетики; альтернативные и возобновляемые источники энергии; энерго- и ресурсосбережение в технологиях. В сборнике также представлены работы, подготовленные студентами, магистрантами и аспирантами, размещенные в секции молодых ученых.

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

Статьи прошли процедуру рецензирования и публикуется в авторской редакции, авторы публикаций сохраняют исключительные права на размещенные в сборнике материалы.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 18-08-20138.

УДК 620.9(082)

ББК 3

ISBN 978-5-361-00663-2

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА	
Або Альзахаб О., Аникина И.Д., Амосов Н.Т. Математическое моделирование тепловых схем мощных энергоблоков при их совместной работе с тепловыми насосами.....	12
Бирюков А.Б., Семергей В.А. Варианты реконструкции котлов типа ТП-100 энергоблоков 200 МВт	18
Губарев А.В., Лозовой Н.М. Конструкция и варианты модернизации конденсационного водогрейного котла	23
Кузнецов В.А., Трубаев П.А. Конвективная теплоотдача пристенного слоя турбулентных газов.....	31
Макаров А.Н., Окунева В.В., Павлова Ю.М. Исследование теплообмена и КПД дуг в дуговых сталеплавильных печах с обычной и конвейерной загрузкой шихты	39
Ткаченко А.Е., Неежмаков С.В. Обоснование критериев оптимального управления теплоснабжением промышленного предприятия	44
Щеклеин С.Е., Пахалуев В.М., Абед А.Х. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при охлаждении сферы с использованием потока воздушно-водяного тумана	52
2. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	
Авербух М.А., Уханев С.В., Гордиенко А.В. Особенности моделирования динамических процессов в электроприводе бурового станка СБШ-250 В пакете MATLAB	59
Афонин В.И., Андрианов Д.П., Бадалян Н.П. Основные искажения в сетях от приводов лифтов	66
Балобанов Р.Н., Ахмадеев А.А. Устройство контроля состояния высоковольтных изоляторов со светодиодной индикацией	73
Бондарь В.В., Юдин А.А. Оценка мероприятий по снижению потерь электроэнергии на транспорт в электрических сетях напряжением 6–20 кВ	81

Гашо Е.Г., Гужов С.В., Кролин А.А. О прогнозировании трендов изменения удельных смешанных нагрузок электропотребителей микрорайонов и городов в условиях недостаточности данных.....	87
Дадабаев Ш.Т. Теория и практика использования инвертора тока для пуска высоковольтного синхронного электропривода	95
Колесник Г.П., Андрианов Д.П., Зимина А.А. Энергоэффективность трансформаторного агрегата с устройством продольной компенсации	100
Попов М.Г. Адаптивная коррекция продольной дифференциальной токовой защиты силового оборудования.....	106
Сапрыка А.В., Жилин Е.В. Анализ влияния несимметрии токов и напряжений на систему электроснабжения частного сектора.....	116
Юдин А.А., Бондарь В.В. Разработка математических моделей для оптимизации режимов электроэнергетических систем по напряжению и реактивной мощности	123
3. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ	
Бычихин С.А., Свириг М.В., Трубаев П.А. Оценка энергосберегающего эффекта при установке автоматизированных тепловых пунктов в образовательных учреждениях.....	129
Величко М.А., Гладких Ю.П., Костина И.Б. Использование современных высокоточных ультразвуковых расходомеров газа и эталонных стендов для повышения эффективности использования промышленных ресурсов.....	134
Выборнов Д.В., Кляус Б.В., Плужник А.В. Анализ потенциала энергосбережения в зданиях промышленного назначения.....	141
Деревянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э., Кордюкова Л.С., Рапопорт А.В. Использование DEA метода для оценки эффективности энергосберегающих проектов.....	150
Костарев В.С., Ташлыков О.Л., Климова В.А. Повышение энергоэффективности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах путем утилизации сбросной теплоты с использованием тепловых насосов	157

Косухин М.М., Косухин А.М., Шаповалова А.С. Энергоэффективные материалы и технологии для теплоизоляционных фасадных систем гражданских зданий	164
Косухин М.М., Косухин А.М., Коржова Ю.Н. Энергоэффективный фундамент мелкозаложенного для малоэтажного строительства.....	172
Орлов С.М., Романенко Б.Р. Повышение энергоэффективности циклонов.....	178

4. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Варакута В.В., Бирюков А.Б., Гнителиев П.А. Гибридная энергогенерирующая станция	186
Захаров В.И., Парфилова Е.С. Зависимость длины пламени от содержания диоксида углерода в биогазе и тепловой мощности горелки.....	196
Зубова Н.В., Рудых В.Д. Оптимизация выработки мощности ветроэнергетической установки с использованием методов искусственного интеллекта	203
Карнаух В.В., Бирюков А.Б., Шмельёва В.В. О применении мультикритериального подхода при выборе холодильного агента для парокомпрессионного теплового насоса.....	208
Корнилова Н.В., Трубаев П.А. Разработка методики теплотехнических расчетов по приведённым характеристикам RDF-топлив	214
Корнилова Н.В., Трубаев П.А. Теплотехнические испытания твердотопливных отопительных котлов малой мощности при сжигании брикетированных RDF-топлив	224
Севостьянов В.С., Белых М.М., Севостьянова К.И. Исследование процесса очистки загрязненных жидких сред с использованием термообработанных пеллет из древесных отходов	234
Сулов Д.Ю., Рамазанов Р.С. Определение энергетических показателей биогазового топлива	240

5. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ

Мишин Д.А., Ковалев С.В. Энергосбережение в производстве белого цемента	248
---	-----

Севостьянов В.С., Уральский В.И., Бойчук И.П., Ермилов Р.А., Лукьянова Е.А.	
Технологический модуль с вибро-центробежным агрегатом замкнутого цикла помолы для получения высокодисперсных материалов	254
Севостьянов В.С., Уральский В.И., Севостьянов М.В., Горягин П.Ю., Бабуков В.А.	
Переработка вторичного базальтового волокна для получения товарной продукции	261
Шеин Н.Т., Севостьянов В.С., Оболонский В.В., Севостьянов М.В., Горягин П.Ю., Бабуков В.А.	
Практические основы комплексной переработки и утилизации техногенных материалов.....	268
 СЕКЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ	
Воронкова А.Ю.	
Алгоритмизация оптимального выбора источников света	276
Ионов А.Е.	
Модернизация электропривода экскаватора ЭКГ-5А	284
Кулыгин А.С.	
Вычислительный сценарий автоматизированного анализа линейной электрической цепи на основе дуальных матричных методов.....	291
Мильто О.А., Калмыков К.С.	
Утилизация низкопотенциальной теплоты уходящих газов котельных агрегатов.....	298
Прокопшин Д.И.	
Анализ частотных характеристик сети электроснабжения ИЖС.....	303
Харламов К.Д.	
Реализация алгоритма управления устройствами РПН в среде MATLAB с использованием нечетких множеств.....	307
 АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ КОНФЕРЕНЦИИ ICES-2018.....	 313

ВВЕДЕНИЕ

III-я международная научно-техническая конференция «Энергетические системы» состоялась 29-30 ноября 2018 г. на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова).

Проведение конференции способствовало решению фундаментальных научных проблем в области энергетики с позиций системного подхода, что обусловлено укрупнением и усложнением изучаемых систем, потребностями управления большими системами и интеграции знаний. Так же одной из задач конференции было широкое привлечение к исследованиям молодых ученых – студентов, магистрантов, аспирантов.



Рабочие языки конференции – русский и английский. На конференцию после прохождения процедуры рецензирования было отобрано 72 доклада. По результатам конференции подготовлены 19 русскоязычных докладов в основных секция конференции и 7 докладов в секции молодых ученых, 28 докладов на английском языке, 18 докладов оформлены как в русскоязычном, так и в англоязычном вариантах (при этом статьи являются не просто переводом одного и того же текста на два языка, а имеют существенные отличия из-за разного объема публикаций, требований к структуре материала и количеству ссылок библиографического списка). В настоящем сборнике опубликованы русскоязычные доклады и аннотации англоязычных докладов, материалы конференции с докладами на английском языке размещены в издательстве IOP Science (Великобритания) в отдельном выпуске электронного журнала «Journal of Physics: Conference Series (JPCS)», как материалы конференции ICES-2018 с индексацией в наукометрической базе данных Scopus.

Всего в конференции приняли участие 160 человек из 30 организаций (в том числе 26 вузов и четырех предприятий), расположенных в 16 российских регионах и четырех зарубежных странах:

- Алтайский государственный аграрный университет, г. Барнаул;
- Алтайский государственный университет, г. Барнаул;
- Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород;

- Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород;
- Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир;



- Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка;
- Донецкий национальный технический университет, г. Донецк;
- Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, г. Донецк;
- Забайкальский государственный университет, г. Чита;

г. Чита;

- Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново;
- Казанский государственный энергетический университет, г. Казань;
- Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань;
- Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва;
- Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, г. Москва;
- Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск;
- ООО «ВакууммашЭлектро», г.Ижевск;
- ООО «ЕвроГаз», г.Москва;
- ООО «ТК «Экотранс», г. Белгород;
- ООО «Электросеть-Смоленск», г. Смоленск;
- Политехнический институт Таджикского технического университета им. академика М.С. Осими, г. Худжанд;
- Самарский государственный технический университет, г. Самара;
- Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург;
- Тверской государственный технический университет, г. Тверь;
- Технологический университет, Ирак;
- Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, США;
- Университет Диала, Ирак;
- Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург;
- Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа;
- Филиал Московского энергетического института, г. Волжский;
- Филиал Московского энергетического института, г. Смоленск.

Количественный состав авторов докладов следующий: д-ра техн. наук, профессора – 28 чел.; канд. техн. наук, доценты – 57 чел.; инженеры, ассистенты, старшие преподаватели, представители производства и др. не остепенённые – 28 чел.; аспиранты – 20 чел.; магистранты и студенты – 27 чел. Молодые ученые являлись как соавторами работ своих старших коллег, так и единоличными авторами докладов.

Основная проблематика исследований определялась выделенными секциями, определёнными на основании анализа поступивших заявок:

1. Теплоэнергетика и теплотехника

Рассматривались фундаментальные и практические вопросы в научных областях тепловых и теплообменных процессов, получения тепловой энергии, преобразования теплоты в другие виды энергии, обеспечения потребителей энергетическими ресурсами.

Председатель секции: Бирюков А.Б., д-р техн. наук, проф.

2. Электроэнергетика и электротехника

Рассматривались фундаментальные и практические вопросы в научных областях получения, распределения, преобразования и использования электрической энергии, разработки и оптимизации электронных компонентов.

Председатель секции: Авербух М.А., д-р техн. наук, проф.

3. Энергосбережение и энергоэффективность, экология энергетики

Рассматривались фундаментальные и практические вопросы в научных областях снижения расхода энергетических ресурсов, повышения энергоэффективности в энергетических и теплотехнических системах, энергоэффективности зданий, строений, сооружений, воздействия энергетики на окружающую среду, устранения выбросов и загрязнений, энергетического использования отходов.

Председатель секции: Трубаев П. А., д-р техн. наук, доц.

4. Альтернативные и возобновляемые источники энергии

Рассматривались фундаментальные и практические вопросы в научных областях получения, аккумулирования и использования энергии от альтернативных и возобновляемых источников.

Председатель секции: Гашо Е.И., канд. техн. наук, доц.

5. Энергетика, энерго и ресурсосбережение в технологиях

Рассматривались фундаментальные и практические вопросы в научных областях теплотехнологии, энерго- и ресурсосбережения в промышленных производствах.

Председатель секции: Севостьянов В.С., д-р техн. наук, проф.



Конференция продемонстрировала дальнейшее утверждение инновационных подходов на основе фундаментальных исследований, выявила проблемы и новые задачи на пути усиления междисциплинарных связей в энергетической отрасли. Было показано повышение потребности в обеспечении ответственной промышленности современными научно-техническими разработками, усиление взаимодействия ВУЗов и промышленности.



Кроме научной программы гости конференции совершили экскурсию по БГТУ им. В.Г. Шухова, городу Белгороду, побывали на объектах альтернативной энергетики – биогазовой станции «Лучки» мощностью 3,6 МВт, солнечной и ветряной электростанциях, посетили диораму «Огненная дуга» и музей-заповедник Прохоровское поле – Третье ратное поле России.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Трубаев П.А., председатель, д-р техн. наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологий БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород);

Белоусов А.В., зам. председателя, канд. техн. наук, доцент, директор института энергетики, информационных технологий и управляющих систем, заведующий кафедрой электроэнергетики и автоматики БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород);

Бирюков А.Б., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплофизики ДонНТУ (Донецк);

Ботвиньев А.Н., заместитель начальника департамента жилищно-коммунального хозяйства Белгородской области – начальник управления развития топливно-энергетического комплекса (г. Белгород);

Гашо Е.И., канд. техн. наук, доцент кафедры Промышленных теплоэнергетических систем Национального исследовательского университета «МЭИ», эксперт аналитического центра при правительстве РФ (Москва);

Карпук И.А., канд. техн. наук, доцент, декан факультета автоматизации и электротехнических систем Донбасского государственного технического университета (г. Алчевск Луганской обл.);

Кожевников В.П., канд. техн. наук, доцент, заслуженный энергетик РФ, заведующий кафедрой энергетики теплотехнологий БГТУ им В.Г. Шухова (Белгород);

Мозговой Н.В., д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности ВГТУ (г. Воронеж);

Радченко В.В., канд. экон. наук, депутат Совета депутатов города Белгорода, директор ООО «Центр энергосервисных технологий» (г. Белгород);

Севостьянов В.С., д-р техн. наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, заведующий кафедрой технологических комплексов, машин и механизмов БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород);

Удовиченко З.В., канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской архитектурно-строительной академии (г. Макеевка Донецкой обл.);

Goran Vučković, PhD, Faculty of Mechanical Engineering in Niš, University of Niš (Niš, Serbia);

Marina Kozhukhova, PhD, College of Engineering & Applied Science, University of Wisconsin–Milwaukee (Milwaukee, USA).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Глаголев С.Н., председатель, д-р экон. наук, профессор, ректор БГТУ им. В.Г. Шухова;

Трубаев П.А., зам. председателя, д-р техн. наук, профессор БГТУ им. В.Г. Шухова;

Белоусов А.В., канд. техн. наук, доцент, директор института ЭИТУС БГТУ им. В.Г. Шухова;

Кошлич Ю.А., канд. техн. наук, директор ООО «НТЦ АСП», доцент кафедры электроэнергетики и автоматике;

Фиронova Е.В., начальник отдела развития топливно-энергетического комплекса и инженерной инфраструктуры Департамента жилищно-коммунального хозяйства Белгородской области.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Проект № 18-08-20138.

1. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 620.9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ МОЩНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ ПРИ ИХ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ С ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ

аспирант **Або Альзахаб О.**

канд. техн. наук, доц. **Аникина И.Д.**

канд. техн. наук, доц. **Амосов Н.Т.**

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

***Аннотация.** В статье рассматривается возможность решения проблемы низкой эффективности систем охлаждения конденсаторов паровых турбин, в период летних режимов работы, путем использования парокомпрессионных тепловых насосов (ПКТН). Расчеты сделаны для тепловой электрической станции «Тишрин» с турбинами типа К-200-130.*

В настоящее время основу энергетики Сирийской арабской республики (САР) составляют паротурбинные электростанции с энергоблоками К-200-130 и энергоблоки К-160-130, парогазовая электростанция, газотурбинная электростанция и гидроэлектростанция (ГЭС). Суммарная установленная мощность источников электрической энергии в Сирии к 2018 году достигла 9600 МВт.

Потеря теплоты в конденсаторе турбины является основным источником потерь тепловой энергии на ТЭС [1]. Эта потеря теплоты зависит в значительной степени от температуры охлаждающей циркуляционной воды. Увеличение температуры охлаждающей воды приводит к снижению эффективности работы конденсационной установки и перерасходу топлива на выработку электрической энергии. В отдельных случаях высокая температура охлаждающей воды может привести к останову электростанции [2].

Цели и задачи работы. Для решения поставленной задачи и оценки взаимного влияния режимов работы оборудования ТЭС на эффективность ТНУ и ее влияние на характеристики ТЭС в целом разработана математическая модель тепловой схемы электростанции с турбинами типа К-200-130 для ТЭС «Тишрин» (Сирия).

Математическое моделирование тепловой схемы производилось с использованием программного продукта «United Cycle» (UC). Моделирование тепловой схемы представляет собой трехэтапную задачу – создание схемы в программной среде, ее параметризация и задание входных данных, определяющих рассчитываемые режимы работы.

Расчет характеристик работы оборудования ТЭС можно производить с использованием нормативно-технической документации или с использованием методов математического моделирования режимов работы ТЭС, которые являются наиболее приемлемым методом для исследования динамики показателей работы теплоэлектростанций. Однако созданные математические модели должны учитывать реальные характеристики работы основного и вспомогательного оборудования ТЭС.

Моделирование тепловых схем ТЭС производилось в САПР United Cycle. Пакет United Cycle предназначен для решения задач определения наилучших структуры и состава оборудования теплоэнергетического объекта и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы [3].

Этапы процесса создания математической модели в САПР United Cycle можно представить следующим образом: создание математической модели тепловой схемы в конструкторе, создание модели объекта через параметризацию этой тепловой схемы и расчет режимов работы [4].

Первый этап работы связан с созданием тепловой схемы в конструкторе. Математическая модель принципиальной тепловой схемы (ПТС) ТЭС должна обеспечивать возможность имитации такого же разнообразия эксплуатационных режимных состояний, какими обладает реальная ТЭС [5]. Этап создания расчетной тепловой схемы определяет состав уравнений теплового и материального баланса, описывающих работу ТЭС. Для определения коэффициентов, входящих в уравнения математической модели, выполняется этап параметризации созданной тепловой схемы [6]. Для ТЭС «Тишрин», как и для всех эксплуатируемых станций, этап параметризации состоял из нескольких частей: параметризация по заводским характеристикам оборудования, и корректировка этих характеристик с учетом фактического состояния оборудования теплоэлектростанции [7].

Адекватность математической модели – это соответствие результатов вычислительного эксперимента поведению реального объекта. Проверка адекватности математической модели, по отношению к ре-

альной ТЭС, производилось методом поэтапного анализа параметров рассчитанных режимов с помощью САПР «United Cycle» (расчет UC) и контрольных параметров работы ПТУ-блока, полученных от персонала станции.

На рис. 1 представлена расчетная схема ПТУ-блока, смоделированная в САПР «United Cycle». Математическая модель включает паровой котел с промежуточным перегревом пара, турбину типа К-200-130, конденсатор типа К-200 и систему регенеративного подогрева питательной воды.

В табл. 1 приведено сравнение контрольных параметров работы энергоблока К-200-130 с учетом климатических условий Сирии и рассчитанных параметров в САПР United Cycle.

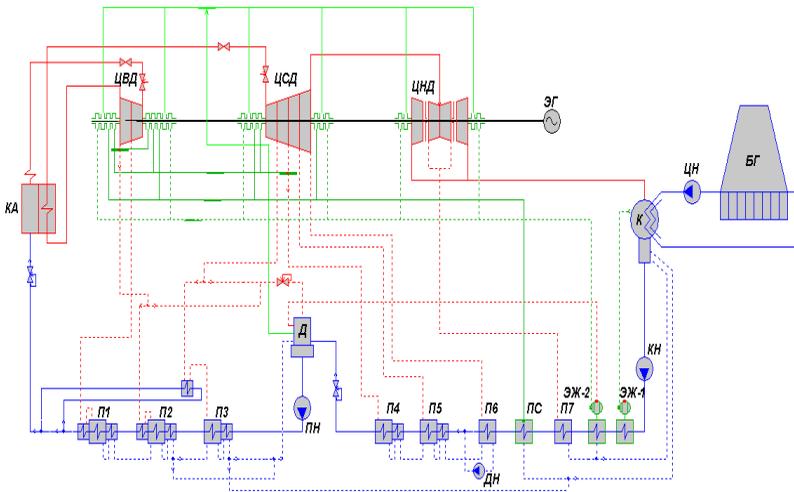


Рис. 1. Тепловая схема ТЭС «Тишрин» для математической модели в САПР «United Cycle»:

КА – паровой котел с промежуточным перегревом; ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦСД – цилиндр среднего давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; ЭГ –электрический генератор; К – конденсатор паровой турбины; ЦН – циркуляционный насос; БГ – башенная градирня; КН – конденсатный насос; П1- П2- П3 (ПВД) – группа подогревателей высокого давления; П4- П5- П6- П7 (ПНД) – группа подогревателей низкого давления; ПС – подогреватель сальниковый; ЭЖ-1 и ЭЖ-2 – эжектор с охладителем; ПН – питательный насос; Д – деаэрастор

Таблица 1

Сравнение контрольных параметров работы ТЭС «Тишрин»
и рассчитанных параметров в САПР United Cycle

Параметр	Данные модели	Контрольные	Отклонение, %
Расход свежего пара, т/ч	623,4	623,4	0
Температура свежего пара, °С	540	540	0
Давление свежего пара, кг/см ²	130	130	0
Температура пара промежуточного перегрева, °С	540	540	0
Расход пара на промежуточный перегрев, т/ч	539	534	0,9
Расход циркуляционной воды, т/ч	23000	23000	0
Температура циркуляционной воды на входе в конденсатор, °С	33	33	0
Температура циркуляционной воды на выходе из конденсатора, °С	43,69	43,52	0,4
Давление в конденсаторе, кг/см ²	0,155	0,156	0,6
Температура циркуляционной воды на входе в конденсатор (летний режим), °С	43	43	0
Температура циркуляционной воды на выходе из конденсатора (летний режим), °С	54,32	54,17	0,3
Давление в конденсаторе (летний режим), кг/см ²	0,224	0,225	0,4
Мощность на клеммах генератора, МВт	193,3	193	0,15
Мощность на клеммах генератора (летний режим), МВт	180	180	0
Температура питательной воды на входе в котел, °С	249,8	250	0,08
Температура окружающей среды, °С	26	26	0
Температура окружающей среды (летний режим), °С	36	36	0
Давление наружного воздуха, кПа,	0,1013	0,1013	0
Влажность наружного воздуха, %	75	75	0

Необходимо отметить, что основные технические характеристики конденсационных энергоблоков типа К-200-130 ТЭС «Тишрин»: номинальная мощность (200-210) МВт, давление острого пара (127,5-130) кгс/см², температура 540 °С, расход пара при номинальной нагрузке 657 т/ч, давление в конденсаторе (0.0153-0.156) кгс/см². Повышение давления в конденсаторе приводит к снижению мощности энергоблока. При изменении давления в конденсаторе на 0,01 кгс/см² мощность турбины изменяется на 1,9 МВт, что приводит к изменению экономичности энергоблока на 0.95 % [8].

Предлагается, для снижения температуры охлаждающей воды на входе в конденсатор турбины, в летний период, на тепловых электростанциях Сирии использовать тепловые насосы (рис. 2).

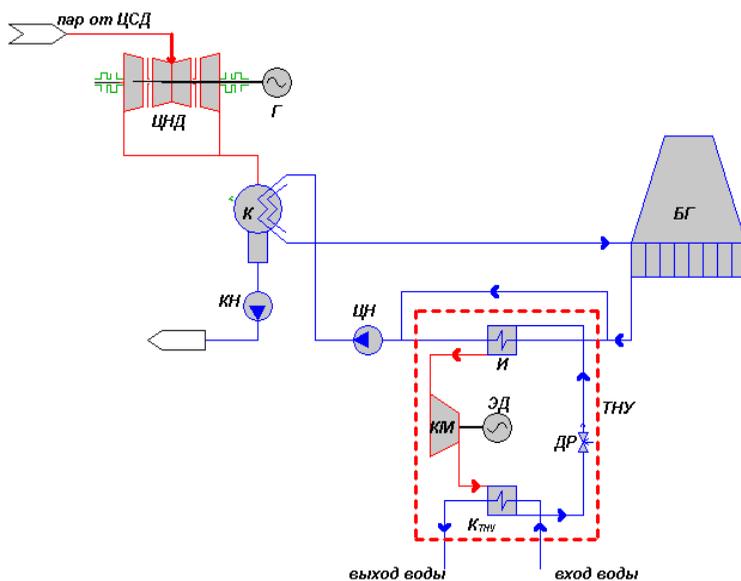


Рис. 2. Схема использования парокомпрессионной теплонасосной установки (ТНУ) на ТЭС «Тишрин»:

ТНУ – теплонасосная установка; И – испаритель ТНУ; КМ – компрессор ТНУ; И – испаритель ТНУ; КМ – компрессор ТНУ; И – испаритель ТНУ; КТНУ – конденсатор ТНУ; ДР – дроссельный вентиль ТНУ; ЭД – электродвигатель ТНУ

Выводы по работе

1. Разработана математическая модель ТЭС «Тишрин» с возможностью подключения в тепловую схему ТНУ.
2. Использование тепловых насосов на сирийских электростанциях, в летний период, позволит увеличить мощность турбин К-200-130 от 180 до 200 МВт.
3. Математическая модель обладает возможностью имитировать эксплуатационные режимы работы ТЭС в широком диапазоне.

Библиографический список

1. **Dosa I.** Power plant waste heat recovery for household heating using heat pumps [Электронный ресурс] / XXVIII microCAD Int. Multidisciplinary Scientific Conf. Miskolc (Hungary), 2014. 9 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/281310301_Power_Plant_Waste_Heat_Recovery_for_Household_Heating_Using_Heat_Pumps.
2. **Або Альзахаб О., Амосов Н.Т., Аникина И.Д.** Использование тепловых насосов в энергетическом комплексе Сирийской Арабской Республики // Неделя науки СПбПУ. СПб, 2017 г. С. 30–32.
3. Software 'United Cycle' for simulation of flow sheets of power plants / S.N. Romanov, A.G. Kutakhov, N.I. Zhuk et al // ECOS-2003. Kopenhagen, 2003. С. 1691–1696.
4. **Казарова С.А.** Тепловые схемы ТЭС и АЭС. СПб: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-е, 1995. 392 с.
5. 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.
6. Автоматизированное проектирование тепловых схем и расчет переменных режимов ПГУ ТЭС и АЭС / В.М. Боровков, С.А. Казарова, А.Г. Кутахов, С.Н. Романов // Теплоэнергетика. 1993. № 3. С. 5–9.
7. 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.
8. Теплообменники энергетических установок: Учебное электронное издание [Электронный ресурс] / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин и др. // Екатеринбург, УрФУ. 2015. URL: <http://openedu.urfu.ru/files/book/>.

ВАРИАНТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ КОТЛОВ ТИПА ТП-100 ЭНЕРГОБЛОКОВ 200 МВт

д-р техн. наук, проф. **Бирюков А.Б.**
аспирант **Семергей В.А.**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

***Аннотация.** В топливно-энергетическом комплексе уголь является основным технологическим сырьем и энергетическим топливом. Около двух третей добываемых углей используются в энергетике (на ТЭС). Традиционно применяемая технология сжигания пылевидного угля на ТЭС требует использования высокореакционного топлива (мазута или природного газа) для розжига котла и набора определенной минимальной нагрузки, а также небольшого постоянного расхода газа/мазута (т.н. «подсветки») при пониженных нагрузках, при изменениях режима работы в энергосистеме или при ухудшении качественных показателей угольного топлива количество мазута или газа на пуски и подсветку составляет 10-30% тепловой мощности котла. Сжигание газа/мазута позволяет поддерживать необходимую температуру факела в топке, но химические условия сжигания угля при этом резко ухудшаются. Совместное сжигание двух различных видов топлива в одном топочном объеме приводит к негативным последствиям (неполному сгоранию твердого топлива, снижению надежности работы котла, быстрому износу оборудования, экологическим проблемам и пр. Указанные технологические проблемы, а также высокие цены газа и мазута приводят к необходимости сокращения их потребления ТЭС и обеспечение максимально возможного использования твердого топлива.*

Целью данной работы является выбор вариантов реконструкции котлов типа ТП-100, позволяющих стабилизировать условия горения топлива, уменьшить расход подсветочного топлива, и улучшить выжигание угля.

Анализ способов реконструкции

Проанализированы возможные варианты совершенствования технологии сжигания ПУТ в топках ТП-100. Для реконструкции энергетических котлов типа ТП-100 энергоблоков 200 МВт согласно литературным данным и опыту авторов в области теплоэнергетики на постсоветском пространстве имеется опыт проведения следующих мероприятий:

- использование добавок активного горения, например, анакларида «РА-ГЕН-Ф» при сжигании твёрдого топлива;
- внедрение в процесс сжигания твердого топлива технологии XPlate™;
- совершенствование конструкции основных горелок;
- изменение схемы подачи угольной пыли высокой концентрации для осуществления ее предварительной тепловой обработки;
- замена обычных щелевых топок на газоплотные.

Для дальнейшего рассмотрения в данной работе выбраны три направления совершенствования работы котлов ТП-100 как наиболее реализуемые в практических условиях, результативные и воспроизводимые:

1) замена двухулиточных пылегазовых горелок, выполненных по проекту СКБ ВТИ, на улиточно-лопаточные двухканальные по вторичному воздуху, которые максимально соответствуют требованиям отраслевого стандарта ОСТ 108.030.26–78;

2) изменение схемы подачи угольной пыли высокой концентрации путём переврезки ППВК в трубопроводы первичного воздуха к горелкам котла;

3) замена обычных щелевых топок на газоплотные.

Замена двухулиточных пылегазовых горелок на улиточно-лопаточные

Принцип действия улиточно-лопаточной горелки основан на использовании вихря воздушных потоков, выходящих в топочный объём в виде трёх расположенных концентрически усеченных конусов. Внутри расположен конусный поток пылевоздушной смеси, а снаружи – два потока вторичного воздуха [1]. Двигаясь в глубину топки, воздушные потоки захватывают с собой часть топочных газов, вследствие чего внутри конусообразного воздушного потока возникает разрежение, тем больше, чем больше уносится газов вместе с воздухом. Это вызывает устойчивое и непрерывное движение (рециркуляцию) топочных газов из глубины топки к внутренней и наружной поверхности конусообразных воздушных потоков.

Первичный воздух (аэросмесь) подается в улитку тангенциально.

Вторичный воздух подводится к горелке аксиально и поступает в два коаксиальных кольцевых канала – периферийный, примыкающий к амбразуре, и внутренний, расположенный вокруг канала первичного воздуха. На выходных участках каналов расположены лопаточные

завихрители - загнутые под определённым углом к оси горелки лопатки с плавным входом. Подача вторичного воздуха в оба канала общая.

Новая конструкция горелки позволит:

- понизить уровень содержания горючих в уносе предположительно на 4–5 %;
- обеспечить требуемые скорости вторичного и первичного воздуха и их соотношения в рабочем диапазоне нагрузок энергоблока;
- снизить расход природного газа на подсветку факела и эффективно сжигать совместно в одной горелке два вида топлива.
- температура ядра факела повысится на 40–60°С и достигнет 1700–1720°С.
- повысится эффективность топливоиспользования на ТЭС при сжигании низкорекреационного топлива марки АШ.

Изменение схемы подачи угольной пыли высокой концентрации (ПВК)

Работа таких пылепитателей основана на принципе предварительного псевдосжижения угольной пыли в бункере над аэрационными пылепитателями (АПП), т.е. изменение транспортно-дозировочных характеристик пыли и только затем осуществление дозировки и подачи пыли в транспортный трубопровод непосредственно к горелкам котла [2].

Однако, как показал длительный опыт эксплуатации систем ПВК в горелки на котлах различной производительности, они так же имеют недостатки в части влияния на процессы эффективного сжигания пыли в топочной камере. Эти недостатки, прежде проявляются в имеющейся пульсации давления пылевоздушной смеси в пылепроводах, недостаточным прогревом угольной пыли перед поступлением в топку по условиям более раннего воспламенения, наличием неравномерного распределения пыли по сечению канала первичного воздуха на выходе из горелки. Перечисленные недостатки систем ПВК влияют на увеличение содержания горючих в уносе по отношению к традиционным системам пылеприготовления, а также к необходимости подсветки пылеугольного факела газом или мазутом, что приводит к значительному увеличению удельного расхода топлива [3].

Анализ систем высококонцентрированной подачи пыли в горелки показывает, что недостатки заложены в работе отдельного оборудования, входящего в систему ПВК, которые вызваны, как недостатками проекта, в т. ч. конструкторских проработок, так и недостатками монтажных работ при трассировке пылепроводов [4].

Предлагается изменить схему подачи ПВК путём переврезки ПВК непосредственно от устья горелки на минимальное расстояние 5 м и врезать подачу ПВК в первичный воздухопровод подающий первичный воздух к горелкам котла.

После переврезки ППВК в трубопроводы первичного воздуха к горелкам котла, за счет более раннего смешения угольной пыли в трубопроводе первичного воздуха получили следующий результат:

- значительно уменьшится пульсация давления пылевоздушной смеси в пылепроводах к горелкам;
- улучшится равномерное распределение угольной пыли перед поступлением в топку котла;
- равномернее станет распределение угольной пыли по сечению канала первичного воздуха на выходе из горелки;
- за счет высокой температуры первичного воздуха (около 400 °С), происходит более тщательный прогрев пылевоздушной смеси перед горелками котла.

Данные улучшения позволяют:

- практически полностью сократить подсветку пылеугольного факела газом на низких нагрузках на энергоблоках;
- понизить уровень содержания горючих в уносе предположительно до 5 %.

Очевидно, что для достижения наилучших результатов технологические и конструктивные параметры должны корректироваться на основании результатов предварительной расчетной проработки. Для рассмотрения такой сложной задачи, как выгорание факела твердого топлива при его сжигании в факеле наиболее предпочтительным является использование метода математического моделирования.

Замена обычных щелевых топок на газоплотные

Нормативные присосы холодного воздуха в топочную камеру обычной щелевой топки составляют 10 %. Фактически данный показатель на работающих энергоблоках составляет 11 - 15 %, что приводит к уменьшению доли горячего вентиляторного воздуха, захлаживанию ядра факела в топке и уменьшению к.п.д. котла, в свою очередь все эти факторы сказываются на увеличении удельного расхода топлива [5].

Таким образом, переход от обычной топки к газоплотному исполнению позволило снизить присосы холодного воздуха в топочную камеру до 5 %, что позволило сократить механический недожог топлива на 0,2%. Этот результат объясняется увеличением средней температу-

ры факела при сохранении концентрации кислорода в топке. При управлении работой ДВ по принципу обеспечения заданной концентрации кислорода на выходе из топки снижение присосов приведет к увеличению доли горячего вентиляторного воздуха. При этом средняя температура факела увеличивается на 11°C. Таким образом, это позволяет увеличить значение константы скорости реакции на 7% и получить снижение механического недожога на 7%. Этот результат является вполне ощутимым и дополняет основной положительный эффект, получаемый от перехода на газоплотные топки, связанный со снижением потерь теплоты с уходящими газами.

Выводы по работе

В данной работе предложено усовершенствование котлов ТП-100 путем применения улитоchno-лопаточных горелок и совершенствование их параметров, изменение схемы подачи угольной пыли высокой концентрации путём переврезки ПВК в трубопроводы первичного воздуха к горелкам котла, а так же замена щелевых топок на газоплотные. Выполнение этих мероприятий приведёт к снижению удельного расхода топлива на производство электрической энергии за счет:

- снижения содержания горючих веществ в уносе до 10%;
- снижения расхода природного газа на подсветку факела и эффективность сжигания совместно в одной горелке два вида топлива, основного, твердого топлива (угольная пыль), и подсветочного, природного газа либо мазута;
- снижения присосов холодного воздуха в топку котла до 5 %;
- снижение потерь теплоты с уходящими газами.

Библиографический список

1. ОСТ 108.030.26-78. Горелки вихревые пылеугольные, пылегазовые и компоновка их с топками. Методы расчета и проектирования. Издание официальное. Л., НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова, 1979. 64 с.
2. Техническая эксплуатация электрических станций и сетей. Правила. Киев, ОЭП ОРИФЛЭ 2003. 628 с.
3. **Трембовля В. И., Фингер Е. Д., Авдеева А. А.** Теплотехнические испытания котельных установок. М., Энергия, 1977. 296 с.
4. **Бирюков А.Б., Сафьянц С.М., Семергей В.А., Гнигив П.А.** Методика определения времени задержки воспламенения при сжигании пылеугольного топлива в конкретных условиях. // Вестник ИГЭУ, 2018. № 5. С. 33–38.
5. **Бирюков А.Б., Семергей В.А., Шевелева И.И.** Исследование увеличения к.п.д. котла, сжигающего пылеугольное топливо, при повышении степени газоплотности топки//Вестник ИГЭУ, 2018. № 3. С. 14–19.

КОНСТРУКЦИЯ И ВАРИАНТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНДЕНСАЦИОННОГО ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА

доц. Губарев А.В.

канд. техн. наук, доц. Лозовой Н.М.

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

***Аннотация.** В данной статье рассмотрены назначение, актуальность использования, особенности конструкции и принцип действия разработанного сотрудниками БГТУ им. В.Г. Шухова топливосберегающего конденсационного водогрейного котла, предлагаемого для установки в качестве теплогенератора в тепловых источниках автономных систем теплоснабжения. Критически оценены достоинства и недостатки различных вариантов конструкции котла и его основных узлов, произведено сравнение и указаны преимущества модернизированных конструкций по сравнению с прототипами.*

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

В настоящее время в числе основных проблем, стоящих перед человечеством, наряду с другими могут быть выделены следующие: постепенное истощение запасов углеводородного топлива в недрах планеты (особенно это касается тех месторождений, добыча топлива из которых является относительно недорогой) [1], загрязнение окружающей среды (тепловое, токсичными соединениями, парниковообразующими газами) и связанное с последним изменение климата [2]. В связи с этим в энергетике и промышленности имеют место тенденции к снижению потребления традиционных углеводородных топлив для выработки энергии и производства работы за счет использования нетрадиционных источников энергии [3], вторичных энергоресурсов [4], а также повышения энергетической эффективности и экологичности агрегатов, работающих на углеводородных топливах и систем, в которых такие агрегаты используются [5].

В качестве одного из способов снижения потребления углеводородных топлив и повышения экологической безопасности в такой важной сфере, как теплоснабжение потребителей различного назначения, может быть предложено использование децентрализованных си-

стем теплоснабжения с установкой в их тепловом источнике топливосберегающего конденсационного водогрейного котла, конструкция которого разработана сотрудниками Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова [6].

Целью данной работы является объяснение актуальности использования вышеуказанных систем теплоснабжения, а также всестороннее рассмотрение конструкции конденсационного водогрейного котла, различных вариантов ее исполнения, их достоинств и недостатков.

Высокие энергетические и экологические показатели таких систем обуславливаются следующими их особенностями. В децентрализованных системах отсутствуют тепловые сети большой протяженности, в которых имеют место весьма значительные тепловые потери, достигающие 20% от выработки, складывающиеся как из потерь в окружающую среду, через стенки теплопроводов и теплоизоляцию, так и потерь с утечками теплоносителя. Помимо этого, регулирование нагрузки в децентрализованных системах теплоснабжения значительно проще по сравнению с регулированием в централизованных системах. Таким образом, отпуск теплоты тепловым источником децентрализованных систем максимально соответствует ее потреблению абонентами, что также уменьшает тепловые потери на величину, достигающую 15%. Кроме того, тепловые сети требуют обслуживания и ремонта, что повышает эксплуатационные затраты [7].

Установка в тепловом источнике децентрализованной системы теплоснабжения теплогенераторов конденсационного типа также способствует существенной экономии топлива [8]. Как известно, продукты сгорания углеводородного топлива содержат значительное количество водяных паров. Например, доля водяного пара в составе продуктов сгорания природного газа составляет 10...12%. В конденсационных котлах происходит охлаждение продуктов сгорания до температур, значение которых ниже температуры точки росы для газов данного состава. Вследствие этого, содержащиеся в дымовых газах водяные пары частично конденсируются, а теплота их конденсации может быть полезно использована. Таким образом, в теплогенераторах конденсационного типа тепловые потери с уходящими газами могут быть значительно снижены (например, при сжигании природного газа, на величину, достигающую 15%) за счет снижения температуры газов и за счет полезного использования скрытой теплоты конденсации содержащихся в них водяных паров [9].

Повышение экологических характеристик децентрализованных систем теплоснабжения с конденсационным водогрейным котлом, разработанным сотрудниками БГТУ им. В.Г. Шухова достигается благодаря следующим их достоинствам. Во-первых, в таких системах удельный расход сжигаемого топлива в 2 раза ниже, чем в централизованных системах, из-за их более высокой энергетической эффективности. Во-вторых, конденсационная часть указанного теплогенератора является эффективным мокрым сажеуловителем. В-третьих, в случае организации впрыска воды в топку такого котла, существенно снижается образование термических оксидов азота, и при этом не увеличиваются тепловые потери с уходящими газами [10].

Конструктивное исполнение рассматриваемого конденсационного водогрейного котла может быть адаптировано к конкретным условиям его эксплуатации, требованиям к компоновке оборудования в помещении котельной, а также характеристикам и параметрам рабочих сред.

Основными узлами конденсационного водогрейного котла являются радиационная и контактно-рекуперативная части, а также связывающая их адиабатная часть, включающая в себя бак конденсата [11]. В радиационной части, выполняемой в основном аналогично традиционным конструкциям современных газотрубных котлов, происходит сжигание топлива, а также нагрев воды, направляемой на нужды отопления. В адиабатной части продукты горения увлажняются, проходя через факелы распыла конденсата, и адиабатно охлаждаются. В контактно-рекуперативной части происходит глубокое охлаждение продуктов сгорания (до температуры около 35°C), конденсация большей части содержащихся в них водяных паров, а также нагрев воды, направляемой на покрытие нужд горячего водоснабжения.

По технологическим соображениям контактно-рекуперативная часть всегда располагается вертикально, в то время как радиационная часть может располагаться либо горизонтально, либо вертикально (рис. 1). В качестве достоинства горизонтального расположения радиационной части можно выделить возможность использования в таких конструкциях любых промышленных газовых горелок. В варианте конструкции с вертикальной топкой многие горелочные устройства применяться не могут, так как не допускают рабочего положения “горелка над факелом” [12]. Существенным недостатком горизонтальной компоновки радиационной части является неравномерный нагрев жаровой трубы по ее сечению, так как имеет место поднятие факела по мере удаления его от устья горелки. Результатом данного явления бу-

дет неравномерное температурное удлинение образующих жаровой трубы и возрастание температурных напряжений в ней, что может привести к серьезным авариям. Также преимуществом котлов с вертикальной компоновкой радиационной части являются меньшие их размеры в плане по сравнению с котлами, оборудованными горизонтальной топкой. При этом высота помещения должна обеспечивать выполнение требований нормативных документов к помещениям котельных, а, кроме того, обеспечивать возможность монтажа и демонтажа горелочного устройства и радиационной части.

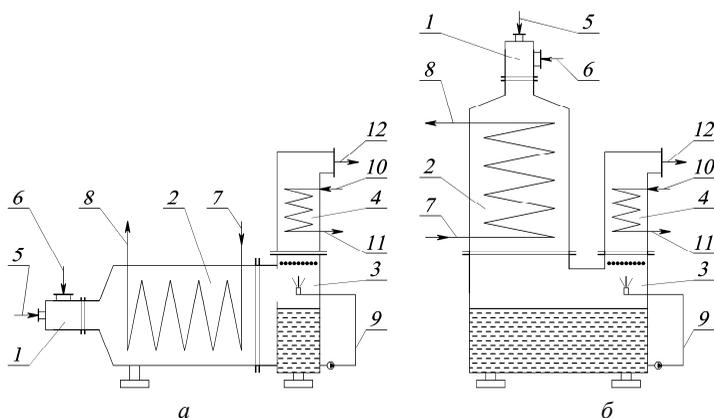


Рис. 1. Варианты расположения радиационной части: *а* – горизонтальное; *б* – вертикальное; 1 – горелка; 2 – радиационная часть; 3 – адиабатная часть; 4 – контактно-рекуперативная часть; 5 – природный газ; 6 – воздух; 7 – обратная вода системы отопления; 8 – прямая вода системы отопления; 9 – конденсат; 10 – холодная вода; 11 – нагретая вода на нужды горячего водоснабжения; 12 – уходящие газы

По технологическим соображениям необходимо предусматривать трехходовую схему движения продуктов сгорания в радиационной части котла. Существует два наиболее очевидных способа организации такой схемы движения газов (рис. 2). При первом способе жаровая труба представляет собой реверсивную топку (рис. 2, *а*), часть ее, противоположная горелке, заглушена с помощью охлаждаемого водой днища. Продукты горения, двигающиеся в центральной части топки, достигнув днища жаровой трубы, разворачиваются на 180°С и движутся по периферии топки в сторону горелки. Выйдя из жаровой трубы,

топочные газы в поворотной камере разворачиваются на 180°C и направляются в дымогарные трубы, пройдя которые поступают в адиабатную часть котла. При втором способе газы проходят жаровую трубу в одном направлении (рис. 2, б). На выходе из жаровой трубы расположена поворотная камера. В этой поворотной камере топочные газы разворачиваются на 180°C и далее поступают в дымогарные трубы. Дымогарные трубы имеют U-образную форму, поэтому продукты сгорания в них совершают два хода.

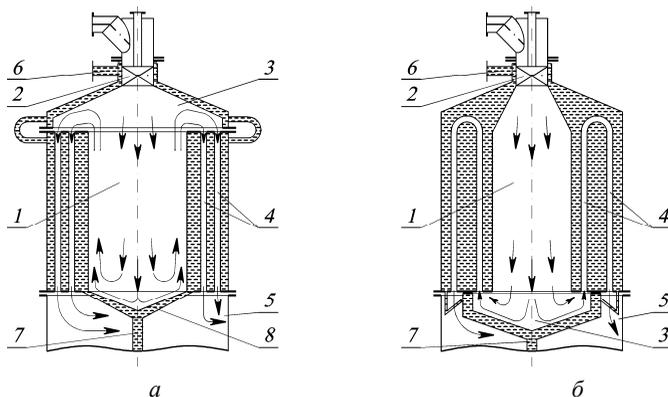


Рис. 2. Схемы радиационной части:

а – с реверсивной топкой; *б* – с U-образными дымогарными трубами; 1 – жаровая труба; 2 – горелка; 3 – поворотная камера; 4 – дымогарные трубы; 5 – адиабатная часть; 6 – патрубок отвода прямой воды системы отопления; 7 – патрубок подвода обратной воды системы отопления; 8 – днище жаровой трубы

Существенным недостатком конструкции радиационной части с реверсивной топкой является необходимость использования компенсирующих устройств во избежание разрушения элементов этой части из-за напряжений, возникающих вследствие неравномерности температурных удлинений жаровой трубы и дымогарных труб, а также корпуса. Одним из вариантов компенсации температурных удлинений в такой конструкции является использование гофрированной жаровой трубы. В конструкции радиационной части с U-образными трубами дымогарные трубы могут свободно удлиняться в продольном направлении, а вероятность возникновения разрушений металла или сварных соединений, вызванных температурными напряжениями, существенно

уменьшается. Однако в такой конструкции радиационной части весьма затруднен доступ к сварным швам в местах крепления жаровой трубы и U-образных труб к трубной доске.

Для обеспечения возможности доступа к указанным сварным швам без разрушения деталей радиационной части котла может быть предложен вариант конструкции рассматриваемого узла, когда поворотная камера выполняется в виде охлаждаемого водой усеченного конуса, причем диаметр меньшего основания конуса обеспечивает доступ к сварным швам в местах крепления жаровой трубы и дымогарных труб к трубной доске [13].

Покинув радиационную часть продукты горения топлива проходят через адиабатную часть, основными элементами которой являются бак конденсата, форсунки и опорно-распределительная решетка. Форсунки распыляют конденсат, забираемый из бака, в поток дымовых газов, температура которых превышает 250°C. Конденсат при этом частично испаряется, а газы соответственно увлажняются и адиабатно охлаждаются до температуры, приближающейся к температуре мокрого термометра. При прохождении образовавшегося двухфазного газожидкостного потока через опорно-распределительную решетку происходит инверсия фаз. Таким образом, над решеткой – в контактно-рекуперативной части котла – формируется пенный двухфазный поток, который характеризуется высокой интенсивностью тепло- и массопереноса между фазами. В контактно-рекуперативной части установлен трубный пучок, в который подается холодная вода хозяйственно-питьевого качества. Вода, нагревшись в трубном пучке, до температур, достигающих 50...60°C, подается на нужды горячего водоснабжения. Газо-жидкостный поток, проходя в межтрубном пространстве трубного пучка, охлаждается. При этом происходит конденсация большей части (до 80%) содержащихся в газе водяных паров. Над трубным пучком скорость газожидкостного потока резко падает и происходит гравитационная сепарация капель конденсата из газового потока. Конденсат отбрасывается к стенкам корпуса и отводится в бак конденсата. Для более качественного разделения газа и жидкости предусматривается установка инерционного каплеуловителя перед патрубком уходящих газов.

Поверхность теплообмена трубного пучка образуется прямыми трубами. Использование труб круглого сечения в контактно-рекуперативной части рассматриваемого конденсационного водогрейного котла не рекомендуется, так как в таком случае снижается

коэффициент теплоотдачи и повышается гидравлическое сопротивление и габариты котла. Для повышения интенсивности теплообмена, а также компактности контактно-рекуперативной части наиболее целесообразным представляется использование расположенных в шахматном порядке плоскоовальных труб, которые могут изготавливаться обжатием стандартных труб круглого сечения. При этом концы труб дополнительно обжимаются в горизонтальном направлении (рис. 3).

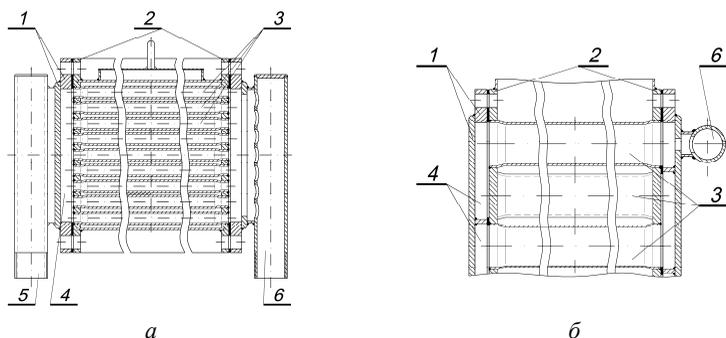


Рис. 3. Трубный пучок контактно-рекуперативной части:

a – горизонтальный разрез; *б* – вертикальный разрез; 1 – крышка трубной решетки; 2 – трубная решетка; 3 – плоскоовальная труба; 4 – перепускная водяная камера; 5 – патрубок отвода нагретой воды; 6 – патрубок подвода холодной воды

Такое дополнительное обжатие концов труб позволяет соблюсти технологические требования к креплению труб в трубных досках [14].

Выводы. Использование децентрализованных систем с установкой в их тепловом источнике водогрейных котлов конденсационного типа позволяет в 2 раза снизить удельные затраты топлива на нужды теплоснабжения потребителей. В качестве таких теплогенераторов может весьма эффективно использоваться конденсационный водогрейный котел, разработанный сотрудниками БГТУ им. В.Г. Шухова. Конструкция данного котла позволяет адаптировать его к различным условиям использования. Данный котел является также эффективным мокрым сажеуловителем, а, кроме того, при некоторой доработке его конструкции позволяет снизить образование термических оксидов азота при сохранении высоких технико-экономических показателей.

Библиографический список

1. Integration of direct carbon and hydrogen fuel cells for highly efficient power generation from hydrocarbon fuels / N. Muradov, P. Choi, F. Smith, G. Bokerman // *Journal of Power Sources*. 2010. № 195. P. 1112–1121.
2. **Nordell B.** Thermal pollution causes global warning // *Global and Planetary Change*. 2003. № 38. P. 305–312.
3. **Salameh M.G.** Can renewable and unconventional energy sources bridge the global energy gap in the 21st century? // *Applied Energy*. 2003. № 75. P. 33–42.
4. **Richterová V.** Utilization of secondary energy resources in chemical industry // *Energy Conversion and Management*. 1984. № 24. P. 27–32.
5. **Trubaev P.A., Zajtsev E.A., Besedin P.V.** Exergic analysis of technological heat devices // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. № 8(4). P. 24968–24975.
6. Condensing Hot Water Boiler: Applicability, Design, Research / V.P. Kozhevnikov, M.I. Kuleshov, A.V. Gubarev etc. // *Advances in Environmental Biology*. 2014. № 8(13) P. 122–127.
7. 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. // *Advances in Environmental Biology*. 2014. № 8 (13). P. 89–93.
8. The role of the design and operation of individual heating systems for the energy retrofits of residential buildings / J. Terés-Zubiaga, A. Campos-Celador, I. González-Pino, G. Diarce // *Energy Conversion and Management*. 2016. № 126. P. 736–747.
9. 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.
10. Повышение экологической безопасности систем теплоснабжения / М.И. Кулешов, В.И. Беляева, В.П. Кожевников и др. // *Экология и промышленность России*. 2012. № 7. С. 12–13.
11. **Горшколов Г.М., Кулешов М.И., Беляева В.И.** Решение проблемы энергосбережения и повышения безопасности в коммунальной сфере // *Безопасность труда в промышленности*. 2002. № 7. С. 33–35.
12. Пат. 2411420 Рос. Федерация, МПК 7 F 24 Н 1/00. Конденсационный водогрейный котел / Кулешов М.И., Герасимов М.Д., Герасимов Д.М.; № 2009130944/06; заявл. 13.08.09; опубл. 10.02.11, Бюл. № 4. – 8 с.
13. **Кулешов М.И., Губарев А.В.** Модернизация конструкции высокотемпературной части конденсационного водогрейного котла, направленная на повышение его ремонтпригодности // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015. № 2. С. 196–198.
14. **Губарев А.В., Лозовой Н.М.** Интенсификация теплообмена в контактно-рекуперативной части конденсационного водогрейного котла // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2017. № 5. С. 15–18.

КОНВЕКТИВНАЯ ТЕПЛОТДАЧА ПРИСТЕННОГО СЛОЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ГАЗОВ

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.** На основе полуэмпирической гипотезы пристенной турбулентности Прандтля теоретически обоснованы граничные условия на крупной сетке для дискретных уравнений математической модели турбулентного движения и конвективной теплоотдачи газов. Показано, что результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными.*

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

В связи с сильной нелинейностью изменения вблизи стен скорости и температуры турбулентных газов, при численном моделировании конвективной теплоотдачи применяется чрезмерно мелкая сетка [1]. Между тем, размер ячеек сетки в этой области можно многократно увеличить, применив к пристенному неизотермическому слою газов полуэмпирическую гипотезу турбулентности Прандтля, определяющую касательное напряжение, создаваемое турбулентными вихрями:

$$\sigma = \rho (l du/dy)^2,$$

где ρ – плотность; u – скорость газов; y – расстояние по нормали к стенке; l – длина пути смешения.

В тонком неизотермическом слое газов, прилегающем к стенке, сумму молекулярного и турбулентного напряжений можно приравнять к касательному напряжению силы трения $\sigma_{\text{ст}}$ на поверхности стенки:

$$\sigma_{\text{ст}} \equiv \rho_{\text{ст}} u_*^2 \approx \rho \nu du/dy + \rho l^2 (du/dy)^2,$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости; $\rho_{\text{ст}}$ – плотность газов при температуре стенки; u_* – динамическая скорость, заменяющая в формулах касательное напряжение.

Приведем это равенство к безразмерному виду:

$$l_+^2 (du_+/dy_+)^2 \nu_{ст}/\nu + du_+/dy_+ - \rho_{ст} \nu_{ст}/(\rho \nu) = 0,$$

где $\nu_{ст}$ – коэффициент вязкости газов при температуре стенки, u_+ , y_+ , l_+ – безразмерные переменные, определяемые соотношениями величин:

$$u_+ \equiv u/u_*, \quad y_+ \equiv y u_*/\nu_{ст}, \quad l_+ \equiv l u_*/\nu_{ст}.$$

Решение квадратного уравнения запишем формально в виде обратно пропорциональной зависимости производной безразмерной скорости от длины пути смешения:

$$du_+/dy_+ = f_u \sqrt{\rho_{ст}/\rho} / l_+, \quad (1)$$

где f_u – теоретическая функция, приближающаяся к единице вдали от стенки при больших значениях длины пути смешения:

$$f_u = \sqrt{1 + \frac{1}{4l_+^2} \frac{\nu^2}{\nu_{ст}^2} \frac{\rho}{\rho_{ст}}} - \frac{1}{2l_+} \frac{\nu}{\nu_{ст}} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{ст}}}.$$

В частном случае изотермического пограничного слоя эти формулы трансформируются в более простые выражения:

$$(du_+/dy_+)^{изо} = f_l / l_+, \quad (2)$$

$$f_l = \sqrt{1 + 1/(4l_+^2)} - 1/(2l_+).$$

Индекс "изо" отмечает соотношение величин в изотермической среде.

С учетом равенства (1) из гипотезы Прандтля следует безразмерное выражение для соотношения коэффициентов турбулентной ν_T и молекулярной $\nu_{ст}$ вязкости в пристенном слое газов:

$$\nu_T / \nu_{ст} = l_+ f_u \sqrt{\rho_{ст}/\rho}. \quad (3)$$

Формулы (1) – (3) становятся полезными при математическом моделировании турбулентного движения газов, если известна безразмерная длина пути смешения l_+ . Ее изменение определяется экспоненци-

альной формулой Ван Драйста [2], учитывающей приглушение турбулентности вблизи стенки:

$$l_+ = [1 - \exp(-y_+ / A_+)] k y_+, \quad (4)$$

где A_+ – фактор, изменяющийся по квадратичной зависимости [3]:

$$A_+ \approx 30 \left[1 - \left(y_+ / y_+^{\text{лог}} \right)^2 \right].$$

Постоянные $k \approx 0.41$ и $y_+^{\text{лог}} \approx 50$ найдены по экспериментальному распределению скорости вблизи стенки при развитой турбулентности.

В турбулентном пограничном слое выделяют вязкий, буферный и равновесный подслои. Экспоненциальная зависимость (4) плавно сопрягается с линейным законом Прандтля на безразмерном расстоянии от стенки $y_+ = y_+^{\text{лог}}$, образуя формальную границу равновесного подслоя, в котором скорость изменяется по логарифмическому закону. Фактически действие логарифмического закона начинается при $y_+ \approx 0,7 y_+^{\text{лог}}$. Таким образом, можно полагать, что при значениях безразмерной координаты y_+ , находящихся в пределах $(0,7 \dots 1) y_+^{\text{лог}}$, образуется переходная область, формально принадлежащая буферному подслою, но обладающая свойствами, характерными для равновесного подслоя турбулентного пограничного слоя.

При известном факторе A_+ в формуле (4) появилась возможность выполнить численное интегрирование дифференциального равенства (2), позволившее найти соотношение безразмерных величин скорости и координаты $(u_+ / y_+)^{\text{изо}}$ в изотермическом пограничном слое [3]. Оно применено затем для вычисления на поверхности стенки односторонней производной скорости газов в изотермическом пограничном слое:

$$\left(du / dy \right)_{\text{ст}}^{\text{изо}} = \frac{u_P}{y_P} \left(y_+ / u_+ \right)_P^{\text{изо}}. \quad (5)$$

Так как безразмерная производная (2) равна на стенке единице, можно считать, что здесь фактически использовано правило вычисления неизвестной величины по известной доле ее дискретного значения u_P / y_P , найденного в пристенном узле P сетки в ходе итерационного численного решения уравнений математической модели.

Сложнее осуществить такой же подход к формулировке граничных условий в неизотермическом пограничном слое, поскольку в общем случае изменение плотности и вязкости неизотермической среды вблизи стенки остается неизвестным. В этой связи, рассмотрим возможность применения закономерностей изотермического пристенного слоя к неизотермическим условиям охлаждения турбулентных газов.

С помощью равенства (2) введем в правую часть выражения (1) производную от безразмерной скорости изотермических газов:

$$\frac{du_+}{dy_+} = \frac{du_+^{\text{изо}}}{dy_+} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho}} \frac{f_u}{f_l}.$$

Выполним формальное интегрирование этого уравнения:

$$u_+ = u_+^{\text{изо}} \sqrt{\langle \rho_{\text{ст}} / \rho \rangle} \langle f_u \rangle / \langle f_l \rangle.$$

Угловыми скобками отмечены величины, усредненные на участке интегрирования от стенки до ближайшего к ней узла P сетки.

Отсюда следует выражение, позволяющее корректно вычислять в неизотермической среде одностороннюю производную от скорости:

$$(du/dy)_{\text{ст}} = m_u u_P / y_P,$$

где m_u – поправочный множитель к ее дискретному значению,

$$m_u = \left(\frac{y_+}{u_+} \right)_P^{\text{изо}} \frac{\langle f_l \rangle}{\langle f_u \rangle} / \sqrt{\langle \frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho} \rangle}. \quad (6)$$

В диссипативных моделях турбулентная вязкость вблизи стенки обычно находят по следующей формуле [4]:

$$\nu_{\tau} = C_{\mu} f_{\mu} k^2 / \varepsilon, \quad (7)$$

где C_{μ} – эмпирический коэффициент; k – кинетическая энергия турбулентности; ε – скорость диссипации энергии турбулентности; f_{μ} – эмпирическая функция, равная единице вдали от стенки:

$$f_{\mu} \equiv \nu_{\tau} / \tilde{\nu}_{\tau}.$$

Здесь $\tilde{\nu}_T$ – условная турбулентная вязкость, которая может быть найдена по формуле (3) без учета приглушения турбулентности стенкой:

$$\tilde{\nu}_T / \nu_{ст} = \sqrt{(\kappa y_+)^2 \rho_{ст} / \rho + (\nu / \nu_{ст})^2 / 4 - (\nu / \nu_{ст}) / 2}.$$

Величины k и ε вычисляют посредством численного решения дифференциальных уравнений переноса. Поскольку турбулентная вязкость ν_T в пристенных узлах P сетки теперь определена формулой (3), равенство (7) может быть преобразовано в граничное условие к уравнению переноса скорости диссипации турбулентной энергии:

$$\varepsilon_P = C_\mu k_P^2 / \tilde{\nu}_P.$$

При рассмотрении теплопереноса в турбулентном пристенном слое применяют понятие безразмерной температуры среды:

$$T_+ \equiv \rho_{ст} c_{ст} u_* (T - T_{ст}) / q_{ст},$$

где $\rho_{ст}$, $c_{ст}$ – плотность и теплоемкость газа при температуре стенки; $T_{ст}$, T – температура соответственно стенки и газообразной среды вблизи нее; $q_{ст}$ – плотность теплового потока на поверхности стенки.

Примем во внимание, что в пограничном слое обычно пренебрегают конвекционным теплопереносом по направлению к стенке. В результате дифференциальное выражение для плотности кондуктивного теплового потока вблизи стенки представляют в следующем виде:

$$q_{ст} = \rho c \left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_T}{Pr_T} \right) \frac{dT}{dy},$$

где Pr – число Прандтля газов; Pr_T – турбулентное число Прандтля.

Отсюда получают безразмерное равенство:

$$1 = \frac{\rho}{\rho_{ст}} \left(\frac{1}{Pr} \frac{\nu}{\nu_{ст}} + \frac{1}{Pr_T} \frac{\nu_T}{\nu_{ст}} \right) \frac{dT_+}{dy_+}.$$

Отбросим в его правой части первое слагаемое, величина которого в равновесном подслое мала по сравнению со вторым слагаемым.

Применив затем формулу (3) для турбулентной вязкости, получим приближенное выражение производной от безразмерной температуры:

$$dT_+ / dy_+ \approx \text{Pr}_T \sqrt{\rho_{\text{ст}} / \rho} / (f_u l_+).$$

Сравнивая это выражение с формулой (1), установим, что на некотором расстоянии от стенки существует приближенная пропорциональность между безразмерными производными от температуры и скорости неизотермических газов:

$$dT_+ / dy_+ \approx (du_+ / dy_+) \text{Pr}_T / f_u^2.$$

Можно ожидать, что после интегрирования полученного приближенного равенства эта пропорциональность сохранится в равновесном подслое и в прилегающей к нему внешней части буферного подслоя:

$$T_+ \approx \text{Pr}_T u_+ / \langle f_u \rangle^2. \quad (8)$$

Так как в начале координат производная от функции T_+ / Pr равна единице [3], то для вычисления на поверхности стен односторонней производной от температуры достаточно поделить ее дискретное значение на величину $T_+ / (y_+ \text{Pr})$ в ближайшем узле P сетки и учесть формулу (8):

$$\left(\frac{dT}{dy} \right)_{\text{ст}} \approx \text{Pr} \frac{T_P - T_{\text{ст}}}{y_P} \left(\frac{y_+}{T_+} \right)_P = \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_T} \frac{T_P - T_{\text{ст}}}{y_P} m_u \langle f_u \rangle^2. \quad (9)$$

Плотность конвективного теплового потока от турбулентной среды к стенке определим, исходя из общепринятого допущения, что непосредственно на твердой поверхности конвекция отсутствует и перенос теплоты в тонком пристенном слое теплоносителя осуществляется только теплопроводностью по закону Фурье:

$$q_{\text{ст}} = \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}} \nu_{\text{ст}} (dT/dy)_{\text{ст}} / \text{Pr}.$$

Заменив в этом уравнении одностороннюю производную ее выражением (9), получим формулу математической модели конвективной теплоотдачи в неизотермическом турбулентном пограничном слое:

$$q_{\text{ст}} = \frac{\rho_{\text{ст}} \nu_{\text{ст}} c_{\text{ст}}}{\text{Pr}_T y_P} (T_P - T_{\text{ст}}) m_u \langle f_u \rangle^2.$$

Адекватность математической модели конвективного переноса теплоты проверена экспериментальными данными Тамониса [5] по теплоотдаче турбулентного потока горячего воздуха к охлаждаемым стенам трубы диаметром 150 мм. На рис. 1 представлены точками соотношения экспериментальных чисел Рейнольдса Re_3 и Нуссельта Nu_3 , рассчитанных в [5] по значениям физических величин на оси трубы на расстоянии 3,52 м от начала экспериментального участка.

В математической модели перед экспериментальной частью трубы предусмотрен охлаждаемый участок длиной 2 м. Расчетная температура воздуха на входе в него принята равной 480 К. Лучшее соответствие эксперименту получено при турбулентном числе Прандтля $Pr_T = 0,85$. При шаге сетки 2.5 мм ближайшие к стенке узлы сетки располагались в безразмерном интервале $y_+ = 25 \dots 84$ в пределах буферного и равновесного подслоев. Корень квадратный из соотношения плотностей $\rho_{ст}/\rho$ и функции f_u и f_l определены в пристенных узлах сетки, что несколько их завышало по сравнению с усредненными значениями, особенно при попадании узлов сетки в буферный подслей.

Результаты численного моделирования представлены на рис. 1 в виде зависимости I между числами Нуссельта и Рейнольдса. В целом она удовлетворительно согласуется с данными эксперимента. Все же, как и следовало ожидать, участок кривой I , соответствующий пристенным узлам сетки, лежащим в буферном подслое, располагается несколько ниже группы экспериментальных точек.

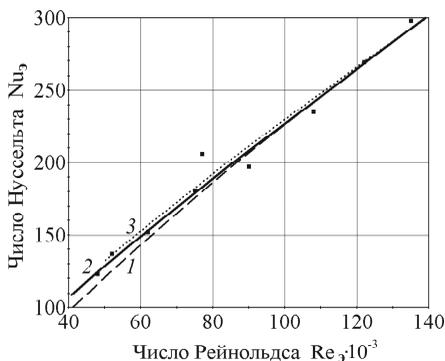


Рис. 1. Численное моделирование конвективной теплоотдачи:
 1 – по теоретическим уравнениям; 2 – с эмпирической поправкой;
 3 – по степенной формуле; точки – эксперимент [5]

Это отклонение устранено с помощью эмпирической функции,

$$f_m = [1 - \exp(-y_+ / A_m)]^{-0.25},$$

где фактор A_m определен следующей формулой:

$$A_m = 18 \left[1 - (y_+ / 100)^2 \right].$$

Расчетное соотношение между числами Нуссельта и Рейнольдса, полученное после введения функции f_m в формулы (6) и (9) в качестве поправочного множителя, представлено кривой 2 на рис. 1. Она мало отличается от степенной функции, показанной пунктирной линией 3:

$$Nu_3 = 0,23 Re_y^{0.8}.$$

То, что результаты численного моделирования на крупной сетке согласуются со степенной функцией, имеющей показатель степени 0.8, свойственный эмпирическим уравнениям конвективной теплоотдачи турбулентного потока газов в трубах [6], может служить доказательством адекватности эмпирической поправочной функции.

Таким образом, применение полуэмпирической гипотезы турбулентности Прандтля позволило корректно сформулировать граничные условия на крупной сетке к дискретным уравнениям, применяемым в математических моделях для вычисления скорости, турбулентной вязкости, температуры и конвективной теплоотдачи к стенам, ограничивающим турбулентное движение газов.

Библиографический список

1. **Алексин В.А.** Метод пристеночных условий для исследования течений и теплообмена с высокой интенсивностью турбулентности // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 3. С. 114–133.
2. **Е. R. van Driest** On turbulent flow near a wall // J. Aeronaut. Sci. 1956. Vol. 23. № 11. P. 1007–1011.
3. **Кузнецов В.А.** Численное моделирование конвективной теплоотдачи турбулентного потока газов // Теорет. основы хим. технологии. 2017. Т. 51. № 6. С. 720–726.
4. **Пейтел В.К., Роди В., Шойерер Г.** Модели турбулентности для течений в пристеночной области с малыми числами Рейнольдса // Аэрокосмическая техника. 1986. № 2. С. 184–197.
5. **Тамонис М.** Радиационный и сложный теплообмен в каналах. Вильнюс: Моклас, 1981. 252 с.
6. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И КПД ДУГ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ С ОБЫЧНОЙ И КОНВЕЙЕРНОЙ ЗАГРУЗКОЙ ШИХТЫ

д-р техн. наук, проф. **Макаров А.Н.**
канд. техн. наук, доц. **Окунева В.В.**
ст. преп. **Павлова Ю.М.**

Тверской государственный технический университет, г. Тверь

***Аннотация.** Осуществлен анализ теплообмена и к.п.д. дуг в дуговых сталеплавильных печах с обычной и конвейерной загрузкой шихты. Для сравнения приняты дуговые сталеплавильные печи близкой мощности и производительности. В результате анализа выявлено, что средний к.п.д. дуг печи Consteel ДСП-120со на 8-9% меньше аналогичного показателя ДСП-120об. Анализ к.п.д. дуг дуговых сталеплавильных печей позволил объяснить больший на 8-9% удельный расход электроэнергии в печи ДСП-120со по сравнению с аналогичным показателем в печи ДСП-120об.*

Первая дуговая сталеплавильная печь (ДСП) конструкции Consteel была введена в эксплуатацию в декабре 1989 года на заводе Charlotte в США [1]. Принцип действия данной печи Consteel вместимостью 120 тонн следующий: на конвейере длиной 30 м в печь подается шихта со скоростью приблизительно 6 м/мин. Отходящие из печи газы проходят через тоннель с конвейером, нагревают шихту до 300°C, в результате чего удельный расход электроэнергии снижается на 40-80 кВт·ч/т. В момент подачи шихты в печи должно находиться 20-30 тонн жидкого металла. К 2006 году в мире было введено в эксплуатацию 22 печи и в последующие годы их ввод продолжился [1-3].

В 2007 году на ОАО «Ашинский металлургический завод» (АМЗ) приняли решение о замене мартеновского производства электросталеплавильным с использованием печи Consteel [1]. Печь ДСП-120со Consteel была введена в эксплуатацию на АМЗ в 2010 году. Последующая эксплуатация печи Consteel на АМЗ показала, что одного из основных преимуществ этих печей над современными печами обычной конструкции ДСП-120об – меньшего удельного расхода электроэнергии – в 2011-2016 годы достичь не удалось. Проведенные на печи Consteel АМЗ балансовые плавки показали больший на 40 кВт·ч/т

удельный расход электроэнергии по сравнению с аналогичными по вместимости современными ДСП обычной конструкции [4, 5].

Загрузка шихты в печь ДСП обычной конструкции производится с помощью корзин, из которых сверху загружается шихта в 2 приема по 60-70 тонн. Для объяснения повышенного удельного расхода электроэнергии в настоящее время в печах Consteel по сравнению с печами обычной конструкции необходимо провести исследование, включающие расчеты к.п.д. дуг и анализ электропотребления ДСП за 1989-2016 годы. Результаты такого научного исследования и расчетов приведены ниже.

В [6] приведены данные изменения удельного расхода электроэнергии в ДСП за 1980-2014 годы, воспользуемся ими. В конце 1980-х, начале 1990-х годов за счет подогрева шихты расход электроэнергии в печах Consteel был меньше на 80-120 кВт·ч/т по сравнению с печами обычной конструкции, преимущества печей Consteel по сравнению с печами обычной конструкции были неоспоримы и их использование в мировой металлургии неуклонно возрастало [1].

С середины 1990-х годов в производстве стали в печах Consteel и обычной конструкции используют различные способы интенсификации процесса плавки, что привело к сокращению разности в показателе удельного расхода электроэнергии в печах Consteel и обычной конструкции.

В 1996-2003 годы удельный расход электроэнергии в печах Consteel при работе на 100% скрапе составил 380-410 кВт·ч/т [2, 3], в печах обычной конструкции 420-430 кВт·ч/т [6]. В начале 2000-х годов разность в удельном потреблении электроэнергии печью Consteel по сравнению с ДСП обычной конструкции снижается до 30-40 кВт·ч/т стали.

В 2003-15 годах продолжилось увеличение удельной мощности до 800-850 кВА/т в печах обычной конструкции и до 750 кВА/т в печах Consteel. Увеличение вводимой в печи мощности привело к дальнейшему повышению производительности, снижению времени плавки и удельного расхода электроэнергии. В настоящее время удельный расход электроэнергии при работе на 100% скрапе в печах Consteel составляет 385-395 кВт·ч/т [5], в печах обычной конструкции 360-375 кВт·ч/т [4]. Данное явление требует объяснения и его можно получить осуществив анализ теплообмена и расчет и анализ изменения коэффициента полезного действия дуг печей обычной конструкции и Consteel.

Технические характеристики сравниваемых печей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики печей с конвейерной и обычной загрузкой

Технические характеристики	ДСП-120со	ДСП-120об
Емкость печи по выпуску, т	120	120
Остаток металла в печи, т	50	
Мощность трансформатора, МВА	90	100
Вторичное напряжение линейное, В	649-1000	600-1100
Вторичное напряжение фазное, В	375-578	347-636
Ток дуги, кА	50-70	50-75
Время плавки, мин	60-62	60
Время под током, мин	50	45
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	416	375

Средние или среднеарифметические энергетические параметры печей, найденные по результатам обработки данных нескольких десятков плавов, являются устойчивыми показателями, характеризующими эффективность работы печей. Для объяснения повышенного расхода общей и электрической энергии в печи ДСП-120со по сравнению с ДСП-120об осуществим расчет средних за плавку к.п.д. дуг печей. к.п.д. дуги равен отношению полезной мощности дуги $P_{п}$, идущей на нагрев, расплавление металла и шлака, к мощности дуги $P_{д}$ и определяется путем расчета среднего углового коэффициента излучения дуги $\varphi_{дм}$ на металлошихту и ванну металла [6, 7, 11]:

$$\eta_{д} = P_{п}/P_{д} = 0,08 + \varphi_{дм}. \quad (1)$$

По данной методике рассчитали к.п.д. дуг печей Consteel и обычной конструкции, результаты расчетов совпали с результатами расчета к.п.д. дуг, изложенными в [6, 7]. Положение шихты в сравниваемых печах изображено на рис. 1а–1в.

Воспользуемся результатами расчетов к.п.д. дуг в [6, 7] для построения графиков изменения к.п.д. дуг за время работы печей Consteel и обычной конструкции под током. Для построения графиков отмечаем значение к.п.д. дуг, рассчитанных для каждого десятиминутного интервала работы печей ДСПсо и ДСПоб (рис. 2).

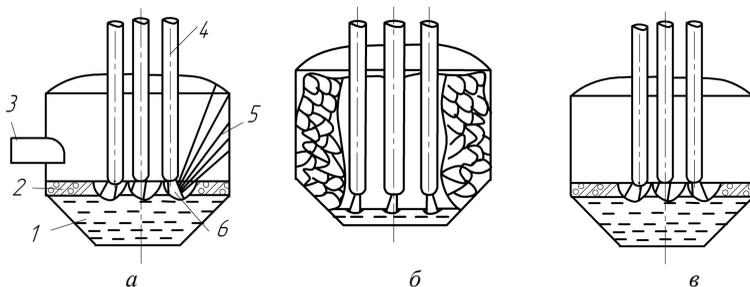


Рис. 1. Рабочее пространство электропечи ДСП-120со Consteel (1,а): 1 – ванна металла; 2 – шлак; 3- передняя часть конвейера; 4 – электроды; 5 – излучение электрических дуг на стены и свод; 6 – электрические дуги; рабочее пространство электропечи ДСП-120об в процессе расплавления шихты (1,б), $\eta_{д}=0,93$, и к окончанию расплавления (1,в), $\eta_{д}=0,65$

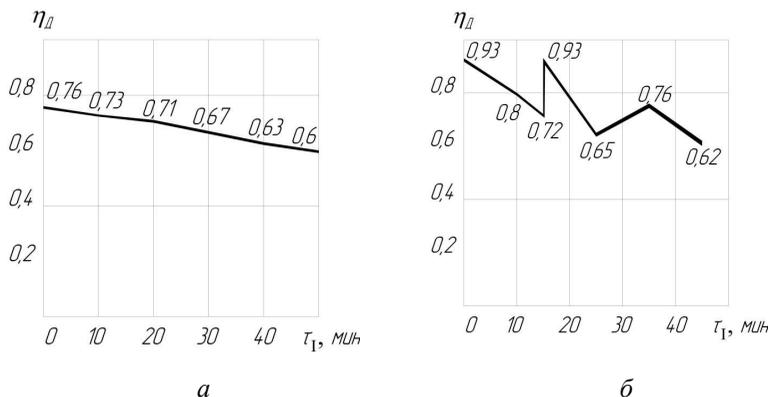


Рис. 2. Изменение к.п.д. дуги в печи ДСП-120со (а) и ДСП-120об(б) за время работы печи под током

Из результатов анализа работы печей Consteel и обычной конструкции следует вывод, что передовые в начале 1990-х годов печи Consteel в результате процессов увеличения мощности, производительности, интенсификации плавки, осуществленных в 1990-2000-е годы в печах сравниваемых конструкций, в 2010 годы утратили свои преимущества по потреблению электроэнергии и производительности по сравнению с печами обычной конструкции. Для сравнения значе-

ний к.п.д. дуг печей ДСПсо и ДСПоб были найдены среднее арифметическое значение к.п.д. дуг, данные для которых представлены на графике. В результате расчета к.п.д. дуг сравниваемых печей выявлено, что средний к.п.д. дуг печи ДСП-120со, равный 0,68, на 13% меньше среднего к.п.д. дуг печи ДСП-120об, равного 0,78, что оказывает определяющее влияние на удельное потребление электроэнергии печью ДСП-120со, оно на 11% больше, чем удельное потребление электроэнергии печью ДСП-120об.

Библиографический список

1. **Боровинских С.В.** В Россию приходит инновационный электросталеплавильный процесс // *Электromеталлургия*. 2007. № 9. С. 13–16.
2. **Argenta P., Corbella M.** EAF integration into the blast furnace route at Wheeling Pittsburg // *MPI International*. 2006. № 2. P. 42–47.
3. **Samways N.** Revitalized with a new continuous steelmaking process // *Iron and steel technology*. 2005. № 6. P. 29–45.
4. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе / В.Г. Евстратов, А.Д. Киселев, И.Ю. Зинуров и др. // *Электromеталлургия*. 2012. № 8. С. 2–6.
5. **Тулеевский Ю.Н., Зинуров И.Ю., Швер В.Г.** / Новые возможности печей Consteel // *Электromеталлургия*. 2011. № 6. С. 22–27.
6. **Макаров А.Н.** Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
7. **Макаров А.Н.** Изменение КПД дуг в процессе плавки в дуговых сталеплавильных печах // *Металлург*. 2017. № 4. С. 55–58.
8. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах / Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров, А.Д. Киселев, А.М. Шумаков // *Электromеталлургия*. 2005. № 9. С. 2–6.
9. Особенности технологии выплавки стали в электропечи ДСП-120 Consteel и пути её совершенствования / З.Х. Шакиров, А.М. Шумаков, Г.П. Урюпин и др. // *Электromеталлургия*. 2013. № 9. С. 2–7.
10. Модернизация сталеплавильного производства Ашинского металлургического завода / В.Г. Евстратов, И.Ю. Зинуров, З.Х. Шакиров и др. // *Металлург*. 2012. № 9. С. 46–50.
11. **Makarov A.N., Rybakova V.V., Galicheva M.K.** Electromagnetic and the Arc Efficiency of Electric Arc Steel Melting Furnaces // *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. 2014. Vol. 6. P. 184–192.

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

ст. преп. **Ткаченко А.Е.**
канд. техн. наук, доц. **Неежмаков С.В.**
*Донецкий национальный технический
университет, г. Донецк*

***Аннотация.** Обоснована актуальность прогнозного автоматического управления производством и распределением теплоты в системах теплоснабжения промышленных предприятий. Приведен обзор современных исследований в данной области. Выполнен анализ технологических особенностей систем теплоснабжения как объектов автоматического управления. Сформулированы критерии оптимального управления функционированием системы теплоснабжения промышленного предприятия. Обоснована целесообразность использования принципа замкнутого управления производством теплоты с обратной связью по градиенту теплового спроса.*

Снижение себестоимости производства теплоты для промышленных предприятий на сегодняшний день является актуальной задачей. Ее решению препятствует использование низкоэффективных теплогенерирующих установок, аварийное состояние отопительного хозяйства, а также применяемый отпуск теплоты по укрупненным и усредненным показателям и отсутствие оперативного контроля за фактическим тепловым спросом. Такой подход приводит как к перерасходу топлива и перепроизводству теплоты, так и к, в противоположность, неудовлетворению текущего теплового спроса и невозможности быстрого реагирования на его изменения.

Для устранения данных проблем необходимо реализовывать согласованную работу источников теплоты, запорно-регулирующей арматуры сетей теплоснабжения и теплопотребителей. Особенно актуальны данные вопросы для систем теплоснабжения (СТС) промышленных предприятий, где от своевременного и полного удовлетворения теплового спроса зависит непрерывность и эффективность циклов производства, а также качество и себестоимость продукции. Однако, обеспечить наивысшее качество процессов производства и распределения теплоты в подобных сложных технологических объектах воз-

можно лишь путем многокритериального оптимального автоматического управления, а достигнуть оперативного и точного удовлетворения нужд абонентов возможно, лишь организовав отпуск теплоты по градиенту изменения теплового спроса, что предусматривает обратную связь по фактическим значениям значимых технологических параметров и прогнозный контроль теплопотребления.

Таким образом **целью работы** является разработка научных основ обеспечения оптимального управления работой СТС промышленного предприятия.

При этом должны решаться следующие **задачи**:

- изучить технологические особенности СТС промышленного предприятия как объекта автоматизации;
- научно обосновать критерии оптимального управления процессом производства и распределения теплоты в системе теплоснабжения промышленного предприятия.

Как показал анализ, в современных публикациях преимущественно исследуются вопросы улучшения структуры сетей централизованного теплоснабжения, совершенствования конструктивных особенностей тепловых пунктов и управления распределением теплоносителя между абонентами жилых домов. Данным исследованиям посвящены работы ученых РФ и ряда зарубежных авторов [1–7]. Однако, вопросы оптимизации теплоснабжения промышленных предприятий мало изучены и имеют большой научный и практический интерес.

Рассмотрим СТС промпредприятия как объект автоматизации. СТС промышленных предприятий, таких как шахта, обогатительная фабрика (ОФ), электроремонтный или машиностроительный завод, характеризуются рядом технологических особенностей: небольшая протяженность тепломагистралей, локальное теплоснабжение по замкнутому типу от собственной котельной установки; использование нескольких, как правило водогрейных, котлов как источников теплоты; значительные суточные колебания тепловой нагрузки с амплитудой, сопоставимой с номинальной производительностью котла малой или средней мощности [8, 9].

Для практического изучения особенностей локальной замкнутой СТС промышленного предприятия выбрали типовую систему теплоснабжения шахты на примере ШУ «Южнодонбасская № 1» (рис.1). Она включает: тепловую сеть, 4 источника теплоты - котлоагрегата с топками низкотемпературного кипящего слоя (НТКС) типа КЕ10/14 в водогрейном режиме, а также несколько основных ветвей потребите-

лей: административно-бытовой комбинат (АБК), calorиферная установка (КУ), производственные помещения, теплицы и примыкающие к ним потребители, потребители ОФ [10].

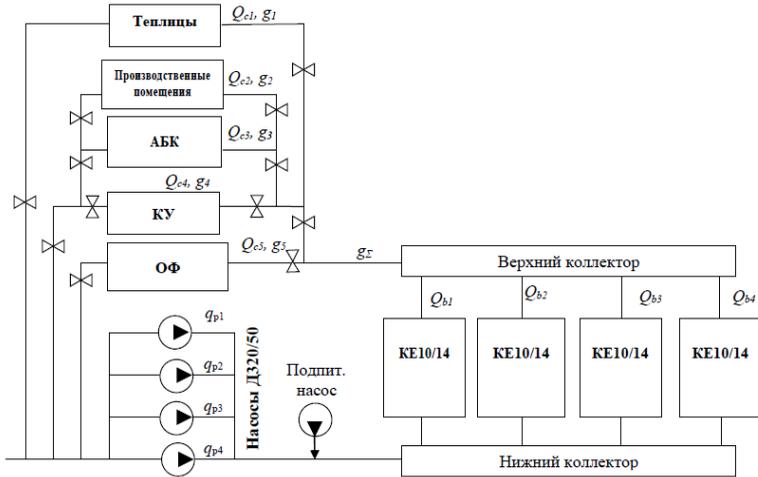


Рис. 1. Технологическая схема системы теплоснабжения шахты «Южнодонбасская № 1» (г. Угледар):

$Q_{b1}, Q_{b2}, \dots, Q_{b4}$ – количество теплоты, производимой каждым котлоагрегатом;
 $Q_{c1}, Q_{c2}, \dots, Q_{c5}$ – количество теплоты, потребляемое каждым абонентом;
 g_1, g_2, \dots, g_n – расходы теплоносителя по каждому абоненту;
 $q_{p1}, q_{p2}, \dots, q_{p4}$ – расход теплоносителя, обеспечиваемый каждым циркуляционным насосом; g_{Σ} – общий расход теплоносителя в системе

Поддержание постоянного расхода теплоносителя в гидросистеме обеспечивают четыре насоса типа Д320/50, каждый из которых обеспечивает расход воды $q_{p1}, q_{p2}, \dots, q_{p4}$, утечки теплоносителя компенсирует подпиточный насос.

Для иллюстрации динамики теплоснабжения предприятия приведены графики суточных изменений спроса шахтных абонентов (рис. 2), для условий декабря 2015 г., полученные по стандартной методике [9, 11] на основе фактических теплотехнических характеристик и конструктивных параметров шахтных потребителей, приведенных в [10]. Данные по фактическому изменению температуры окружающей среды взяты из архива сайта [12]. Теплоснабжение на горячее водо-

снабжение для промпредприятий считаем условно-постоянным для любого времени года, что связано с циклами и графиками производства и на рис. 2 не приводим.

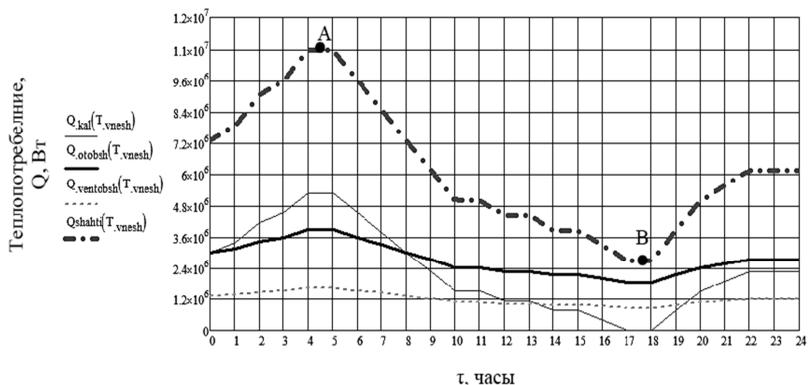


Рис. 2. Прогнозный суточный график потребления тепла шахтой на примере шахтоуправления «Южнодонбасское № 1» (г. Угледар):

Q_{kal} – теплотребление калориферной установкой; Q_{otobsh} – общее теплотребление на отопление; $Q_{ventobsh}$ – общее теплотребление на вентиляцию; $Q_{shahiti}$ – общее теплотребление по шахте; T_{vnesh} – температура окружающей среды

Из рис. 2 следует, что амплитуда перепадов теплового спроса в течение суток для точки А минимума и точки В максимума теплотребления достигает 8,5 МВт, что соизмеримо с производительностью котлоагрегата средней мощности. Такие колебания теплотребления обуславливают целесообразность применения в качестве источников теплоты нескольких теплогенерирующих установок с последующим управлением не только их суммарной производительностью, но и их рабочим числом и составом.

Таким образом, с точки зрения управления СТС промпредприятия – объект многоступенчатый (источники теплоты – сеть – потребители), распределенный в пространстве, инерционный по управлению, характеризуется большим числом постоянных и переменных технологических параметров, подвержен динамическим изменениям теплового спроса со значительной амплитудой, непосредственно зависит от влиянию внешних возмущений по температуре окружающей среды. Все

это должно быть учтено при разработке критериев управления и определении функции цели.

Функцией цели оптимального управления теплоснабжением является поддержание в каждый момент времени в СТС следующих теплового и материального балансов, при условии наличия в СТС m котлов, n абонентов, и k циркуляционных насосов:

$$Q_{ust} = \sum_{i=1}^{i=m} Q_{b,i} = \sum_{j=1}^{j=n} Q_{c,i} + \sum_{j=1}^{j=n} Q_{h.l,i}; \quad (1)$$

$$q_{ust} = \sum_{k=1}^{j=K} q_{p,j} = \sum_{i=1}^{i=m} G_i = \sum_{j=1}^{j=n} g_i + \Sigma g_l, \quad (2)$$

в соответствии с которыми, теплота, производимая суммой всех котлов $Q_{b,i}$, находящихся в работе, должна полностью удовлетворять потребности абонентов $Q_{c,i}$ с учетом потерь теплоты в системе $Q_{h.l,i}$. А сумма водопроизводительностей этих котлов G_i должна равняться сумме расходов теплоносителя по каждому абоненту g_i с учетом его утечек Σg_l и соответствовать суммарной фактической производительности циркуляционных насосов $q_{p,i}$.

Также для равновесного состояния котла справедливо следующее уравнение энергетического баланса [13]:

$$Q_{b,i} = G_i(h_i' - h_i'') + \Sigma Q_{b.l,i}, \quad (3)$$

где $h_i' = f(t_i')$ – энтальпия питающей воды на входе к потребителям; $h_i'' = f(t_i'')$ – энтальпия холодной воды; $\Sigma Q_{b.l,i}$ – сумма всех потерь теплоты в котлоагрегате.

Очевидно, что зная с каким к.п.д. $\eta_{b,i}$ работает каждый котлоагрегат, возможно определить необходимую тепловую производительность котла $Q_{b,ust,i}$ для обеспечения требуемого от него количества теплоносителя $G_{b,ust,i}$ с заданными параметрами:

$$Q_{b,ust,i} = \frac{G_{ust,i}(h_i' - h_i'')}{\eta_{b,i}} 100\%. \quad (4)$$

Таким образом, возникает задача определения уставок теплопроизводительности и водопроизводительности каждого котла (в сумме должны давать Q_{ust} и q_{ust} , соответственно). При этом необходимо учи-

тывать, что в типовой СТС предприятия может присутствовать несколько разнотипных теплогенерирующих установок.

Так, для оптимизации совместной работы котлоагрегатов с учетом нелинейного характера зависимости к.п.д. котла от его производительности $\eta_{b,i} = f(Q_{b,i})$ [13] необходимо определять значения производительностей каждого котла в соответствии с критериями оптимальной работы группы котлов. В качестве данных критериев принимаются:

– **критерий максимального средневзвешенного** к.п.д. при выполнении условий (1) и (2).

$$\eta(\{Q_{b,i}\}) = \frac{\sum_{i=1}^m (\eta_{b,i} \cdot Q_{b,i})}{\sum_{i=1}^m Q_{b,i}} \rightarrow \max, \quad (5)$$

где $\{Q_{b,i}\} = \{Q_{b,1}, Q_{b,2}, \dots, Q_{b,m}\}$ – вектор полной производительности всех m агрегатов, Вт;

– **критерий минимума расхода топлива B_f и минимума материальных затрат $f_{m.c}$ на используемый вид топлива:**

$$\begin{cases} B_f(\{G_i\}) = \sum_{i=1}^m B_i(G_i) \rightarrow \min \\ f_{m.c}(\{G_i\}) = \sum_{i=1}^m B_i(G_i) \cdot p \rightarrow \min, \end{cases} \quad (6)$$

где p – цена используемого в данном типе котла вида топлива, B_i – расход топлива, используемого i -м котлом для обеспечения i -й теплопроизводительности G_i .

При следующих **технологических наложенных ограничениях:**

– по удовлетворению прогнозного теплового спроса:

$$\sum_{i=1}^m (Q_{b,i} \cdot \eta_{b,i}) \geq Q_{ust}; \quad (7)$$

– и по диапазону рабочей производительности в зоне рационального использования:

$$Q_{b,i}^{\min} \leq Q_{b,i} \leq Q_{b,i}^{\max}, i = 1..m; \quad (8)$$

– по возможности обеспечения уставок (1) и (2) выбранным составом котлов за требуемый промежуток времени из которых следует, что время выхода каждого i -го котла на заданную производительность

$\Delta\tau_{pp,i}$ (до момента, когда будет достигнуто условие (1)), должно соответствовать выбранной глубине прогноза $\Delta\tau_{ust}$ в зависимости от типа применяемых топок с учетом возможной погрешности $\Delta\tau_{pogr}^{dop}$:

$$\Delta\tau_{pp,i} \rightarrow \Delta\tau_{ust} \pm \Delta\tau_{pogr}^{dop}; \quad (9)$$

– по заданным значениям температурам теплоносителя (воды) в подающем и обратном трубопроводах, общей водопроизводительности котлов и диапазону рабочей производительности каждого котла:

$$\begin{cases} t' = t'_{ust}; t'' = t''_{ust} \\ \sum_{i=1}^m G_i = G \\ G_i^{\min} \leq G_i \leq G_i^{\max}, i = 1 \dots m; \end{cases} \quad (10)$$

– по обеспечению безаварийного функционирования каждого котла, путем поддержания его технологических параметров в заданном технологическом режиме диапазоне существования:

$$\left[\overline{X}_i^{\min} \right] \leq \left[\overline{X}_i \right] \leq \left[\overline{X}_i^{\max} \right] \quad (11)$$

где $\left[\overline{X}_i \right]$ – вектор технологических параметров i -го котла, $\left[\overline{X}_i^{\min} \right]; \left[\overline{X}_i^{\max} \right]$ – вектора верхних и нижних пределов существования технологических параметров.

Выводы по работе. Таким образом, была обоснована целесообразность применения системы автоматического управления (САУ) производством и распределением теплоты в СТС промпредприятия. Изучены технологические особенности СТС как объекта автоматизации. Доказана необходимость внедрения автоматического управления производительностью теплогенерирующих установок по обратной связи с градиентом теплопотребления, что включает оперативный контроль как прогнозного, так и теплового спроса. Сформулированы критерии оптимального управления СТС с наложенными ограничениями. Выполнение данных критериев позволит синтезировать адекватную САУ, оптимизировать производство теплоты, расход применяемых топлив и удовлетворение теплового спроса.

Библиографический список

1. **Жуков Д. В., Дмитриев В.З.** Повышение эффективности работы систем централизованного теплоснабжения путем оптимизации теплогидравлических режимов [Электронный ресурс] // ЭСКО. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», 2012. № 6. URL: http://journal.esco.co.ua/2012_6/art124.htm (дата обращения: 01.11.18).
2. **Орлов М.Е.** Повышение эффективности систем теплоснабжения городов [Электронный ресурс] // СОК, 2014. № 1. URL: <http://www.c-ok.ru/articles/povyshenie-effektivnosti-sistem-teplosnabzheniya-gorodov> (дата обращения: 01.11.18).
3. **Александрова Е.А., Астахова К.А., Семиненко А.С.** Особенности теплового режима помещений при поквартирном теплоснабжении // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3–1. С. 91–93.
4. **Солдатенков А.С.** Математическое моделирование системы управления теплотреблением комплекса зданий: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 176 с.
5. **Al-Shemmeri T.** Energy audits: a workbook for energy management in buildings. Chichester (UK): Wiley-Blackwell, 2011. 292 p.
6. **Mitchell J. W., Braun J. E.** Principles of heating, ventilation, and air conditioning in building. N.J.: Wiley, 2013. 600 p.
7. **Grebenyuk G.G., Krygin A.A.** Algorithms for optimization of the number of switchings in heat supply networks reconfiguration // Automation and Remote Control. 2008. Vol. 68. No. 12. P. 2187–2197.
8. **Шишов Е.Л., Смирнов К.И.** Типовые проекты организации скоростного строительства шахт производительностью 600 и 1 200 тыс. т. угля в год. Харьков, 1958. – 15 с., 1 л. граф.: схем.; 22 см.
9. Нормирование топливно-энергетических ресурсов и регулирование режимов электропотребления: Инструкции; Под общ. ред. В.В. Дегтярева. М.: Недра, 1983. 224 с.
10. Отчет о договорной работе «Проведение поверочных расчетов теплоснабжения поверхностного комплекса шахты «Южнодонбасская № 1». Донецк: НИИ Горной Механики им. М.М. Федорова, 1993. 63 с.
11. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: Справочник / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж и др. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1988. 432 с.
12. **МЕТЕО.UA™:** Архив погоды в Угледаре. Погода в Угледаре Донецкая обл. за последние 10 лет [Сайт]. URL: <https://meteo.ua/archive/321/ugledar> (дата обращения: 09.11.2018).
13. **Сидельковский Л.Н., Юрнев В.Н.** Котельные установки промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1998. 528 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОТОКА ВОЗДУШНО-ВОДЯНОГО ТУМАНА

д-р техн. наук, проф. **Щеклеин С.Е.**¹

д-р техн. наук, ст. научн. сотр. **Пахалуев В.М.**¹

аспирант **Абед А.Х.**^{1,2}

¹Уральский федеральный университет имени первого
президента России Б. Н. Ельцина г. Екатеринбург

²Технологический университет, Ирак

***Аннотация.** Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена шарового тепловыделяющего элемента, размещенного в цилиндрическом канале, при обтекании газо-жидкостным потоком с малой концентрацией жидкости (туманом). Полученные данные показали, что присутствие тонкораспыленной воды приводит к значительному увеличению передачи тепла по сравнению с использованием только воздушного охлаждения. Установлено, что концентрация воды оказывает незначительное влияние на коэффициент трения. При фиксированном тепловом потоке энергетическая эффективность увеличивается с ростом концентрации воды, достигая при $111,68 \text{ кг м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ значений свыше $600 \text{ Вт м}^{-2} \text{ гр}^{-1}$, что в 2,8 раза выше, чем при воздушном охлаждении.*

Работа выполнена при государственной поддержке ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров (постановление № 211 Правительства Российской Федерации), контракт № 02.А03.21.0006

Повышение эффективности передачи тепла от сферических частиц или объектов, которые формируются как сферы, имеет важное значение в ряде промышленных приложений, таких как химическая и металлургическая отрасли, системы охлаждения энергетического оборудования [1]. Для решения этой проблемы, многие исследователи пытаются найти новые методы повышения эффективности передачи тепла [2]. Одним из новых и потенциально выгодных методов повышения передачи тепла является использование в качестве охлаждающей среды воздушно-водяного тумана [3]. Основные особенности воз-

душно - водяного тумана, по сравнению с однофазным воздушным потоком является: поглощение большого объема энергии вследствие испарения тонкораспыленной воды, увеличение теплоемкости смеси, увеличение турбулентности в основном потоке воздуха и пограничных слоев на стенках канала и шара. [4].

Цель работы состоит в исследовании эффективности теплоотдачи тела сферической формы и гидравлического сопротивления при обтекании тела расположенного в цилиндрическом канале воздушно-водяным туманом. Исследования проведены при ультра-малых концентрациях воды в воздухе, создаваемых ультразвуковым распылением воды в диапазоне от 23,39 до 111,68 кг м⁻² ч⁻¹ в широком диапазоне чисел Рейнольдса и теплового потока.

Теплопередача и аэродинамические явления при обтекании сферических элементов для однофазных течений жидкостей и газов хорошо изучены, исследования же при движении воздушно-водяного тумана весьма немногочисленны. Ряд исследований охлаждения тел с помощью воздушно - водяного тумана выполнено для одномерных гидродинамических условий - изучалась теплопередача плоской пластины с подогревом, охлаждения элементов газовых турбин и трубчатых теплообменников, при включении капель воды в воздух или пар [5-7].

В данном исследовании представлены новые результаты по интенсификации теплообмена тела 3-х мерной геометрии (сферы), расположенной внутри цилиндрического канала при охлаждении с помощью потока воздушно - водяного тумана. Исследованы эффективность теплоотдачи сферы к потоку тумана и коэффициенты гидравлического сопротивления при обтекании сферы в широком диапазоне изменения скорости воздуха, концентрации воды, теплового потока.

Воздух, воздушно - водяной туман, обтекают сферу, являющуюся источником тепла. Поток тепла от медной сферы предполагается однородным:

$$q = \frac{Q_{эл.} - Q_{пот.}}{A_{ш}}, \quad (1)$$

где $Q_{эл.}$ – мощность электронагревателя и $Q_{пот.}$ – потери тепла; $A_{ш}$ – площадь поверхности сферы.

Для однофазного потока средний коэффициент теплопроводности может быть записан как:

$$\alpha = \frac{q}{(T_{cp.u} - T_{ex.g})}, \quad (2)$$

где $T_{cp.u}$ – средняя температура поверхности; $T_{ex.g}$ – средняя температуры входящего воздуха (воздушно-водяного тумана). Уравнение баланса энергии для каждой капли могут быть записаны в виде:

$$m_k C_k \frac{dT}{dt} = \pi d^2 \alpha (T_{cp.u} - T_{ex.g}) + \frac{dm_k}{dt} r, \quad (3)$$

где r – скрытая теплота испарения.

Для потока воздушно - водяного тумана, средний коэффициент теплопроводности обычно может быть рассчитан с помощью температуры по влажному термометру на входе рабочего участка:

$$\alpha_{туман} = \frac{q}{(T_{cp.u} - T_{ex.m})}; \quad (4)$$

$$T_{cp.u} = \sum_{x=1}^n \frac{T_{ux}}{n}. \quad (5)$$

Массовый расход фазы воды в воздушно-водяном тумане мал по сравнению с расходом воздушного потока. Массовый расход используется для вычисления числа Рейнольдса по формуле:

$$Re = \frac{m D}{\mu A_t}. \quad (6)$$

Среднее число Нуссельта определяется по формуле:

$$Nu = \frac{\alpha d_w}{\lambda_g}, \quad (7)$$

где d_w – диаметр сферы; $\lambda_{во}$ – коэффициент теплопроводности воздуха.

Основываясь на механизме капиллярных волн диаметр капли при ультразвуковом распылении может быть рассчитан с помощью уравнения Ланга:

$$d_{\kappa} = 0.34 \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho F^2} \right)^{1/3}, \quad (8)$$

где F – рабочая частота ультразвукового генератора тумана; ρ , σ – плотность и коэффициент поверхностного натяжения воды.

Коэффициент трения определяется по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$f = \frac{2\Delta P}{N\rho U^2}, \quad (9)$$

где N - количество сфер в канале, ΔP , U - перепад давлений и скорость потока.

При постоянной, мощности газодувки взаимосвязь между коэффициентом трения и числом Рейнольдса может быть выражено как:

$$\left(\dot{V}_e \Delta P_e \right) = \left(\dot{V}_m \Delta P_m \right); \quad (10)$$

$$\left(f \operatorname{Re}_e^3 \right) = \left(f \operatorname{Re}_m^3 \right); \quad (11)$$

$$\operatorname{Re}_e = \operatorname{Re}_m \left(f_m / f_e \right)^{1/3}. \quad (12)$$

Коэффициент энергетической эффективности может быть определен как отношение коэффициента теплопередачи потока воздушно-водяного тумана к коэффициенту теплопередачи однофазного потока при постоянной мощности газодувки. Он может быть записан в виде:

$$\eta = \frac{\alpha_m}{\alpha_e} = \frac{Nu_m}{Nu_e} = \left(\frac{Nu_m}{Nu_e} \right) \left(\frac{f_m}{f_e} \right)^{-1/3}, \quad (13)$$

где Nu_m и Nu_e , f_m и f_e – числа Нуссельта и коэффициенты трения в потоке воздушно - водяного тумана и воздуха соответственно.

Экспериментальная часть

Экспериментальный стенд спроектирован для проведения исследований одно и двухфазных потоков и установлен на кафедре атомных электростанций и возобновляемых источников энергии Уральского федерального университета. Стенд состоит из рабочего участка с ис-

следуемым объектом (сферический элемент с внутренним электронагревателем), подсистем воздуха, туманообразования, смешивания фаз и сбора данных (температура, расходы воды и воздуха, давления и пр.), принципиальная схема стенда показана на рис. 1.

На рис. 2 приведены результаты расчета изменения коэффициента энергетической эффективности при охлаждении сферы в канале потоком воздушно-водяного тумана в зависимости от числа Рейнольдса для разных значений плотности потока воды. Очевидно, что коэффициент энергетической эффективности для всех случаев, больше, чем единица, что указывает на положительное влияние тонкораспыленной воды в основной поток на процесс передачи тепла.

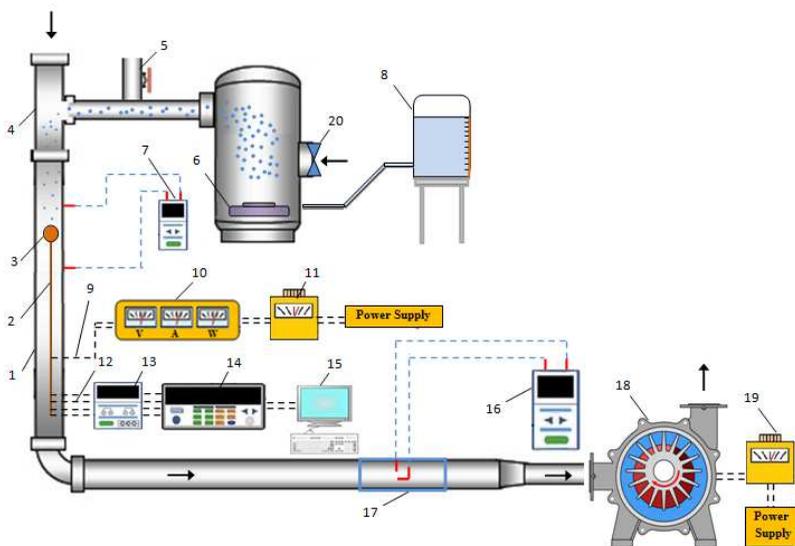


Рис. 1. Схема конструкции экспериментального стенда:

1 – трубка из оргстекла; 2 – поддержка; 3 – медный шар; 4 – смеситель; 5 – регулирующий клапан; 6 – ультразвуковой генератор тумана; 7, 16 – цифровой дифманометр типа DT-8890A; 8 – бак; 9 – ввод питания электрообогрева; 10 – электроизмерительный мультиметр; 11, 19 – регулятор напряжения; 12 – термопары; 13 – модуль ввода аналоговый типа MB110-224,8A; 14 – преобразователь измерительный регистрирующий типа МСД-200; 15 – компьютер; 17 – трубка Пито; 18 – воздуходувка

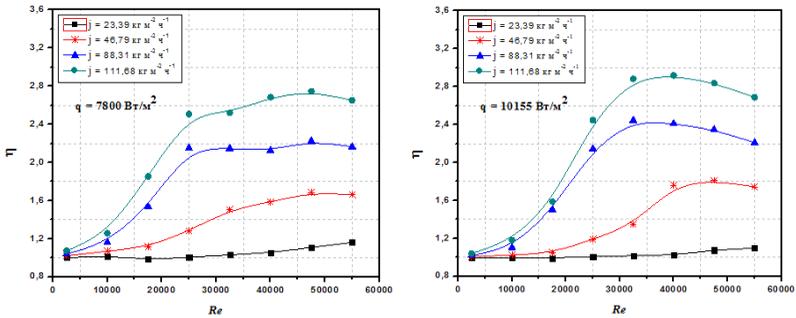


Рис. 2. Изменения коэффициента энергетической эффективности с числом Рейнольдса для воздушно-водяного тумана с различной концентрацией воды

В диапазоне чисел Рейнольдса ($Re = 2500 \dots 10000$), коэффициент энергетической эффективности изменяется от 1,0-1,26 для всех концентраций воды, что объясняется высокой температурой поверхности сферы, когда тонкораспыленная вода может полностью испариться до контакта с нагреваемой поверхностью в горячем газовом пограничном слое без смачивания нагреваемой поверхности.

В тоже время коэффициент энергетической эффективности быстро возрастает с увеличением числа значений Рейнольдса ($Re > 17500$) для всех концентраций воды. Так при числе Рейнольдса $Re = 40000$, повышение составляет три раза, по сравнению с воздушным охлаждением для плотности потока воды ($111,68 \text{ кг м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, $q = 10155 \text{ Вт/м}^2$). Экспериментальные данные показывают, что воздушно-водяной туман обеспечивает более эффективный теплообмен, чем однофазное воздушное охлаждение.

Выводы по работе

Разработана установка и методики исследования характеристик гидродинамики и теплообмена при охлаждении сферических тел воздушно-водяным туманом. В широком диапазоне теплового потока, чисел Рейнольдса, концентрации частиц воды выполнено исследование теплообмена и коэффициентов трения при охлаждении сферических тел воздушно-водяным туманом. На основании экспериментальных результатов, можно сделать следующие выводы.

1. Воздушно-водяной туман, является эффективным способом охлаждения поверхности сферы. Температура поверхности уменьшается на 4%, 17%, 37% и 47% по сравнению с охлаждением воздухом

для плотности потока воды $j = 23,39; 46,79; 88,31; 111,68 \text{ кг м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ соответственно.

2. Среднее число Нуссельта значительно возрастает с ростом числа Рейнольдса при всех значениях теплового потока и плотностей потока воды. С помощью тонкораспыленной воды, среднее число Нуссельта на 11%, 19,7%, 90,2% и 134% для плотностей потока воды $j = 23,39; 46,79; 88,31; 111,68 \text{ кг м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ выше, чем при охлаждении воздухом.

Среднее число Нуссельта медленно увеличивается с ростом теплового потока при фиксированных плотностях потока воды и числа Рейнольдса.

3. При равных условиях, коэффициент трения потока воздушно-водяного тумана был несколько больше, чем воздуха. Превышение составило 1,8%, 3,1%, 4,9% и 5,9% для плотностей потока воды $j = 23,39; 46,79; 88,31; 111,68 \text{ кг м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ соответственно. Коэффициент трения уменьшается с увеличением числа Рейнольдса.

4. Коэффициент энергетической эффективности при охлаждении сферы в канале потоком воздушно-водяного тумана существенно выше (до 300%), чем применение воздушного охлаждения.

Библиографический список

1. Study on flow and heat transfer characteristics of the mist/steam two phase flow in rectangular channels with 60 deg. ribs / G. Jiang, X. Shi, G. Chen and J. Gao // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 120. P. 1101–1117.

2. Experimental Study on Cooling a Hot Solid Surface with Water Mist / W. Xishi, L. Guangxuan, F. Weicheng and R. Dobashi // *J. Fire Sci.* 2004. Vol. 22, No 5. P. 355–366.

3. **Zhao L., Wang T.** An Experimental Study of Mist/Air Film Cooling On a Flat Plate With Application to Gas Turbine Airfoils–Part II: Two-Phase Flow Measurements and Droplet Dynamics // *J. Turbomach.* 2014. Vol. 136, No 7. P. 071007-071007-9.

4. **Wang T., Dhanasekaran T.** Calibration of a Computational Model to Predict Mist/Steam Impinging Jets Cooling With an Application to Gas Turbine Blades // *J. Heat Transf.* 2010. Vol. 132, No 12. P. 122201-122201-11.

5. **Yang W.J., Clark D.W.** Spray cooling of air cooled compact heat exchangers // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1975. Vol. 18. P. 311–317.

6. **Nakayama W., Kuwahara N., Hirasawa S.** Heat transfer from tube banks to air-water mist flow // *Int. J. Heat Mass Transf.* 1988. Vol 36, № 2. P. 449–460.

7. **Dreyer A., Kriel D., Erens P.** Analysis of spray-cooled finned-tube heat exchangers // *Heat Transfer Engineering.* 1992. Vol. 13, No 4. P. 53–71.

2. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 537.8, 537.3

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ БУРОВОГО СТАНКА СБШ-250 В ПАКЕТЕ МАТЛАВ

д-р техн. наук, проф. **Авербух М.А.**

магистрант **Уханев С.В.**

магистрант **Гордиенко А.В.**

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

***Аннотация.** Важным показателем, устанавливающим качество электрической энергии, является искажение синусоидальной формы токов и напряжений. Отклонение данного показателя выше допустимого и наличие в системе электроснабжения высших гармоник может привести к негативным, а иногда даже к катастрофическим последствиям. В результате проведенной работы было проведено исследование параметров электромагнитной совместимости, путем моделирования динамических процессов в электроприводе.*

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

Вопросу качества электрической энергии в последнее время стали уделять все большее внимание [1]. Искажения напряжения, связанные с несинусоидальностью и несимметрией токов, стали наиболее серьезной проблемой для распределенных электросетей. Наличие высших гармоник в трехфазных сетях приводит к таким последствиям, как увеличение потерь, снижение номинальных параметров оборудования, взаимовлияния между источниками и нагрузкой, снижение общей стабильности энергосистемы и сужения области устойчивости ее работы, а также к другим проблемам, связанным с реактивной энергией и резонансными явлениями [2].

ГОСТ 32144-2013 [3] нормирует качество электроэнергии по нескольким показателям. Одним из них является коэффициент несину-

соидальности кривой напряжения, которая для сетей 0,4 кВ может достигать величины 8%. Коэффициент несинусоидальности тока ГОС-Том не нормируется, но следует помнить, что потребляемый несинусоидальный ток является первопричиной искажения кривой напряжения.

Буровой станок СБШ-250 состоит из гусеничного хода, машинного отделения со смонтированными на нем кабиной машиниста и мачтой. Электропривод вращателя осуществляется электродвигателем постоянного тока с глубоким регулированием скорости по системе тиристорный преобразователь - двигатель с системой импульсно-фазового регулирования. Функциональная схема системы подчиненно-го регулирования представлена на рис. 1.

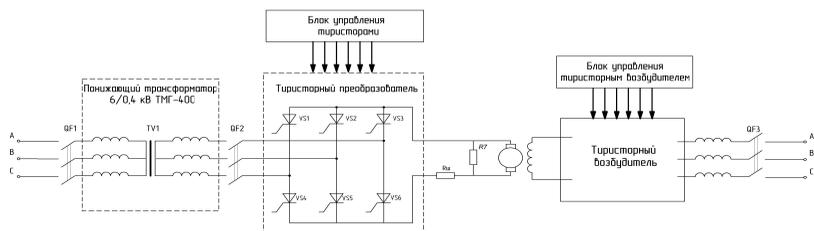


Рис. 1. Функциональная схема

Буровой станок является очень энергоемким оборудованием, который выполняет сложный технологический процесс. На Стойленском горно-обогатительном комбинате повсеместно используются СБШ-250, электропривод которых в том числе построен по системе тиристорный преобразователь – двигатель. Данная система построена на базе шестипульсной мостовой схемы выпрямления, которая является потребителем с нелинейной вольт-амперной характеристикой [4]. Это приводит к генерации высших гармоник питающих сеть, а также потреблению реактивной мощности во время ее работы. Обеспечение электромагнитной совместимости является предметом качества электрической энергии, который нормируется по стандарту ГОСТ 32144-2013.

Несинусоидальность напряжения (отклонения формы напряжения от синусоидальной):

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{i+1}} 100\%, \quad (1)$$

где $U_{(n)}$ - амплитудные значения гармонических составляющих напряжения, K_u - суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (не должен превышать 8 % по требованиям [3] для объектов напряжением 0,4 кВ).

Коэффициент гармонической составляющей тока:

$$K_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_{(n)}^2}}{I_1} 100\%, \quad (2)$$

где I_n - значение скомпенсированного тока гармоники.

С целью изучения влияния главного привода СБШ-250 с нелинейной ВАХ на карьерную сеть, а также для создания возможности вывода результатов его влияния в удобном для пользователя виде, на основании паспортных данных (табл. 1) [5, 6], с учетом циклического характера работы и возможных набросов нагрузки, была построена модель данного электропривода с помощью ПО Matlab Simulink [7]. Имитационная модель системы управления электроприводом бурового станка представлена рис. 2. Реализация схемы возбуждения и полученные результаты приведены на рис. 3–8.

Таблица 1
Паспортные данные элементов имитационной модели

Параметры кабельных линий	Допустимый ток, А	Сопротивление, мОм/км		Протяженность, м	
		активное	реактивное		
АС-150	450	0,009	0,918	1000	
2хКГН-х120+1х35	290	0,008	0,950	100	
Паспортные данные двигателя постоянного тока ДП-52	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Напряжение возбуждения, В
	60	305	220	1230	85
Паспортные данные понижающего трансформатора ТМ-25	Класс напряжения, кВ	Мощность, кВА	Напряжение к.з. при 75°C	Потери, Вт	
				х.х.	к.з.
	6	25	4,5	130	600

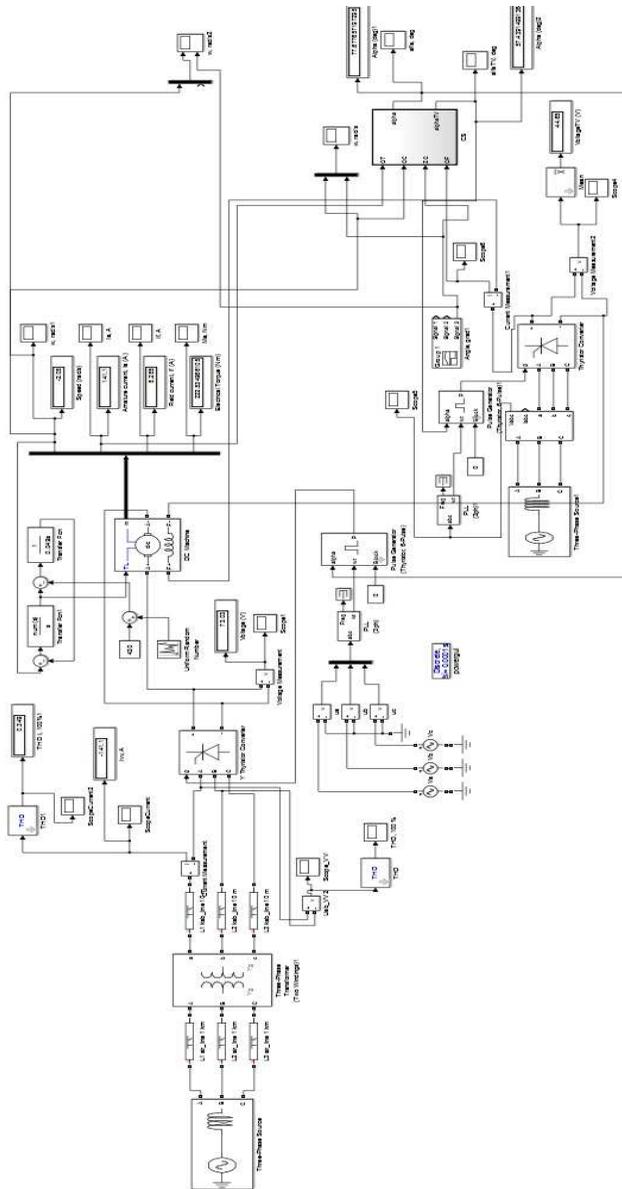


Рис. 2. Имитационная модель системы управления электроприводом бурового станка

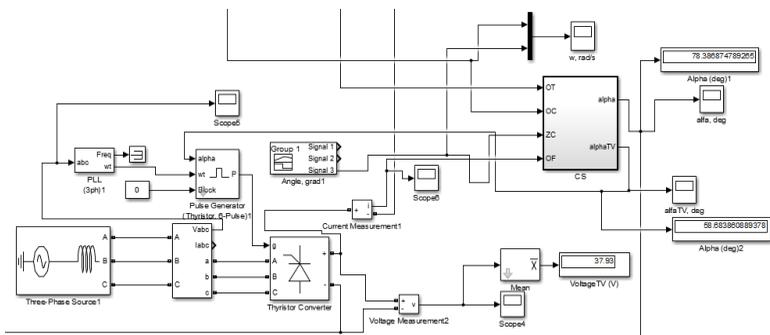


Рис. 3. Реализация схемы возбуждения

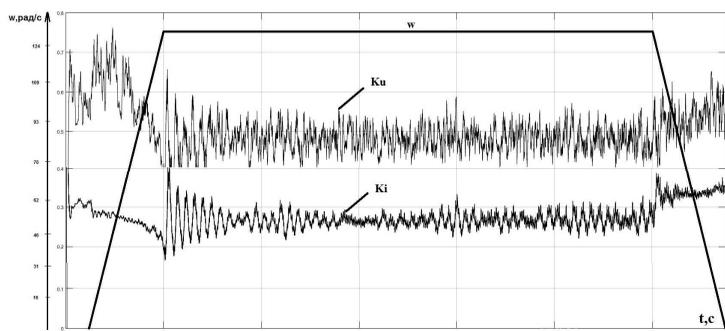


Рис. 4. Коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения

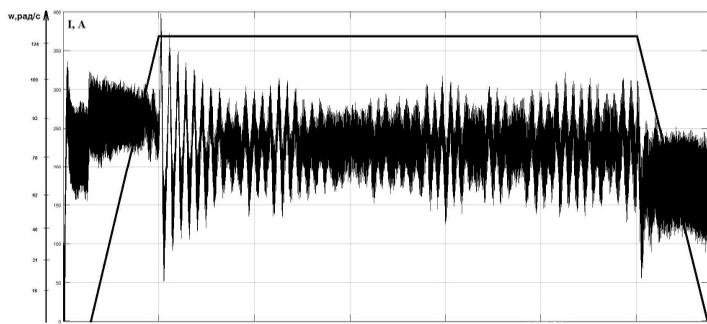


Рис. 5. Ток якорной цепи двигателя

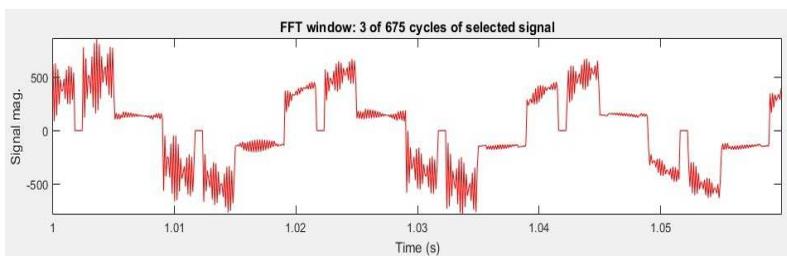


Рис. 6. Осциллограмма кривой потребляемого напряжения на низкой стороне понижающего трансформатора

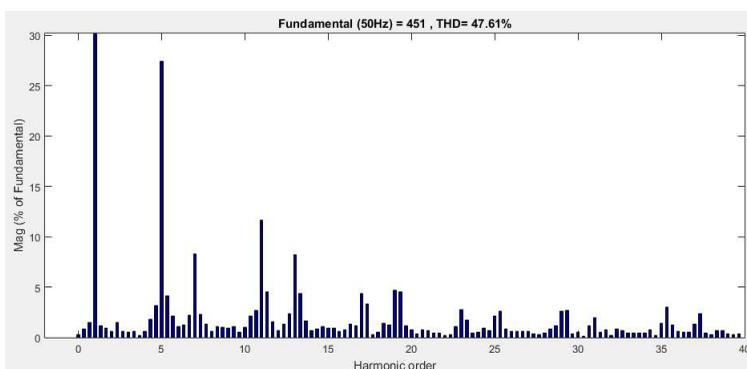


Рис. 7. Спектр гармонических составляющих напряжения

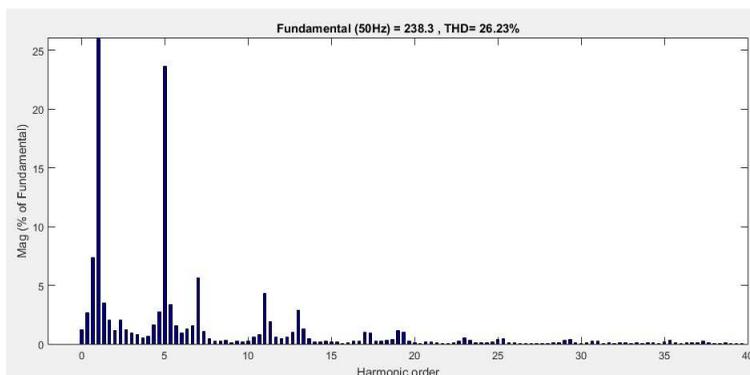


Рис. 8. Спектр гармонических составляющих тока

Выводы по работе

1. Имитационная модель электропривода вращателя СБШ-250, построенная с учетом дополнительной нагрузки, в пакете Matlab Simulink, позволяет получать показатели электромагнитной совместимости и значения энергетических величин при любых динамических процессах.

2. Результаты имитационного моделирования показателей ЭМС позволяют наглядно представить изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока и напряжения в виде графиков на обобщенной тахограмме движения. В частности, на участке установленного режима работы двигателя, данные коэффициенты принимают значения 25,23% и 47,61% соответственно, что существенно больше значений нормируемых ГОСТ 32144-2013.

3. Для снижения влияния высших гармоник тока и напряжения в сетях карьерного электроснабжения с электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками целесообразно использовать активные фильтры гармоник, реагирующие на изменение уровня высших гармоник при динамических процессах электроприводов.

Библиографический список

1. Схематехнические решения активной фильтрации кривой тока в четырехпроводной трехфазной сети для обеспечения качества электрической энергии / С.Ю. Долингер, В.Н. Горюнов, А.А. Планков, О.А. Сидоров // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 78–85.

2. **Авербух М.А.** Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 147 с.

3. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». М.: Стандартинформ, 2013. 16 с.

4. **Кутузов Б.Н.** Теория, техника и технология буровых работ. М.: Недра, 1972. 312 с.

5. **Нанкин Ю. А., Пипко П. М., Балагуров Л. И.** Станки шарошечного бурения. М.: Недра, 1971. 252 с.

6. Характеристики СБШ-250 [Электронный ресурс]. URL:<http://www.sbsbsh-250.ru/manuals> (дата обращения: 02.11.2018).

7. Моделирование динамических процессов с помощью Matlab Simulink [Электронный ресурс]. URL: <https://studfiles.net/preview/2264215/page:57/> (дата обращения: 04.11.2018).

ОСНОВНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В СЕТЯХ ОТ ПРИВодОВ ЛИФТОВ

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

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

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

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

***Аннотация.** В статье рассматриваются условия возникновения возмущающих воздействий, нарушающих работоспособность управляющих и регулирующих устройств, работающих при взаимодействии с силовыми органами современных электроприводов. Цель исследования – выявление рациональной системы управления лифтовым электроприводом на основе анализа динамических характеристик и гармонических колебаний тока в питающей цепи двигателя. Задачи исследования – анализ составляющих полной мощности с выделением мощности искажения и гармонический анализ колебаний тока в питающей цепи двигателей. В результате проведенного исследования выявлена наиболее предпочтительная схема с использованием частотного управления и фильтрацией высших гармоник с применением индуктивностей. Необходимый для оптимальной работы средний уровень совместимости достигается путём уменьшения внутреннего сопротивления сети или повышения помехоустойчивости всех компонентов приводной системы.*

Вопросам обоснования электрических схем управления питанием лифтовых приводов в настоящее время уделяется большое внимание [1, 2]. Следует отметить, что со стороны потребителей наблюдается ужесточение требований к характеристикам приводов с целью улучшения комфортности при эксплуатации [3].

Изменение напряжения питающей сети при работе лифтовых приводов происходит в процессе прямого пуска электродвигателя за счёт резкого увеличения пускового тока. Привод лифта включает в себя двухскоростной асинхронный двигатель с переключаемыми обмотками. Разгон двигателя и работа с установившейся скоростью осуществляется включением в сеть обмотки с малым числом полюсов. Для замедления и приближения к остановке (этажу) происходит переключение на обмотку с большим числом полюсов. Изменяющийся во времени пусковой ток нагружает питающую сеть и создаёт зависимость от времени падения напряжения на её сопротивлении.

Питающая сеть получает при этом максимальную токовую нагрузку, величина которой в 5...6 раз больше номинального тока электродвигателя; при переключении на обмотку с большим числом полюсов величина нагрузки превышает величину номинального тока в 2...2,5 раза. Принцип возникновения обратного воздействия представлен на рис. 1.

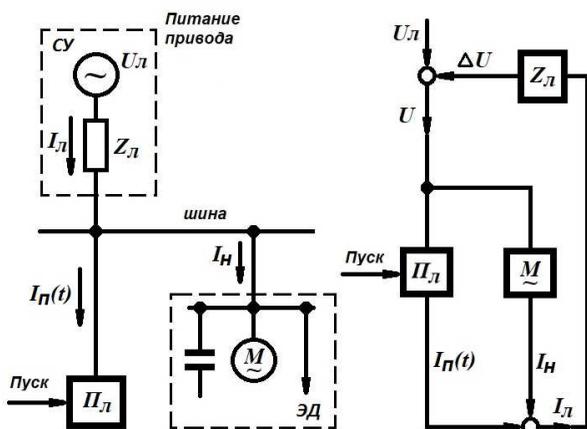


Рис. 1. Обратное воздействие на сеть в системе: ПЛ - привод лифта; СУ, ЭД - потребители

Изменяющийся во времени и возникающий при пуске привода ток $I_{\Pi}(t)$ нагружает питающую сеть и создаёт нестационарное напряжение $U_{\text{л}}$ на внутреннем сопротивлении линии $Z_{\text{л}}$.

Вместе с током потребителя (привода) $I_{\text{н}}$, величина которого в стационарном режиме принимается постоянной, результирующее отклонение от синусоидального источника напряжения сети составляет

$$\Delta U = U - U_{\text{л}} = Z_{\text{л}}(I_{\Pi} + I_{\text{н}}). \quad (1)$$

Сумма выходных величин $(I_{\Pi}(t) + I_{\text{н}})$ оказывает обратное воздействие на входную величину U за счёт внутреннего сопротивления сети $Z_{\text{л}}$.

На рис. 2 приведена принципиальная схема привода лифта с двухскоростным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Эта схема согласно уравнению (1) приводит к соответствующим поме-

хам в напряжении сети, которые при внутреннем сопротивлении сети $Z_{\text{Л}} = R_{\text{Л}} + jX_{\text{Л}}$ оцениваются отклонением напряжения:

$$U_{\text{Л}} = 3 I_{\text{П}} (R_{\text{Л}} \cos \varphi_{\text{Л}} + X_{\text{Л}} \sin \varphi_{\text{Л}}). \quad (2)$$

Под $\cos \varphi_{\text{Л}}$ понимается коэффициент мощности электродвигателя.

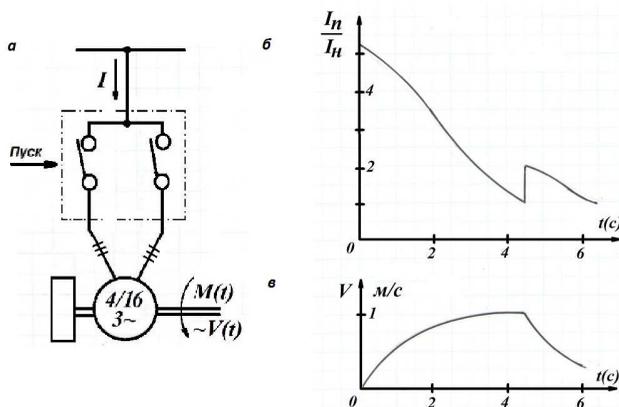


Рис.2. Принципиальная схема (а), токовые характеристики (б), скоростные характеристики (в) привода лифта

Обратное воздействие на сеть, создающее помехи в виде посадок напряжения, можно ограничить, применяя специальный двигатель с повышенным сопротивлением обмотки ротора, что снижает пусковой ток до 2,5...3 от номинального. При этом возрастают ток двигателя и электрические потери. Существенно снизить влияние тока на сеть можно применением в системах управления приводов вентильных преобразователей напряжения и тока.

У регулируемых приводов лифтов сеть содержит вентильные преобразователи, в которых присутствуют как основная (рабочая) гармоника тока, так и гармоники высшего порядка. Кроме того, управляемые вентильные преобразователи обладают свойством потреблять реактивную мощность, а при коммутациях возможна посадка напряжения, создающая помехи. Каждый вентильный преобразователь обуславливает несинусоидальной формы ток $I_{\text{П}}$, отбираемый у сети.

Для полного тока I с учетом n гармоник имеем зависимость:

$$I = (I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2)^{0,5} = I_1 \cdot (1/v_1 + 1/v_2 + \dots + 1/v_n)^{0,5}. \quad (3)$$

По сравнению с синусоидальным током коэффициент первой гармоники v_1 вызывает изменение величин полной и активной мощностей, что учитывается посредством эквивалентного коэффициента мощности $k_E = v_1 \cos \varphi$.

На практике это влияние на соотношение мощностей не является определяющим, т.к. следует учитывать возможные резонансные явления, которые при появлении высших гармоник тока и соответствующем усилении могут привести к недопустимо большим воздействиям. При оценке резонансных явлений возможен неблагоприятный режим работы из-за отсутствия в этом случае гашения активных нагрузок.

Уменьшение нагрузки системы электропитания, возникающей вследствие появления высших гармоник, выполнимо двумя способами:

- включение в вентильном преобразователе тока устройств генерирующих малое количество высших гармоник;
- установка цепей фильтра (последовательные резонансные контуры), согласованных с соответствующей частотой гармоники.

У управляемых вентильных сетевых преобразователей прохождение тока $I_{II}(t)$ приводит к соответствующему сдвигу фазы между напряжением сети и током. В результате возникает индуктивная нагрузка питающей сети (управляющая реактивная нагрузка). При коммутировании сети, т.е. постоянного перехода сетевого тока вследствие реактивного сопротивления сети, это так называемое перекрытие вызывает дополнительный сдвиг фазы тока.

Потребляемая вентильным преобразователем тока реактивная мощность создаёт, как правило, дополнительную нагрузку на энергопитающую сеть. При запуске с помощью вентильных преобразователей сетевого тока могут возникнуть значительные толчки реактивной мощности, которые вызывают соответствующие помехи в напряжении сети. Нежелательные последствия воздействия реактивной мощности можно ограничить различными компенсационными способами. Применением конденсаторных батарей снижается потребление реактивной мощности из сети, а резонансные явления, вызываемые высшими гармониками тока, подавляются с помощью дросселей.

Содержащиеся в сетевом токе $I_{II}(t)$ высшие гармоники I_V вызывают колебания напряжения сети с амплитудой $U_V = I_V Z_{II}$. В случае коммутирования сети на эти гармоники напряжения накладываются ещё и

кратковременное снижение напряжения сети, вызываемое двухфазным коротким замыканием сети при одновременно продолжающемся перекрытии, которое называется коммутационными посадками. Число высших гармоник напряжения можно уменьшить путём установки цепей фильтра, а снижение напряжения ограничивается с помощью сглаживающего фильтра.

Степень обратного воздействия на сеть регулируемым приводом лифта определяется в значительной мере структурой вентильного преобразователя тока, подключённого со стороны сети. Достаточно часто применяется регулируемый привод с питанием от трёхфазного исполнительного органа с питанием от статического преобразователя частоты и с неуправляемым выпрямителем сетевого напряжения.

Использование привода с трёхфазным питанием процесса разгона и питанием постоянным током (рис. 3) при замедлении дает возможность уменьшить до 70% величину пускового тока. У обычного привода величина пускового тока не зависит от нагрузки и направления перемещения кабины. Регулируемый привод позволяет связать необходимую величину пускового тока с учётом изменения величины нагрузки и направления перемещения.

За счёт управления фазовой отсечкой напряжения трёхфазового исполнительного органа создаётся вращающий момент разгона, а устанавливая различные углы управления можно получить семейство кривых «вращающий момент-частота вращения». Для торможения в обмотку с большим числом полюсов подаётся постоянный ток с помощью управляемого выпрямителя, а регулирование необходимого тормозного момента осуществляется изменением постоянного напряжения.

Создаваемые во время разгона высшие гармоники сетевого тока зависят от режима работы исполнительного органа и от коэффициента мощности двигателя [4]. На рис. 3б приведена схема спектра гармоник для обоих граничных значений коэффициента мощности ($\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0$).

Стандартный инвертор, соединённый с мощным источником потребляет несинусоидальный ток, но сумма различных гармоник тока кроме основной 50 Гц гармоники, включает нечётные гармоники тока $v = 5, 7, 11, 13$ и т.д., причем 5-я гармоника составляет 67% от основной гармоники, 7-я гармоника – 47% и т.д. [5]. При таком спектре гармоник эквивалентный ток примерно на 30% превышает первую гармонику.

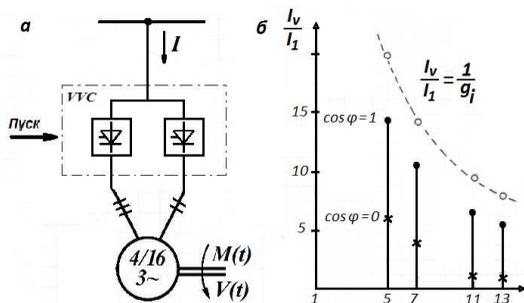


Рис. 3. Привод с трёхфазным питанием процесса разгона и питанием постоянным током при замедлении. *a* – электрическая схема – трёхфазный выпрямительный мост; *б* – диаграмма сетевого тока: вверху - холостой ход, внизу - ток при половинной нагрузке

Стандарт EN 12015-12016 устанавливает определённые пределы гармоник тока: 5-я гармоника, например, не должна быть более 30% от основной гармоники, 7-я гармоника не более 18%, и т.д. Это достигается включением в схему индуктивности порядка 1,2 мГн. Эквивалентный ток может превышать первую гармоническую составляющую примерно на 6%.

Лучшим с технологической точки зрения, но более дорогим, является применение регенеративных инвертеров. Процесс торможения происходит при сетевых токах значительно меньшей величины, причём появляются высшие гармоники.

В случае преобразовательного привода с неуправляемым выпрямителем сетевого напряжения вентильный преобразователь тока [5] представляет собой неуправляемую трёхфазную мостовую схему (рис. 4). Через промежуточный контур постоянного напряжения с конденсатором C и регулируемым импульсным инвертором ПАМ осуществляется питание трёхфазного двигателя. В данном регулируемом приводе несущественна управляемая реактивная мощность вентильного преобразователя сетевого тока, изменение нагрузки привода оказывает обратное воздействие на сеть [7].

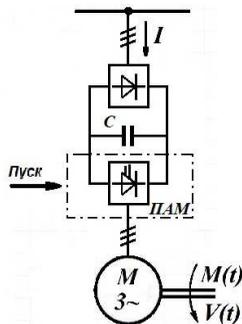


Рис. 4. Привод с неуправляемым выпрямителем сетевого напряжения

Выводы по работе. В результате проведенного исследования обоснована схема питания электропривода лифта, обеспечивающая необходимую комфортность и снижение затрат энергии за счет уменьшения величин пульсаций и эффективного тока. Необходимый допустимый уровень электромагнитной совместимости достигается за счет уменьшения внутреннего сопротивления сети или повышения помехоустойчивости оборудования приводной системы.

Библиографический список

1. **Архангельский Г.Г.** Современные тенденции и перспективы развития лифтостроения // Стройпрофиль. 2008. № 7. С.94–96.
2. **Ишханов В.П.** Электрооборудование лифтов, перспективы развития и применения // Электротехника. 2001. № 1. С.43–46.
3. **Макаров Л.Н.** Современный электропривод скоростных лифтов повышенной комфортности // Электротехника. 2006. № 5. С. 42–46.
4. **Mazzoni V.** Inverter and low-frequency harmonics // Elevatori. 2001. Vol. 30, No 2, P. 75–81.
5. **Mazzoni V.** Calculations, consumptions and energy saving in lifts // Elevatori. 2007. Vol. 36, No.1. P. 46–60.
6. **Андрианов М.В., Афонин В.И., Родионов Р.В.** Выбор преобразователя частоты для применения в электроприводе, работающем с постоянным моментом // Электротехника. 2008. № 5. С. 37–42.
7. **Афонин В.И., Балабанов И.Н.** Регулируемый электропривод лифтов с асинхронными электродвигателями. // Электротехника. 2006. № 5. С. 37–42.

УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ СО СВЕТОДИОДНОЙ ИНДИКАЦИЕЙ

ст. преподаватель **Балобанов Р.Н.**

студент **Ахмадеев А.А.**

*Казанский государственный
энергетический университет, г. Казань*

***Аннотация.** В статье рассмотрена возможность использования устройств контроля состояния высоковольтных изоляторов со светодиодной индикацией, устанавливаемых на изолирующие конструкции высоковольтных линий и подстанций. Приведена схема устройства и описан ее принцип действия. Показана осущестимность индикации ранней стадии развития дефекта изоляции в лабораторных и натурных экспериментах на реальных объектах энергосистемы при использовании устройств со светодиодной индикацией.*

Описание объекта и методики исследования

Объектом исследования являются высоковольтные изоляторы. Согласно брошюре «Основные результаты функционирования объектов электроэнергетики в 2016 году. Итоги прохождения осенне-зимнего периода (ОЗП) 2016–2017 годов», выпущенной Министерством энергетики РФ в 2017 году, число аварий, приведших к прекращению электроснабжения потребителей мощностью 10 МВт и более по причине повреждения изоляторов воздушных линий (ВЛ), составило 12% от общего числа аварий с таким ущербом на воздушных линиях электропередачи (ВЛЭП), подстанциях (ПС) и открытых распределительных устройствах (ОРУ). Если рассматривать только ВЛ, то это 22,6%. Данные показатели уступают только показателям из-за экстремальных внешних воздействий и значительно превосходят эти показатели вследствие, например, гроз или гололеда [1]. Повреждение изоляторов в большинстве случаев происходит в результате старения, поверхностного загрязнения, производственных дефектов и случайных повреждений при ремонтных работах.

Особое место среди видов повреждений изоляции ВЛ занимают повреждения подвесных полимерных изоляторов, связанные с их пробоём или перекрытием. Согласно данным Научно-исследовательского

института электроэнергетики (EPRI) в США, где опыт эксплуатации полимерных изоляторов на ВЛ составляет более 30 лет, за последние 10 лет электросетевые предприятия США начали испытывать все большее число отказов полимерных изоляторов на линиях передачи 115 и 138 кВ. Исследования EPRI показали, что эти сбои обычно связаны с высокой напряженностью электрического поля, возникающего вблизи или на высоковольтных оконцевателях изолятора. Снижение надежности ВЛ обусловлено постоянной активностью электрических разрядов на металлических оконцевателях. Постоянное воздействие на изоляцию этих коронных разрядов приводит к образованию трещин в полимерной оболочке и разрушению торцевого уплотнения, поэтому необходим постоянный контроль за состоянием данного типа изоляторов [2].

В настоящее время в электроэнергетике находят применение радиоволновой, акустический, оптический и тепловизионный [3–5] методы контроля изоляторов. Использование данных методов удобно и эффективно при диагностировании опорных и подвесных изоляторов подстанций, но затруднительно при обследовании протяженных объектов, каковыми являются ВЛ. Приборное обследование ВЛ с летательных аппаратов так же не нашло широкого применения. Поэтому, по данным исследователей, более 40% компаний по-прежнему используют в основном визуальный осмотр оборудования. Инфракрасная диагностика и наблюдения приборами ночного видения применяются примерно на 15% предприятий, и лишь отдельные предприятия используют измерения радиоизлучения и ультразвуковой контроль.

Дистанционные методы контроля изоляторов так и не смогли вытеснить простой визуальный осмотр ВЛ и являются лишь дополнением к нему. В то же время при визуальном осмотре полимерных изоляторов не всегда удается выявить дефекты, так как в большинстве случаев они не видны. Следовательно, имеет место актуальная научная задача, связанная с недостаточной эффективностью существующих сегодня методов контроля изоляторов ВЛ. Ее анализ, выявил необходимость разработки и исследования новых способов контроля изоляции с помощью устройств, устанавливаемых на изоляторы, которые позволяли бы при визуальном осмотре ВЛ непосредственно сигнализировать о их состоянии.

Полученные результаты и их обсуждение

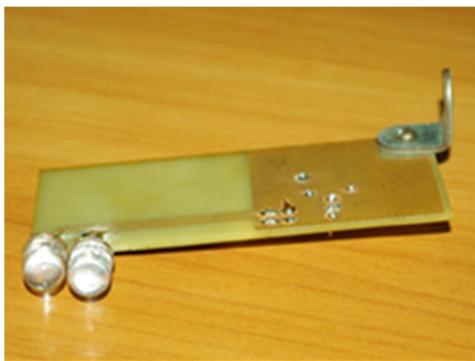
Одним из таких устройств является предложенный нами индикатор. Схема устройства выполнена на основе динисторов [6–7] (рис.1).

жение на его выводах (на С1) не достигнет 40 В. Как только напряжение достигнет нужного значения, динистор открывается и заряд с емкости С1 разряжается на светодиод HL1, вследствие чего светодиод выдает вспышку зелёного света. Одновременно со вспышкой напряжение на динисторе VD6 падает, и он закрывается. Далее емкость С1 снова заряжается до напряжения открытия динистора и цикл повторяется. Таким образом, зелёный светодиод работает в импульсном режиме.

При отсутствии разрядов на изоляции всегда будет срабатывать только зелёный светодиод HL1, поскольку из-за падения напряжения на диоде VD5 динистор VD7 всегда будет закрыт.

При определенной интенсивности разрядов на изоляторе импульсы, пройдя через второй (высокочастотный) контур с емкостью С2, повысят напряжение на динисторе VD7 до уровня выше, чем на динисторе VD6. Тогда VD7 откроется первым и загорится красный светодиод HL2. Значение емкости С2 подобрано таким образом, чтобы реагировать на появление коротких импульсов (≤ 1 мкс), вызванных разрядами на изоляторе. Более подробно работа светодиодного индикатора рассмотрена в диссертации.

По описанной выше схеме были изготовлены экспериментальные образцы индикатора, которые прошли испытания в высоковольтной лаборатории Казанского государственного энергетического университета и на действующих ВЛ и ОРУ. Внешний вид индикатора и расположение на изоляторе показаны на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Внешний вид (*а*) и расположение на изоляторе (*б*) вариантов светодиодного индикатора

Разработанный по указанной схеме индикатор способен выявить следующие виды дефектов и повреждений изоляторов:

1. Эрозия оболочки и образование трека на внешней поверхности защитной оболочки изолятора. Данный дефект может возникать при эксплуатации изоляторов в районах с сильными загрязнениями вследствие воздействия поверхностных разрядов в условиях увлажнения изоляторов.

2. Образование дендритов в стеклопластиковом стержне и треков на границе раздела «стержень - оболочка» в полимерном изоляторе.

Зачастую это сопровождается внутренней эрозией защитной оболочки вплоть до образования сквозных отверстий. Данное повреждение также связано с проникновением влаги в изолятор. Первопричиной повреждения чаще всего является дефект конструкции изолятора, а именно:

- недостаточная герметичность границы раздела между оболочкой и металлической арматурой;

- плохая адгезия оболочки к стеклопластиковому стержню.

Кроме того, нарушение герметичности может быть связано с повреждением (разрывами) оболочки при транспортировании изоляторов или монтаже.

По опыту эксплуатации данный вид повреждения полимерных изоляторов является наиболее распространенным. Пробой изолятора сопровождается возникновением электрической дуги с разрушением части защитной оболочки.

Локализовать место указанных повреждений при визуальном осмотре изоляторов на ВЛ практически невозможно из-за больших расстояний до них и необходимости выбора каждый раз ракурса наблюдения.

Подобные дефекты были симитированы в лаборатории. На снимке (рис. 3), изображены два полимерных изолятора ЛК 70/35, на которые подавалось напряжение переменного тока от 0 до 25 кВ. Один из изоляторов (правый) имеет дефект в виде продольного проводящего канала, шунтирующего часть конструкции (~30 %), а второй (левый) исправный. К верхним электродам обоих изоляторов прикреплены светодиодные индикаторы.



Рис. 3. Изображение дефектного и исправного полимерных изоляторов с установленными на них светодиодными индикаторами

Для проведения экспериментальной части работы была собрана электрическая схема (рис. 4), предназначенная для измерения токов утечки изолятора, а также параметров светодиодного индикатора дефекта.

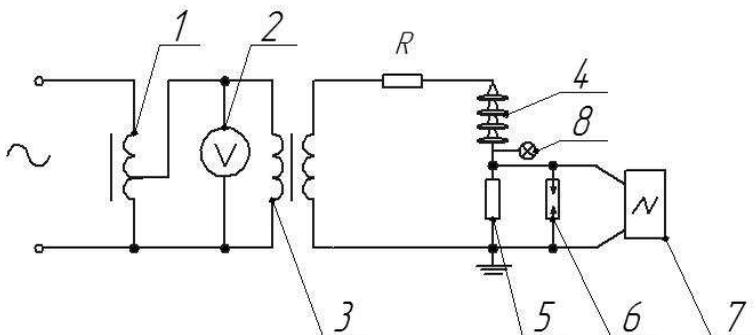


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1-регулируемый трансформатор; 2 - вольтметр; 3 - испытательный трансформатор; 4 – испытуемый изолятор; 5 –сопротивление ($r=1 \text{ КОМ}$); 6 – разрядник; 7 - осциллограф; 8 - светодиодный индикатор

Источником напряжения промышленной частоты является испытательный трансформатор ИОМ - 110 кВ (3). Напряжение на нем регулируется с помощью автотрансформатора РНО-10/250 (1). Резистор R

служит для защиты трансформатора от больших токов и большой крутизны среза напряжения при перекрытии испытуемого изолятора (4). Измерительная схема состоит из резистора $r=1$ кОм (5), разрядника (6), предназначенного для защиты осциллографа (7) при возникновении перенапряжений.

Эксперименты проводились на подвесных полимерных изоляторах марки ЛК 70/35 на напряжение 35 кВ. На изолятор марки ЛК 70/35 подавалось рабочее напряжение 20 кВ, а также искусственно создавался дефект путем закорачивания изолятора от 0 до 50 %. Определялась зависимость частоты следования импульсов зеленого светодиода от степени повреждения изолятора $F_v = f(n)$. Результаты эксперимента занесены в табл.1.

Таблица 1

Результаты эксперимента № 1

U , кВ	20	20	20	20	20	20
Доля дефект изолятора n , %	0	10	20	30	40	50
Частота следования импульсов светодиода F_v , 1/с	1,23	1,42	1,69	1,88	–	–
$K(n) = F_v(n) / F_v(0)$	1	1,15	1,37	1,52	–	–
Цвет светодиода (З – зеленый; К –красный)	З	З	З	З	К	К

Одним из главных достоинств разработанного индикатора является его универсальность. Как показали лабораторные и натурные эксперименты, его можно использовать без каких-либо изменений в конструкции на различных типах изоляторов и на различные классы напряжений, как на высоковольтных линиях, так и на ОРУ. Апробацию и проверку индикаторы прошли на гирляндах подвесных стеклянных изоляторов, подвесных полимерных изоляторов линий напряжением 35 и 110 кВ. На ОРУ теми же индикаторами, установленными на изолирующую штангу, были обследованы опорные фарфоровые и полимерные изоляторы напряжением 110-220 кВ. Нам представляется наиболее перспективным использование индикаторов для контроля полимерных изоляторов класса напряжения от 35 кВ до 500 кВ. Однако для подтверждения данного вывода требуется провести дополнительные исследования.

Выводы: Разработано устройство контроля состояния высоковольтных изоляторов (светодиодный индикатор) на линиях электропередачи и в распределительных устройствах, основанный на регистрации изменения электрического поля в области изолятора при появлении дефекта.

Разработанный светодиодный индикатор состояния высоковольтной изоляции не требует автономного источника питания и позволяет фиксировать как пробои части изолятора, так и возникновение на нем электрических разрядов.

Проведенные лабораторные и натурные эксперименты показали возможность использования разработанного индикатора для контроля состояния изоляции подвесной и опорной изоляции ВЛ и ОРУ.

Индикаторы можно использовать как стационарные приборы, закрепленные непосредственно на изоляторе, так и в качестве переносного прибора, устанавливаемого на изолирующую штангу.

Данные индикаторы помогут персоналу электрических сетей оценить состояние изоляторов при плановых осмотрах ОРУ

Библиографический список

1. Основные результаты функционирования объектов электроэнергетики в 2016 году. Итоги прохождения ОЗП 2016–2017 годов [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/6224>.
2. Learning from Service Experience with Composite Line Insulators [Электронный ресурс]. URL: <http://www.inmr.com/learning-from-service-experience-with-composite-line-insulators/>
3. **James R.E., Su Q.** Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment. ИЕТ, 2008. 276 p.
4. Акустическая диагностика энергетического оборудования / Р.С. Арбузов, А.Г. Овсянников, В.М. Толчин и др. // Сб. трудов 7-го симпозиума «Электротехника 2010 год», май 27-29. Т.3. М., 2003. С. 186–188.
5. Gigre Working Group 22.03 (convener C. de Tourreil). Composite insulators handling guide // Electra. 2001. No. 195. P. 50–53.
6. Устройство оптической индикации дефекта высоковольтной изолирующей конструкции / Р.Н. Балобанов, Д.К. Зарипов, Р.А. Насибуллин, С.М. Маргулис // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 3–4. С. 119–125.
7. **Zaripov D.K., Balobanov R.N.** An Indicator of a Defect in a High-Voltage Insulating Structure // Russian Electrical Engineering. 2016. V. 87, No 6. P. 311–315.

ОЦЕНКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТРАНСПОРТ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–20 КВ

магистрант **Бондарь В.В.**

магистрант **Юдин А.А.**

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

***Аннотация.** Статья посвящена оценке мероприятий по снижению потерь электроэнергии на примере участка распределительных сетей 10 кВ. Ставится задача оценить эффективность мероприятий по снижению потерь электроэнергии на основе теории чувствительности. На основе анализа данных сделаны выводы по выбору приоритетных мероприятий, способствующих снижению потерь электроэнергии.*

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

Важнейшим количественным показателем технического состояния электрических сетей и уровня их эксплуатации является величина потерь электроэнергии и тенденции ее изменения. Далее необходимы: оценка полученных значений и структуры потерь [1], их анализ и разработка путей движения к оптимальным параметрическим и режимным характеристикам сетей [2]. В настоящее время нет достаточно четких рекомендаций по проведению качественного анализа режимов и потерь. Это объясняется многокритериальностью задачи и отсутствием разработанных однозначных критериев качества функционирования электрических сетей [3]. Сами мероприятия по снижению потерь изучены достаточно хорошо. Они классифицированы, определены показатели оценки их эффективности, а также порядок разработки, планирования и очередность внедрения мероприятий [4]. В то же время количественные критерии, обосновывающие необходимость применения того или иного мероприятия в конкретных условиях функционирования электрических сетей, практически отсутствуют. Выполнить качественный аналитический обзор всех мероприятий не представляется возможным.

Поэтому целью работы является предварительная количественная оценка возможных мероприятий по снижению потерь.

В качестве таких критериев предлагается использовать коэффициенты чувствительности. Исходным критериальным выражением служит формула для определения чистого дисконтированного дохода [5]:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{T_p} \mathcal{E}_t \cdot (1+E)^{-t},$$

где ЧДД – чистый дисконтированный доход; \mathcal{E}_t – чистый поток платежей; T_p – расчетный период; E – норматив дисконтирования.

Чистый дисконтированный доход рассчитывается дисконтированием чистого потока платежей \mathcal{E}_t , который определяется как разность между притоками и оттоками денежных средств:

$$\mathcal{E}_t = O_t - I_t - K_t,$$

где O_t – стоимостная оценка результатов деятельности объекта; I_t – эксплуатационные издержки; K_t – капитальные вложения.

Для проектов реконструкции и модернизации оценка выручки от реализации инвестиционного проекта усложняется. В данном случае выручкой следует считать высвобождаемые денежные ресурсы от реализации мероприятий по снижению потерь электроэнергии, направленные на уменьшение эксплуатационных издержек.

Изменение эксплуатационных издержек:

$$\Delta I_t = I_0 - I_t$$

Запишем выражение годовых издержек:

$$I_t = \left(\Delta P_{xxi} \cdot T + \Delta P_{ki} \cdot \left(\frac{S_{ni}}{S_{номi}} \right)^2 \cdot \tau \right) \cdot \beta + \alpha_m \cdot K_{si},$$

где ΔP_{xx} – потери мощности в трансформаторе на холостом ходу; T – расчетный период; ΔP_k – потери мощности короткого замыкания в трансформаторе; S_n – мощность нагрузки; $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора; τ – время наибольших потерь; β – тариф на оплату потерь электроэнергии; α_t – коэффициент отчислений от капитальных вложений трансформаторов; K_s – капиталовложения в трансформаторы.

Капитальные вложения на замену трансформатора:

$$K_{si} = K_{mi} + K_{0si} + K_{\partial mi} - K_{ликj},$$

где K_{0i} – стоимость приобретенного трансформатора; $K_{\partial i}$ – стоимость демонтажа i -го трансформатора; K_{mi} – стоимость монтажа i -го трансформатора; $K_{ликj}$ – ликвидационная стоимость j -го трансформатора.

Будем считать, что капитальные вложения можно представить в виде линейных уравнений регрессии.

$$\begin{aligned} K_{mi} &= f(S_{номi}), K_{\partial mi} = f(S_{номi}), K_{0si} = f(S_{номi}): \\ K_{0S} &= a_{0S} + b_{0S} \cdot S_{номi}; \\ K_M &= a_M + b_M \cdot S_{номi}; \\ \Delta P_{xxi} &= a_{\Delta P_{xx}} + b_{\Delta P_{xx}} \cdot S_{номi}; \\ \Delta P_{ki} &= a_{\Delta P_k} + b_{\Delta P_k} \cdot S_{номi}; \\ a_s &= a_M + a_{0S} + k_{\partial M} \cdot a_M; \quad b_s = b_M + b_{0S} + k_{\partial M} \cdot b_M. \end{aligned}$$

Модифицируем составляющую капитальных затрат:

$$K_{si} = a_s + b_s \cdot S_{номi} + (a_{0S} + b_{0S} \cdot S_{номi}) \cdot \left(1 - \frac{P_{pi}}{100} \cdot t\right),$$

где p_p – норма отчислений на реновацию; t – срок службы оборудования до его демонтажа.

Численные значения коэффициентов регрессии a и b получены статистической обработкой данных (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты уравнений регрессии

Коэффициент	a	b	Коэффициент корреляции
ΔP_{xx}	0,138	0,00196	0,989
ΔP_{k^*} (25-100 кВА)	0,157	0,021	0,999
ΔP_{k^*} (160-630 кВА)	1,35	1	0,991
K_{0S}	0,252	0,00287	0,99
K_M	0,1	0,001	0,998

Целевая функция будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} &= И_0 \cdot (1 + E)^{-t} - \\ &- \left((a_{\Delta P_{xx}} + b_{\Delta P_{xx}} \cdot S_{номi}) \cdot T + (a_{\Delta P_k} + b_{\Delta P_k} \cdot S_{номi}) \cdot \left(\frac{S_{ни}}{S_{номi}} \right)^2 \cdot \tau \right) \cdot \beta \cdot (1 + E)^{-t} - \\ &- (1 + \alpha_m) \cdot \left(a_s + b_s \cdot S_{номi} + (a_{0S} + b_{0S} \cdot S_{номi}) \cdot \left(1 - \frac{P_{pi}}{100} \cdot t\right) \right) \cdot (1 + E)^{-t}. \end{aligned}$$

Из теории чувствительности известно, что для любого обобщенного показателя Y к применению того или иного влияющего фактора X используют обычные частные производные [6]:

$$S_j = \frac{\partial Y}{\partial X_j},$$

где S_j – чувствительность показателя; Y – обобщенный режимный показатель; X_j – первичные исходные данные.

Коэффициенты чувствительности в рассматриваемом виде не дают представления об оценке силы влияния отдельных показателей на результат. Для представления о силе влияния отдельных исходных данных на изучаемый показатель используется коэффициент эластичности [7]:

$$\delta_i = S_j \frac{X_j}{Y}.$$

Коэффициент эластичности для целевой функции:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{ЧДД}}{\partial S_{\text{ном}i}} \cdot \frac{S_{\text{ном}i}}{\text{ЧДД}} &= (1 + E)^{-t} \cdot \beta \cdot \frac{S_{\text{ном}i}}{\text{ЧДД}} \cdot \\ &\cdot \left(-b_{\Delta P_{xx}} \cdot T + 2 \cdot \tau \cdot a_{\Delta P_k} \cdot \frac{S_{ni}^2}{S_{\text{ном}i}^3} + \tau \cdot b_{\Delta P_k} \cdot \frac{S_{ni}^2}{S_{\text{ном}i}^2} \right) - \\ &- (1 + E)^{-t} \cdot (1 + \alpha_m) \cdot \frac{S_{\text{ном}i}}{\text{ЧДД}} \cdot \left(b_s + b_{0s} \cdot \left(1 - \frac{P_{pi}}{100} \cdot t \right) \right). \end{aligned}$$

Очевидно, что наиболее эффективным мероприятием по оптимизации сети будет то, при котором величина коэффициента эластичности будет наибольшей. В качестве первого шага следует выполнить замену трансформатора, для которого коэффициент эластичности будет принимать наибольшее значение.

Произведем расчет на примере тестовой схемы, представленной на рис. 1. Необходимые данные представлены в табл. 1.

При расчете по данной математической модели примем допущения: 1) трансформаторы заменяются в течении года; 2) параметры трансформатора соответствуют паспортным данным и не изменяются в процессе эксплуатации; 3) нагрузки не изменяются в процессе всего расчета. 4) примем β равным 0,002 тыс. руб./кВт·ч; p_p равным 20 %; α_t равным 0,2 о.е; E равным 0,1 о.е.

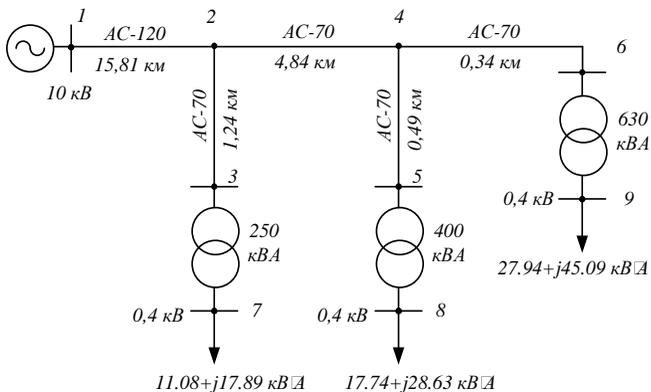


Рис. 1. Тестовая схема распределительной сети 10 кВ

Таблица 2

Параметры исходного режима сети

Ветвь	Установленный трансформатор	Коэффициент загрузки, о.е	τ , ч
2–3	ТМ–250	0,084	2500
4–5	ТМ–400	0,084	2500
6–9	ТМ–630	0,084	2500

Результаты численных расчетов по оптимизации электрической сети представлены в табл. 3 и табл. 4.

Таблица 3

Последовательность замены трансформаторов

Шаг	Ветвь	Установленный трансформатор	Рекомендуемый трансформатор
1	6–9	ТМ–630	ТМ–160
2	4–5	ТМ–400	ТМ–100
3	2–3	ТМ–250	ТМ–63

Таблица 4

Результаты расчета оптимизации сети

Шаг	I_0 , тыс. руб.	I_1 , тыс. руб.	ЧДД, тыс. руб.	δ_i
1	42,584	10,715	31,869	-0,134
2	27,873	7,825	20,047	-0,124
3	18,273	5,996	12,276	-0,12

Мероприятия, связанные с заменой установленных трансформаторов на трансформаторы меньшей мощности, показали свою эффективность, так как коэффициент эластичности уменьшался с каждым шагом оптимизации. Как следует из оптимизации наиболее эффективным шагом является 1-й, так как значение коэффициента эластичности и чистого дисконтированного максимално. Если на практике невозможно проведение всех оптимизационных шагов, исходя из недостатка финансирования, то возможно применение только наиболее эффективных.

Можно сделать следующие выводы:

- 1) в качестве критерия оптимальности можно использовать чистый дисконтированный доход;
- 2) коэффициент эластичности позволяет эффективно произвести оценку состояния трансформаторной подстанции.

Библиографический список

1. **Дубенко Ю.В., Дышкант Е.Е.** Интеллектуальная система контроля и прогнозирования потерь электроэнергии // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 3. С. 131–135.
2. **Белоусов А.В., Кошлич Ю.А., Быстров А.Б.** Перспективы применения современных статистических и детерминированных методов прогнозирования в системах мониторинга энергопотребления // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 192–196.
3. **Федин В.Т.** Основы проектирования энергосистем: учебное пособие для студентов энергетических специальностей: В 2 ч. Ч.1. Минск: БНТУ, 2009. 322 с.
4. **Фурсанов М.И.** Теоретические основы обеспечения оптимальных уровней потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2005. № 6. С. 5-13.
5. **Воротницкий В.Э., Железко Ю.С., Казанцев В.Н.** Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1983. 368 с.
6. **Пиковский А.А., Таратин В.А.** Техничко-экономические расчеты в энергетике в условиях неопределенности. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 195 с.
7. **Фурсанов М.И.** Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005. 207 с.

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТРЕНДОВ ИЗМЕНЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ СМЕШАННЫХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ МИКРОРАЙОНОВ И ГОРОДОВ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОСТИ ДАННЫХ

канд. техн. наук, доц. **Гашо Е.Г.**

канд. техн. наук, доц. **Гужов С.В.**

канд. экон. наук, доц. **Кролин А.А.**

*Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва*

***Аннотация.** В работе дается краткий анализ современных методов анализа, подтверждения и прогнозирования удельных смешанных нагрузок электропотребителей микрорайонов и городов и формулируются основные проблемы, стоящие перед реорганизацией отрасли с учётом требований цифровизации экономики. С целью выявления преимуществ и недостатков различных решений по оптимизации составления энергобалансов строится математическая модель, позволяющая анализировать потребность микрорайонов и городов в электрической энергии и осуществлять прогноз развития городских энергосистем в различных социально-экономических и природно-климатических условия.*

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 16-19-10568.

1. Состояние задачи прогнозирования нагрузок смешанных потребителей электроэнергии в России

Планирование режимных параметров и технико-экономических показателей является одним из важнейших задач промышленного и коммунального комплексов Российской Федерации. Необходимость точного прогнозирования обусловлена как технологическими, так и экономическими причинами. Точный расчёт обеспечивает оптимальные с технической точки зрения надёжность и резерв мощности системы. В экономическом аспекте корректный прогноз позволяет потребителям целесообразнее планировать закупку энергоресурсов с учётом изменений тарифной политики, климатических и метеорологических факторов, технологических, социальных и иных особенностей.

Снижение непроизводительных издержек и удельной энергоёмкости на 40% к 2020 году, а также повышение энергетической эффективности промышленными и коммунальными системами являются одни-

ми из основных задач, поставленных перед энергетической отраслью и зафиксированных в Указе Президента РФ от 4 июня 2008 г. N 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» и требованиях к отраслевым, региональным программам энерго- и ресурсосбережения.

Решение актуальной для электроэнергетики задачи составления прогнозных балансов ТЭР основывается на использовании полной и достоверной информации о процессах в оборудовании и энергосистеме в целом. Ввиду известной специфики энергосистем, основным способом получения такой информации является математическое моделирование [1]. Доминирующее сегодня сугубо численное моделирование и различные программно-вычислительные комплексы его реализации далеко не всегда обеспечивают необходимую полноту и достоверность указанной информации [2]. В связи с этим неизбежно возникает необходимость применять весьма существенные упрощения и ограничения, что приводит к снижению точности прогноза [3].

Целью работы является разработка методов, алгоритмов и программных средств анализа и планирования балансов энергоресурсов, потребляемых промышленными и коммунальными системами в условиях недостаточности данных.

Практическая ценность при проведении промышленных экспериментов и обследований ряда предприятий энергоёмких отраслей промышленности состоит в реализации государственной задачи 40%-го снижения энергоёмкости ВВП к 2020 г. по сравнению с 2007 г. и определении приоритетов использования подходов к цифровизации энергетической отрасли экономики и снижению затрат на составление энергобалансов посредством автоматизации процедуры прогнозирования объёмов потребления топливно-энергетических ресурсов промышленных и коммунальных потребителей в условиях недостаточности данных.

2. Пример составление прогнозной функции электропотребления г. Анадырь

Для анализа выбрана система электроснабжения г. Анадырь, получающая электрическую энергию от двух источников. Отличительной особенностью энергосистемы является её изолированность от единой энергосистемы страны. Не вполне точное соответствие объёмов поставленной в сеть и потребленной электрической энергией свидетельствует о факте отсутствия системы АСТУЭ. Согласно данным за 2017 год, погрешность от ручного сбора данных об электропотребле-

нии составляет 4,1%. Для последующего анализа применим математический аппарат анализа статистических данных в условиях их недостаточности и частичной недостоверности.

На основании почасовых данных за 2017 год проведён анализ суммарного электропотребления г. Анадырь, включая ЖКХ, уличное освещение, дорожную инфраструктуру, предприятия [4] и пр. Регрессионный анализ проводился на основании определения корреляции относительно 7 факторов:

1. T – температура воздуха на высоте 2 метра над поверхностью земли, °С;

2. P_0 – атмосферное давление на уровне станции, мм.рт.ст.;

3. U – относительная влажность на высоте 2 метра над поверхностью земли, %;

4. DD – угол направления ветра на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, осредненное за 10-минутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения, м/с;

5. FF – скорость ветра на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, осредненная за 10-минутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения, м/с;

6. N – общая облачность, %;

7. Π – продолжительность светового дня, мин.

Использование регрессионного анализа с $R^2 = 0,8448$ позволило описать следующую зависимость электропотребления города:

$$W = 2923,2 - 53,1T + 3,4P_0 + 2,6U - 0,4DD + 21,8FF + 267,9N + 1,4\Pi. \quad (3)$$

Использование полиномиального определения с $R^2 = 0,8669$ позволило выявить аналогичную зависимость (рис. 1):

$$W = -5 \cdot 10^{-6}x^4 + 0,0041x^3 - 0,9798x^2 + 62,434x + 5321,7. \quad (4)$$

Несмотря на достаточно высокий коэффициент корреляции соответствия полинома фактическим значениям, использование подобного подхода для прогнозирования электропотребления невозможно, в силу отсутствия учёта ряда влияющих факторов [5].

На основании полученных данных в табл. 1 проанализирована значимость воздействия климатических факторов.

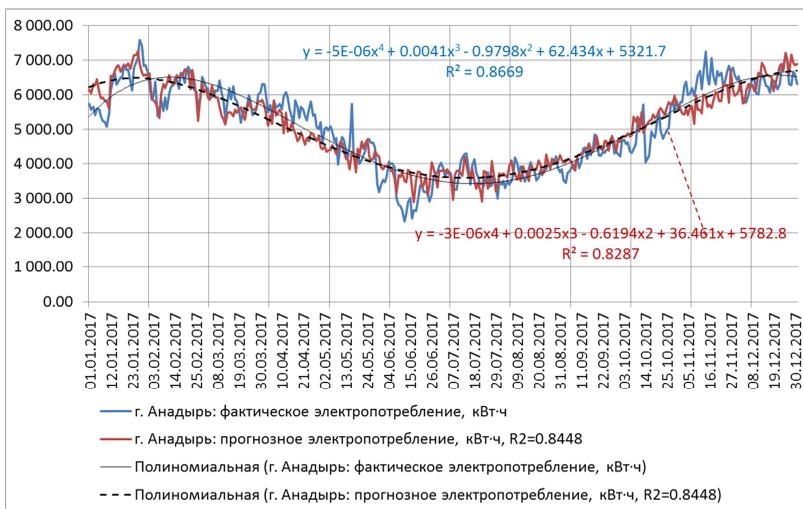


Рис. 1. Анализ потребления электроэнергии г. Анадырь

Таблица 1

Значимость воздействия климатических факторов на электропотребления
г. Анадырь

$T, ^\circ\text{C}$	P_0 , мм.рт.ст.	$U, \%$	DD	$FF, \text{м/с}$	$N, \%$	$\Pi, \text{мин.}$
15,1%	1,0%	0,8%	0,1%	6,2%	76,3%	0,4%

3. Анализ трендов изменения удельных смешанных нагрузок электропотребителей микрорайона Москвы и административного центра Анадырь

Суммарная площадь жилья г. Анадырь [6] составляет 335,8 тыс. м². Жилой фонд города насчитывает 157 домов [6] и в сумме 5405 квартир. Численность населения составляет 15604 чел. Суммарное электропотребление города составляет 1 849 332,41 кВт·ч в год. Для сравнения взяты данные электропотребления 12 жилыми зданиями района Люблино г. Москвы. Суммарная площадь жилья составляет 111 394,00 кв.м. и насчитывает 1935 квартир. Численность населения – 5347 чел. Суммарное электропотребление составляет 387 339,59 кВт·ч

в год с учётом того, что в данной цифре не учтены иные электропотребители района кроме электропотребления жилыми зданиями. С точки зрения действующей нормативной документации [7] по проектированию вновь сооружаемых и реконструируемых электрических сетей городов, районов и микрорайонов существуют утверждённые удельные значения энергопотребления. Нормативные и аналогичные им рассчитанные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Нормативные удельные значения потребляемой электрической энергии
г. Анадырь и микрорайона Люблино г. Москвы

Удельные показатели		г.Анадырь	микрорайон г. Москва
кВт / 1 м ²	Фактическое удельное значение, включая все нагрузки, кВт / 1 м ²	0,628	0,3969
	Удельное значение по РД 34.20.185-94, кВт / 1 м ²	0,093	0,109
кВт / 1 чел.	Фактическое удельное значение, кВт/чел.	0,34586	0,29196
	Удельное значение по РД 34.20.185-94, кВт/чел.	0,528 (допустим диапазон 0,396–0,528)	~0,27 (допустим диапазон 0,24-0,32)
кВт / 1 кв.	Фактическое удельное значение, кВт/ квартира	0,34215	0,80677
	Удельное значение по РД 34.20.185-94, кВт/ квартира	0,620125	0,620125

Приведенные показатели учитывают нагрузки: жилых домов, общественных зданий (административных, учебных, научных, лечебных, торговых, зрелищных, спортивных), коммунальных предприятий, наружного освещения, электротранспорта (без метрополитена), систем водоснабжения и канализации, систем теплоснабжения. К центральным районам города относятся сложившиеся районы со значительным сосредоточием различных

административных учреждений, учебных, научных, проектных организаций, предприятий торговли, общественного питания, зрелищных предприятий и др. В силу несопоставимых условий не производится анализ удельного потребления электроэнергии на 1 м², т.к. в данных г. Анадырь учтены все нагрузки города, а в нормативных удельных показателях приведены значения, учитывающие только нагрузку жилых домов.

Проведённый прогноз трендов изменения удельных смешанных нагрузок электропотребителей микрорайонов и городов в условиях недостаточности данных показывает, что по параметру «удельное электропотребление на человека» (рис. 2) жилой фонд г. Анадырь обладает потенциалом роста в 52,6%. При этом микрорайон г. Москвы демонстрирует превышение удельного электропотребления на 8,1%.

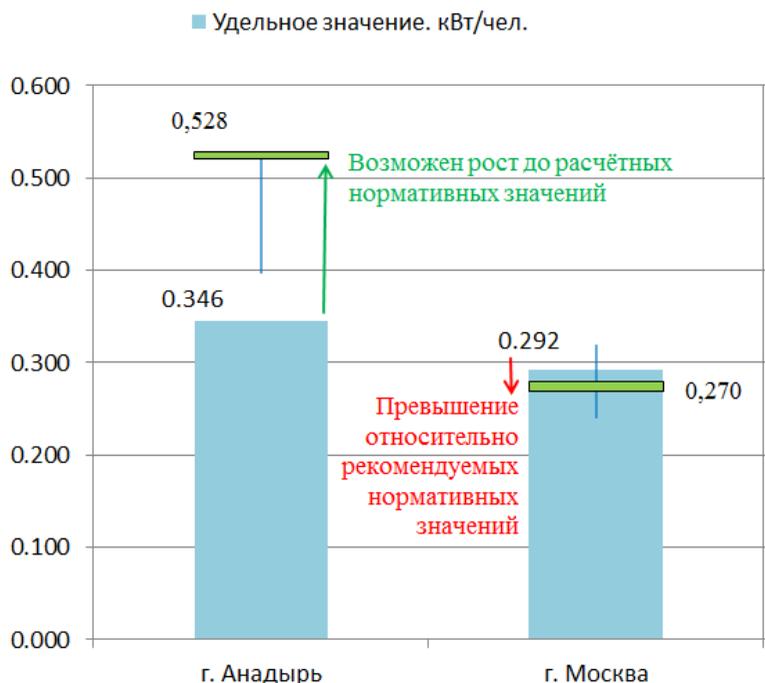


Рис. 2. Результаты анализа удельного электропотребления на человека

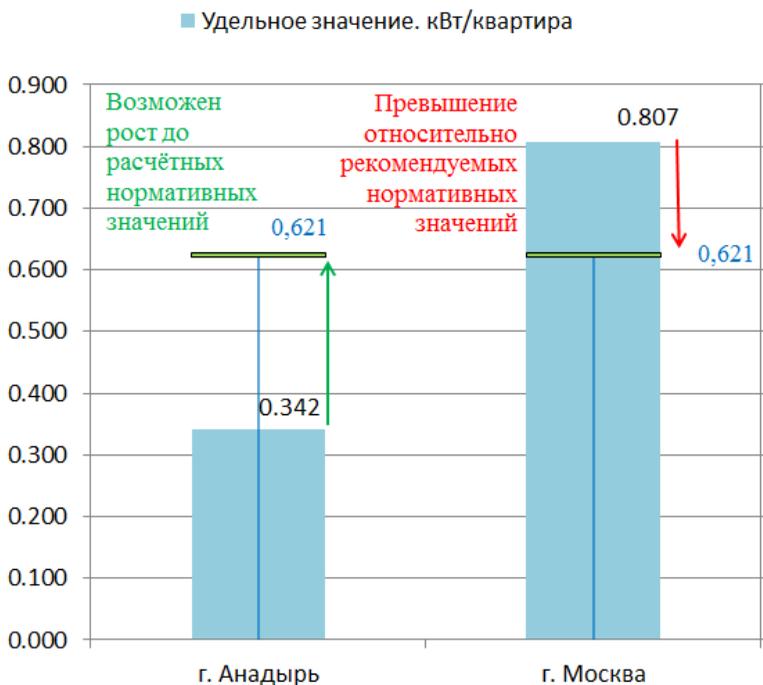


Рис. 3. Результаты анализа удельного электропотребления на квартиру

По параметру «удельное электропотребление на квартиру» (рис. 3) жилой фонд г. Анадырь обладает потенциалом роста в 81,5%. Разница между уровнями электропотребления на квартиру для сходных согласно нормативам жилому фонду административного центра г. Анадырь и микрорайону г. Москвы составляет 136%. При этом микрорайон г. Москвы демонстрирует превышение удельного электропотребления 29,9%.

Выводы по работе

1. Для решения задач прогнозирования объёмов электропотребления смешанных нагрузок микрорайонов и городов в условиях недостаточности данных применим подход использования регрессионных моделей.

2. Приведена оценка влияния качества жизни населения на уровень электропотребления жилищными хозяйствами. Различие величин фактического удельного электропотребления для г. Анадырь и г. Москвы составляет 136%.

3. Показано несоответствие значений удельных величин электропотребления в РД 34.20.185-94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей» и фактических уровней удельного электропотребления. Приведённый способ может использоваться для актуализации устаревших удельных значений.

4. Предложенный подход может быть использован для прогнозирования потребностей в энергоресурсах с учётом факторов старения зданий и сетей, увеличения комфортности и нагрузок, реновации, урбанизации пригородов и пр.

Библиографический список

1. **Багблейгер О.И.** Разработка математических моделей и методов для оценки влияния участников системы электроснабжения на качество электроэнергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. Иркутск: Иркут. гос. ун-т путей сообщения, 2006. 150 с.

2. **Хоменко Т.В.** Методы и модели принятия решений на этапе поискового проектирования технических систем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01. Астрахань: Астрахан. гос. техн. ун-т, 2016. 31 с.

3. **Гусынина Ю.С.** Моделирование управления производственными системами с учетом случайности состояния формирующих параметров: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.10, 05.13.18. Пенза: Пенз. гос. ун-т, 2010. 145 с.

4. **Щелоков Я.М.** Энергетический анализ хозяйственной деятельности (Энергетические проблемы энергоемких производств): Уч.-метод. изд-е. Екатеринбург: РУО АИН им. А.М. Прохорова. 2010. 388 с.

5. **Валеев С.Г., Кадырова Г.Р.** Система поиска оптимальных регрессий. Казань: ФЭН, 2003. 160 с.

6. Постановление Администрации Городского Округа Анадырь от 28 декабря 2015 года № 716 «Об утверждении муниципальной программы городского округа Анадырь» [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/440587098>.

7. Статистика по годам постройки домов в Анадыре [Электронный ресурс]. URL: <http://dom.mingkh.ru/chukotskiy-ao/anadyr/year-stats>.

8. РД 34.20.185-94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей» [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_257104/.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНВЕРТОРА ТОКА ДЛЯ ПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ст. преп. Дадабаев Ш.Т.

*Политехнический институт Таджикского технического университета
им. академика М.С. Осими, г. Худжанд*

***Аннотация.** Сделан обзор способов пуска высоковольтного синхронного электродвигателя и предложен альтернативный способ пуска от инвертора тока. Сделан анализ теории и практики инвертора тока на базе тиристоров, служащие для плавного пуска высоковольтного синхронного электродвигателя, а также выявлены основные преимущества инверторов тока, используемые для пуска синхронных двигателей.*

С развитием силовой электроники, стали доступны применение полупроводниковых преобразователей разных типов с разными функциями, как например инверторы тока, регуляторы напряжения и др., которые служат для плавного пуска высоковольтных электродвигателей переменного тока [1, 3]. В практическом использовании уже хорошо себя показали устройства плавного пуска (УПП), так как они стоят дешевле, чем преобразователи частоты (ПЧ) в два-три раза, и могут использоваться для поочередного плавного пуска нескольких электродвигателей [2, 4, 6]. Однако УПП не может обеспечить максимум ограничений по току, как можно было бы добиться с инвертором тока. Это обстоятельство привело к необходимости исследования пуска синхронного двигателя (СД) от источника тока, т.е. от инвертора тока.

Для высоковольтных электроприводов обычно используют инверторы тока на базе тиристора и для них характерно, что в результате переключения вентиля, на выходе инвертора формируется ток определенной формы, а форма напряжения зависят от нагрузки. Если инвертор получает питание от источника с большим внутренним сопротивлением как, например, от выпрямителя с индуктивным фильтром, то при переключении ключей вентиля на выходе инвертора может быть сформирован переменный ток в виде прямоугольных импульсов тока. Первая гармоника такой последовательности должна соответствовать требуемому значению выходного тока [5]. В этом случае для

нагрузки инвертор является источником с большим внутренним сопротивлением, т.е. является источником тока. Такой инвертор называют автономный инвертор тока.

Таким образом, можно получить устойчивый источник электроэнергии по току и тем самым регулировать значения тока, что невозможно сделать в инверторах напряжения. Регулирование значение тока весьма актуально при пуске электродвигателей, так как этот параметр является одним из основных факторов влияющие для условий пуска. Для демонстрации работы инвертора тока на рис. 1 приведены графики тока и напряжения на выходе данного устройства.

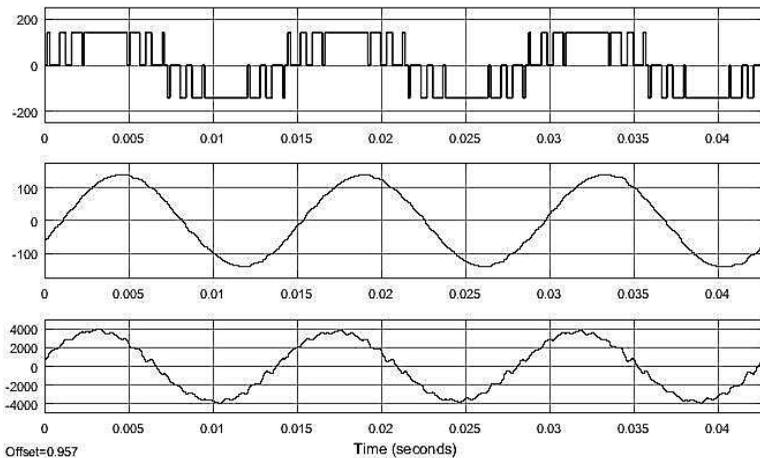


Рис. 1. Графики тока и напряжения на выходе инвертора тока

Как видно из графиков (см. на рис. 1) токи на выходе инвертора тока не зависят от нагрузки и сформированы в виде последовательности разнополярных прямоугольных импульсов тока [5]. Это обстоятельство позволяет добиться максимум возможности ограничения тока при пуске электродвигателей.

Производство инверторов тока на запираемых тиристорах служащие для плавного пуска мощных электродвигателей началось в 90-х годах прошлого века. Одной из зарубежных компаний, производящей высоковольтных ПЧ на полностью управляемых тиристорах, являлась фирма Allen-Bradley. Сейчас на рынке данной продукции уже участвуют многие компании разных стран, в том числе и Россия. Примером

производителя из России таких устройств можно считать компанию ООО НПП «ЭКРА», которая выпускает ПЧ разных типов с разными принципами работ. Одним из направлений производства компании является разработка устройств для систем плавного пуска электродвигателей. С этой целью в компании выпускается устройство, которое основано на работе инвертора тока является ШПТУ-ВИ [5, 7]. Этот шкаф представляет собой тиристорный ПЧ с управляемым выпрямителем и зависимым инвертором тока. Данный преобразователь является наиболее простым и экономически выгодным схемотехническим решением для пуска синхронных электродвигателей. ШПТУ-ВИ больше рассчитаны на пуски электродвигателей с механизмами на валу, обладающими большим моментом нагрузки (шаровые мельницы, дробилки, экструдеры и т.д.) и большим моментом инерции (вентиляторы, насосы, компрессоры и т.д.) с необходимостью пуска в тяжелых условиях (на открытую задвижку, без байпаса и т.д.). Устройство предназначено для построения системы плавного пуска (СПП) одного или группы высоковольтных синхронных электродвигателей мощностью до 17 МВт для механизмов с тяжелыми условиями пуска. ШПТУ-ВИ обеспечивает автоматизированный процесс последовательных частотных пусков с ограничением пускового тока до $1,3I_{ном}$ и точную автоматическую синхронизацию с питающей сетью двигателей от одного устройства [7].

Принцип действия зависимого инвертора тока основан на том, что коммутация тока в тиристорах инвертора происходит за счет ЭДС электродвигателя, а частота инвертированного тока на выходе равна частоте ЭДС. Для обеспечения процесса коммутации угол опережения инвертора должен быть не менее 30 эл. градусов. Этот режим работы инвертора называется режимом естественной коммутации.

Электромеханическая система «ШПТУ-ВИ – СД» построена по схеме вентильного двигателя, которую можно рассматривать как эквивалентный двигатель постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения, механический коммутатор которого заменен электрическим коммутатором (инвертором). Такая система обладает всеми достоинствами двигателя постоянного тока (ДПТ), с точки зрения регулировочных характеристик, и достоинствами синхронного двигателя в смысле конструктивных преимуществ [7]. На рис. 2 и 3 приведено функциональная схема электромеханической системы с ШПТУ-ВИ и график пуска двигателя СТД-6300/6000-2УХЛ4 магистрального насоса перекачки нефти с помощью ШПТУ-ВИ.

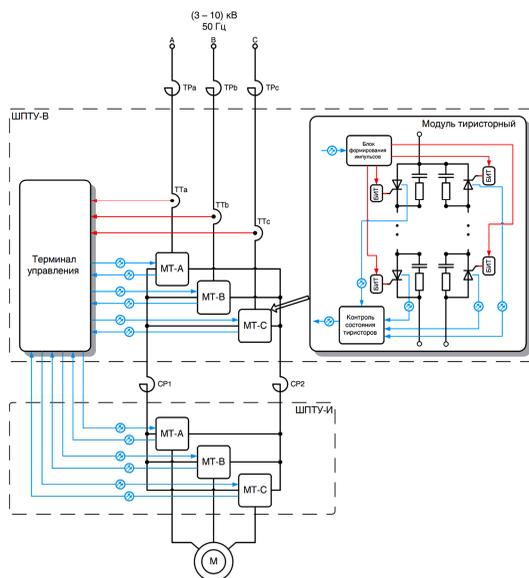


Рис. 2. Функциональная схема электропривода с ШПТУ-ВИ

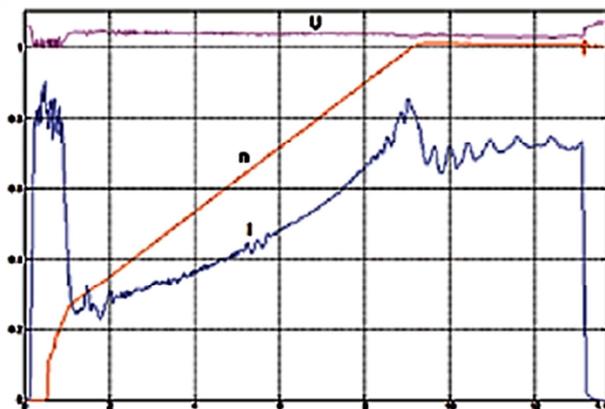


Рис. 3. График пуска двигателя СТД-6300/6000-2УХЛ4 магистрального насоса перекачки нефти с помощью ШПТУ-ВИ

Выводы. Использование ПЧ на основе инвертора тока для пусков двигателей с механизмами на валу, обладающими большим моментом нагрузки и большим моментом инерции с необходимостью пуска в тяжелых условиях является эффективным решением данной проблемы. ПЧ на основе инвертора тока является наиболее эффективным решением для электроприводов большой мощности в случае необходимости, по технологическим условиям, обеспечения режима рекуперации энергии в сеть. Однако коммутации тока в тиристорах вызывает в ПЧ магнитных составляющих электромагнитных полей, подавление влияния которых на систему связи и управления затруднительно, чем подавление электрических полей при коммутации напряжения. В тех случаях, когда при работе мощного СД не требуется регулирование скорости, электропривод с инвертором тока является экономичным решением для реализации плавного пуска СД с малыми пусковыми бросками тока. Данное решение позволяет увеличить технический ресурс электрооборудования и тем самым экономии затраты на ремонт и обслуживание в целом.

Библиографический список

1. **Дадабаев Ш.Т.** Оптимизация пусковых режимов работы высоковольтных электроприводов оросительной насосной станции с учетом жаркого климата // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. № 2. С. 86–91.
2. **Дадабаев Ш.Т.** Перспективы внедрения регулируемых электроприводов в насосных агрегатах большой мощности // Энергетик. 2015. № 7. С. 31–33.
3. **Дадабаев Ш.Т.** Разработка математической модели системы регулирования насосных агрегатов оросительной станции первого подъема // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 9, Ч. 1. С. 532–536.
4. **Дадабаев Ш.Т., Ларионов В.Н.** Исследования применения энергоэффективных способов управления в электроприводах с вентиляторной нагрузкой // Вестник ТТУ. 2014. № 4. С. 56–59.
5. **Лазарев С.А.** Применение инверторов тока в высоковольтном электроприводе // Экспозиция нефть газ. 2013. № 4(29). С.78–80.
6. **Ларионов В. Н., Калинин А. Г.** Энергоэффективность и энергосбережение в электроприводах с вентиляторной нагрузкой. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. 146 с.
7. Устройства и системы плавного пуска и регулирования скорости электродвигателей напряжением 3-10 кВ и мощностью до 17 МВт. Изд. 9. Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2016. 32 с.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО АГРЕГАТА С УСТРОЙСТВОМ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

канд. техн. наук, доц. **Колесник Г.П.**
канд. техн. наук, доц. **Андреанов Д.П.**
магистрант **Зимина А.А.**

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

***Аннотация.** Рассматриваются вопросы повышения коэффициента мощности электродуговой печи с трансформаторным агрегатом и устройством продольной компенсации реактивной мощности короткой сети с включением компенсирующих конденсаторов в обмотку высшего напряжения вольтодобавочного трансформатора.*

При синусоидальном режиме и линейной нагрузке эффективность использования и потребления электрической энергии обусловлена коэффициентом полезного действия устройства и коэффициентом мощности ($\cos \varphi$). Поэтому практически основным фактором, позволяющим решить вопрос энергосбережения и повышения энергоэффективности использования электрооборудования, например, ферросплавной печи, является снижение потребления реактивной мощности или компенсация реактивной мощности, что достигается корректировкой электрических параметров рабочего режима электродуговой печи [1, 2].

Цель работы – оценка влияния изменения параметров вольтодобавочного трансформатора на значение электрических параметров электродуговой печи при использовании установки продольной компенсации реактивной мощности короткой сети.

Наиболее эффективным способом повышения коэффициента мощности электродуговой печи является применение устройства продольной компенсации (УПК) реактивности короткой сети с включением батареи конденсаторов в цепь обмотки высшего напряжения вольтодобавочного трансформатора [3, 4]. При этом рабочий ток электрода, протекающий по первичной обмотке вольтодобавочного трансформатора, корректирует в режиме реального времени напряжение вольтодобавки, тем самым стабилизируя рабочий режим печи.

Печные агрегаты [5] состоят из основного печного трансформатора, вольтодобавочного трансформатора и токоограничивающего реактора, устройств РПН, расположенных в общем баке. Схема печного агрегата типа ЭОДЦНК-16000/10 [6] показана на рис. 1.

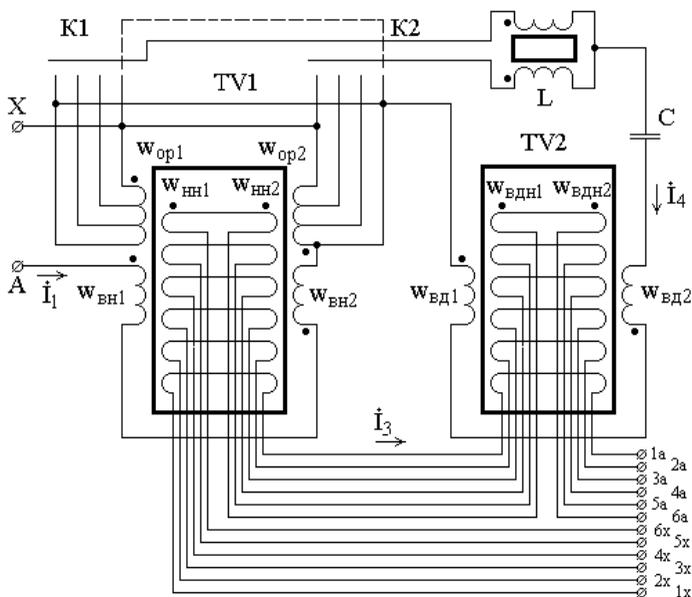


Рис.1. Схема печного агрегата типа ЭОДЦНК-16000/10

Главный трансформатор TV1 с неизменным по величине напряжением вторичной обмотки имеет регулировочную обмотку (ОР) класса напряжения 20 кВ с отпайками. Отрегулированное с помощью переключающего устройства напряжение ОР главного трансформатора подается на первичную обмотку вольтодобавочного трансформатора TV2. Рабочий режим ферросплавной печи определяется напряжением и током вторичной обмотки трансформатора TV1, характер изменения коэффициента трансформации которого показан на рис. 2.

Вольтодобавочный трансформатор TV2 выполнен с неизменным коэффициентом трансформации. Однако при анализе зависимости напряжения вольтодобавки от тока в цепи электрода в схемах про-

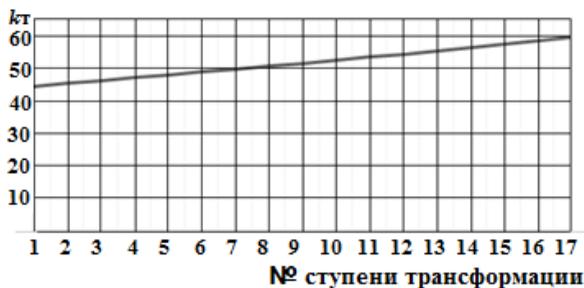


Рис. 2. График зависимости изменения коэффициента трансформации трансформатора TV1 от номера ступени переключения

дольной компенсации реактивной мощности короткой сети ферросплавной печи необходимо учитывать также зависимость реального коэффициентом трансформации от значения рабочего тока. Установлено [7], что приращение значения реального коэффициента трансформации вольтодобавочного трансформатора $\Delta k_{т2}$ определяется приращением напряжения на компенсирующем конденсаторе ΔU_c :

$$\Delta k_{т2} = \frac{\Delta U_c}{U_c}.$$

Напряжение вольтодобавки $U_{вд}$ определяется суммой приведенных к обмотке низшего напряжения вольтодобавочного трансформатора TV2, напряжения на первичной обмотке («среднего напряжения») \dot{U}'_1 и напряжения на компенсирующем конденсаторе \dot{U}'_c в соответствии с условной положительной ориентацией токов и напряжений на схеме замещения рис. 3.

Относительное приращение напряжения на компенсирующем конденсаторе можно выразить через относительное изменение рабочего тока электрода печи или напряжения вольтодобавки:

$$\frac{\Delta k_{т2}}{k_{т2}} = \frac{\Delta U'_c}{U'_c} = \left(1 - \frac{\Delta I_{2ном}}{I_{2ном}}\right) = \frac{\Delta U_{вд}}{U_{вд}}.$$

При неизменном «среднем напряжении» приращение напряжения вольтодобавки определится приращением напряжения на компенсирующем конденсаторе, которое в свою очередь зависит от приращения тока нагрузки в рабочем режиме:

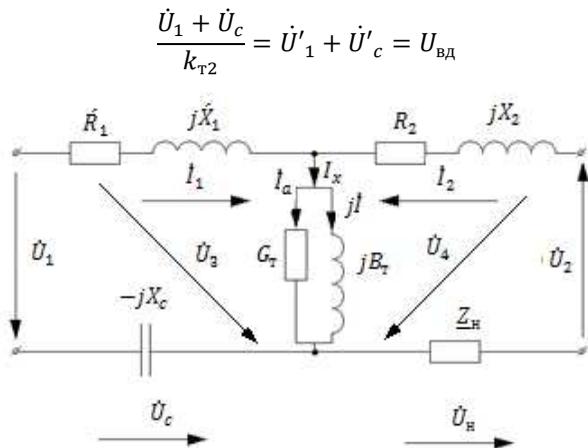


Рис. 3. Схема замещения УПК с вольтодобавочным трансформатором

Относительное изменение напряжения вольтодобавки:

$$\frac{\Delta U_{ВД}}{U_{ВД}} = \frac{\Delta U'_1}{U'_1} + \frac{\Delta U'_c}{U'_c}.$$

Для неизменного «среднего напряжения» \dot{U}'_1 получим:

$$\frac{\Delta U_{ВД}}{U_{ВД}} = \frac{\Delta U'_c}{U'_c} = \left(1 - \frac{\Delta I_{1НОМ}}{I_{1НОМ}}\right).$$

Следовательно, относительные приращения значений параметров вольтодобавочного трансформатора, напряжения на компенсирующем конденсаторе и напряжения вольтодобавки полностью определяются относительным изменением номинального тока рабочего режима электродуговой печи. Неизменность тока вторичной обмотки главного трансформатора в рабочем режиме на каждой ступени переключения (рис. 4) обеспечивается влиянием напряжения вольтодобавки (напряжения на компенсирующем конденсаторе), характер зависимости которого от тока нагрузки показан на рис. 5.

Ток в цепи электрода (ток нагрузки) в первом приближении можно определить, при исключении ветви намагничивания трансформато-

ра TV2 (рис. 3), через сумму напряжений – входного \dot{U}_1 , выходного \dot{U}_2 и входного сопротивления схемы замещения относительно зажимов с напряжением $\dot{U}_1 Z_{вх} = Z_{Т2} + Z_{н} + (-jX_c)$:

$$i_1 = \frac{(\dot{U}_1 + \dot{U}_2)}{Z_{вх}}$$

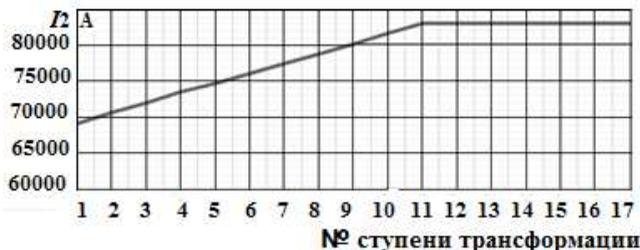


Рис. 4. График зависимости действующего значения тока вторичной обмотки TV1 от номера ступени переключения

При больших токах электрическую дугу целесообразно моделировать активным неизменным во времени сопротивлением, поскольку её динамическая характеристика прямолинейна и ток дуги пропорционален напряжению.

$$R_d = \frac{\dot{U}_н}{\dot{I}_1} = \frac{-\left[\frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_c}{k_{Т2}} + \dot{U}_2\right]}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{U}_{вд} + \dot{U}_2}{\dot{I}_1}$$

Суммарное активное сопротивление короткой сети $R_{кс}$ и электрической дуги можно определить по параметрам рабочего режима и значению коэффициента мощности:

$$R_{\Sigma} = R_{кс} + R_d = \frac{U_{\Sigma}}{I \cdot \cos \varphi},$$

где U_{Σ} – это модуль геометрической суммы напряжения нагрузки и напряжения вольтодобавки.

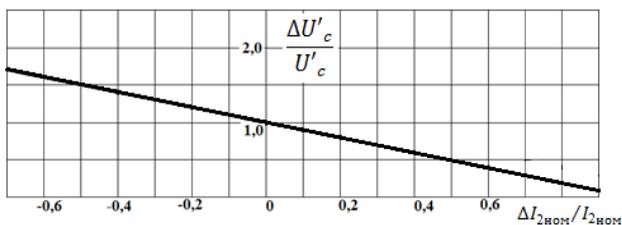


Рис. 5. График относительного изменения напряжения на компенсирующем конденсаторе

Выводы по работе. Полученные выражения относительного изменения напряжения на компенсирующем конденсаторе и установление взаимосвязи с изменением параметров вольтодобавочного трансформатора и напряжением вольтодобавки свидетельствуют об их пропорциональном влиянии на относительное изменение номинального тока рабочего режима электродуговой печи и, следовательно, о компенсации реактивной мощности короткой сети электродуговой печи в реальном времени при изменении тока электрода.

Библиографический список

1. Петкевич А.П., Тихомирова Т.И. О потенциале энергосбережения 2015-2020 г. // Энергетические, управляющие и информационные системы: Сб. докл. I межд. научно-техн. конф. Белгород: БГТУ, 2016. С. 128–132.
2. Моделирование эксплуатационных режимов работы трансформаторов / А.Н. Новожилов, А.П. Кислов, Н.Ю. Пономарева, Т.А. Новожилов // Вестник ПГУ, серия Энергетическая, 2005, № 3. С. 130–137.
3. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2012. 234 с.
4. Суворин А.В. Электротехнологические установки: учеб. пособие. Красноярск: СФУ, 2011. 376 с.
5. Гутман М.Б., Кацевич Л.С., Лейканд М.С. Электрические печи сопротивления и дуговые печи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
6. Новожилов Т.А. Развитие теории построения защит однофазных трансформаторов от витковых замыканий. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Омск: ОГТУ, 2015. 22 с.
7. Бадалян Н.П., Колесник Г.П., Соловьева С.Г. Изменение параметров трансформатора продольного включения в схеме продольной компенсации // Вестник НПУА. Электротехника, энергетика. 2017. № 2. С. 33–42.

АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

канд. техн. наук. доц. **Попов М.Г.**
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, г. Санкт-Петербург

***Аннотация.** В статье отражены перспективные решения по модернизации основных средств противоаварийного управления и защиты интегрированных энергосистем при реализации алгоритмов адаптивного управления. Проведено обоснование новых структур и алгоритмов формирования корректирующих сигналов с использованием нестационарных фильтров тока смещения воздушных линий электропередачи. Рассчитанные фазные токи смещения используются для динамической коррекции рабочих и тормозных сигналов продольной дифференциальной защиты. Заложены основы адаптивных средств дифференциальной защиты силового оборудования энергосистем, основанные на использовании адаптивной коррекции рабочих и тормозных сигналов защиты. Выполнено математическое описание оптимизационной задачи определения параметров срабатывания чувствительной дифференциальной продольной токовой защиты с адаптивной коррекцией рабочих и тормозных сигналов.*

***Ключевые слова:** силовое оборудование, энергообъединения, адаптивные средства, токовая продольная дифференциальная защита, измерительные органы, повышение чувствительности, динамическая коррекция, преобразование Гильберта.*

1. Введение

Сложившиеся в настоящее время финансово-экономические и оперативно-технические взаимоотношения между субъектами электроэнергетики характеризуются снижением затрат на амортизацию, старением ресурса и слабо обоснованным продлением срока эксплуатации основного оборудования электрических станций и подстанций. В этих непростых условиях обеспечение надежности и устойчивости электроснабжения в объединенных энергосистемах (ОЭС) может быть частично решено внедрением в практику эксплуатации нового силового электрооборудования для регулирования и управления обменной мощностью энергосистем (FACTS), а также созданием кольцевых схем электрических сетей. Однако такой подход, значительно усложняет

проблему быстрого и качественного оперативно-диспетчерского управления нестационарными режимами работы энергосистем. Появление новых измерительно-информационных систем, средств мониторинга (WAMS) переходных режимов и систем централизованного (системного) управления позволило в некоторой степени повысить эффективность диспетчерского и противоаварийного управления режимами объединенных энергосистем. Немаловажную роль в этом играет информационное и техническое совершенство устройств аппаратуры связи.

2. Актуальность тематики исследований и степень ее разработанности

Вопросам устойчивости и повышения надежности работы силового электрооборудования энергосистем посвящено множество исследований и научных публикаций [1–9]. Благодаря этим исследованиям были созданы перспективные средства управления возбуждением синхронных машин, научно обоснованы технические возможности и условия передачи электроэнергии переменным током в протяженных энергообъединениях. Несмотря на значительные достижения в области исследований устойчивости и принципов противоаварийного управления объединенными энергосистемами до сих пор остро стоит вопрос обеспечения быстродействия, селективности и надежности функционирования средств защиты и автоматики. Следует подчеркнуть, что практически все (за редким исключением) научные исследования и публикации авторов базируются на использовании идеализированного математического описания и линейных моделей силового оборудования, робастного описания задачи синтеза фильтров. В конечном итоге, такой подход характеризуется не только наличием методической погрешности, но и ошибками в практических, количественных оценках предельных режимов и, как следствие этого, в выборе параметров технических средств защиты и других средств противоаварийной автоматики, неудовлетворяющих основным нормативным требованиям.

Исключение этого существенного недостатка возможно только при развитии теории нелинейной фильтрации, применения численных методов, строгих математических моделей при исследовании квазистационарных асинхронных и колебательных синхронных режимов объединенных энергосистем. Такой подход становится возможным в настоящее время вследствие роста вычислительных мощностей и функциональных возможностей промышленных микроконтроллеров, а также ввиду повышения уровня автоматизации современных энерго-

объектов. Естественно, что достоверность полученных новых результатов исследований должна подтверждаться на основе проведения и совершенствования физических, натуральных экспериментов и опытно-промышленных испытаний.

Все эти актуальные проблемы, вопросы качественного и надежного управления современными объединенными энергосистемами и предопределили тематику комплексных исследований, отраженных в настоящем докладе по диссертационной работе автора.

3. Основы адаптивных средств защиты и противоаварийной автоматики силового электрооборудования протяженных энергообъединений

По современным оценкам степень компенсации реактивной мощности в системообразующих сетях в среднем составляет не более 50 % для линий 500-1500 кВ. Острота этой проблемы еще более возросла в последнее время в связи с некоторым спадом электропотребления и, как следствие, со снижением потоков активной мощности при значительной недокомпенсации реактивной мощности протяженных электрических сетей. В связи с таким положением в большинстве крупных объединенных энергосистем (ОЭС) сложилось крайне тяжелое положение с надежностью и чувствительностью основных (дифференциальных) защит силового электрооборудования системообразующей сети 500-1500 кВ – минимальные токи срабатывания защит составляют около 0,7...1,0 относительных единиц (о.е.). Кроме этого проблему надежности современных микропроцессорных систем дифференциальной защиты усугубляет большая номенклатура и разнообразие применяемых устройств (полуккомплектов), а также недостаточный опыт (срок) эксплуатации цифровых защит и отсутствие научно-обоснованного подхода к выбору (расчету) их параметров срабатывания.

В связи с вышеперечисленными негативными факторами участились случаи неселективного срабатывания защиты, сопровождающиеся перегрузкой линий более низкого класса напряжения, входящих в контролируемые сечения, что, в конечном счете, может вызвать нарушение устойчивости параллельной работы энергообъединений. Для обеспечения селективности, повышения быстродействия и чувствительности усовершенствованной токовой продольной дифференциальной защиты силового оборудования межсистемных (межгосударственных) линий электропередачи должны быть выполнена адаптивная коррекция характеристики срабатывания (рис. 1).

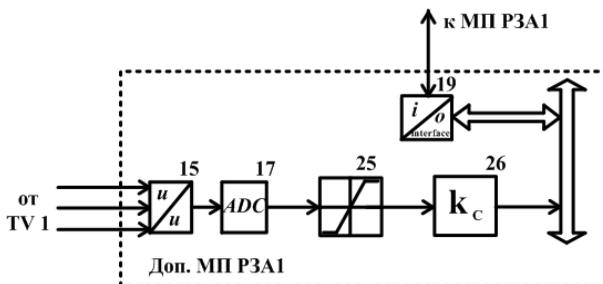


Рис. 1. Обобщенная схема формирования коррекционных сигналов

Апробация и оценка эффективности коррекции характеристики срабатывания токовой продольной дифференциальной защиты выполнена с использованием базы данных цифровых осциллограмм натуральных экспериментов по исследованию нестационарных режимов силового электрооборудования протяженных энергообъединений.

В структурной схеме рис. 2 осуществляется численное дифференцирование фазного напряжения. Данный способ наиболее эффективен для повышения чувствительности и селективности защиты линии в режимах её включения на холостой ход. Альтернативным является применение нелинейных фильтров ёмкостного тока линии, реализуемых по схеме рис. 3.

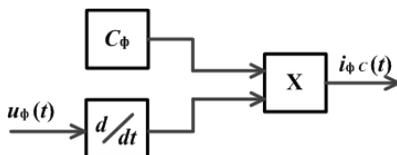


Рис. 2. Схема фильтра фазного зарядного тока линии с контролем производной фазного напряжения

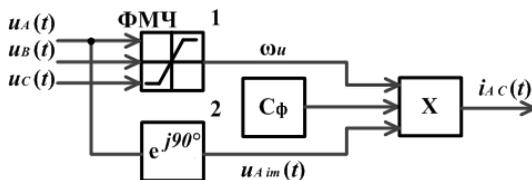


Рис. 3. Схема фильтра тока смещения ЛЭП с контролем ортогональных дополнений по Гильберту для фазных (показано только для фазы А) напряжений

В данной схеме для получения мнимой части $u_{A \text{ im}}(t)$ аналитического сигнала фазного (на рис. показано на примере фазы А) напряжения используется фильтр Гильберта [10, 11], который физически не реализуем. Тем не менее, применение его в практике цифровой обработки сигналов широко известно [12]. На выходе фазоповоротного звена 2 (рис. 2) формируется ортогональное дополнение $u_{A \text{ im}}(t)$ напряжения фазы А со смещением мгновенной спектральной плотности $S(\omega)$ на девяносто градусов. Измерение мгновенной частоты (блок 1, ФМЧ, рис. 3) также производится с помощью преобразования Гильберта [10–12].

Расчётные характеристики изменения тока срабатывания защиты (штрихпунктирная и штриховая линии, характеристики 2, 3), а также дифференциального сигнала (сплошная линия, характеристика 1) изображены на рис. 4, 5. Ввиду ограничений по объему иллюстративного материала на этих рис. отражено изменение только одного, наиболее характерного фазного тока срабатывания защиты, определяемого по схемам рис. 2, 3. Поскольку ток фазы С имеет наибольшие из трех фаз значения для режима включения ВЛ на холостой ход, его расчетные зависимости отражены на рис. 4.

Соответственно для оценки селективности и чувствительности в режиме междуфазного (АВ) короткого замыкания наиболее характерными являются расчетные осциллограммы дифференциального тока фазы В (рис. 5) с меньшими по сравнению с фазой А величинами.

Изменение тока срабатывания защиты при контроле производной напряжения соответствует характеристикам 3 (штриховая линия, рис. 4, 5). Практическая реализация этой схемы (рис. 2) привносит значительные трудности, связанные с необходимостью повышения частоты дискретизации по времени (опроса АЦП), а также с обеспечением селективности срабатывания защиты при внутренних коротких замыканиях. Как следует из представленной на рис. 5 характеристики 3, применение рассматриваемого способа коррекции, может привести к глубокому (более чем полуторакратному), неселективному переторможению при коротких замыканиях.

Единственными мероприятиями, позволяющими обосновать допустимость этого метода формирования коррекционных сигналов, являются введение блокировки, после успешного включения линии на холостой ход или введение ограничения его времени работы в цикле опробования. С учетом неопределенности критериев успешного включения линии, а также сложностями реализации логики органа блокировки этот вопрос в статье не рассматривается.

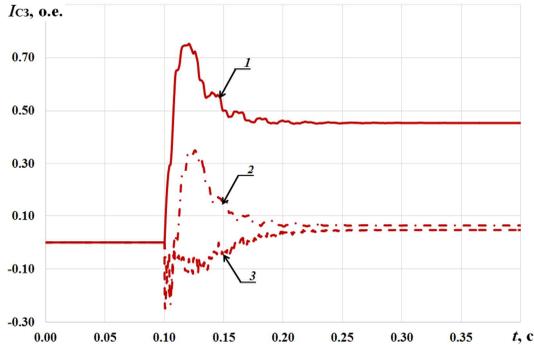


Рис. 4. Изменение тока срабатывания защиты фазы С в режиме включения линии электропередачи на холостой ход со стороны противоположной подстанции при отсутствии (1, сплошная линия) и наличии (2, штрихпунктирная линия и 3, штриховая линия) коррекционных сигналов

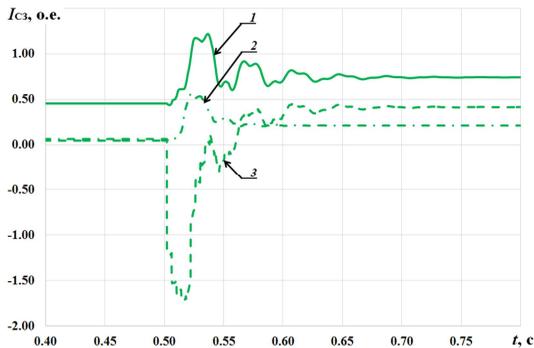


Рис. 5. Изменение тока срабатывания защиты фазы В в режиме внутреннего двухфазного (АВ) короткого замыкания вблизи шин противоположной подстанции в схеме одностороннего питания при отсутствии (1, сплошная линия) и наличии (2, штрихпунктирная линия и 3, штриховая линия) коррекции

Анализ изменения тока срабатывания защиты при коррекции её динамических свойств с использованием фильтров тока смещения (рис. 3) показал, что предлагаемый способ может быть эффективен во всем многообразии режимов работы межсистемных линий электропередачи при правильном и обоснованном выборе параметров срабатывания дифференциальной защиты. Выбор параметров срабатывания защиты, отвечающих требованиям нормативной чувствительности,

производится в соответствии с приведенными ниже методическими указаниями.

На рис. 6 показаны условия нормативной чувствительности и селективности, которым соответствует пространство параметров срабатывания защиты для которых белая поверхность (векторная функция параметров срабатывания защиты) превалирует над затененной для поврежденных фаз (фаза А, рис. 6, а). Селективная работа измерительных органов неповрежденных фаз (фаза С, рис. 6, б) характеризуется противоположными условиями расположения поверхностей.

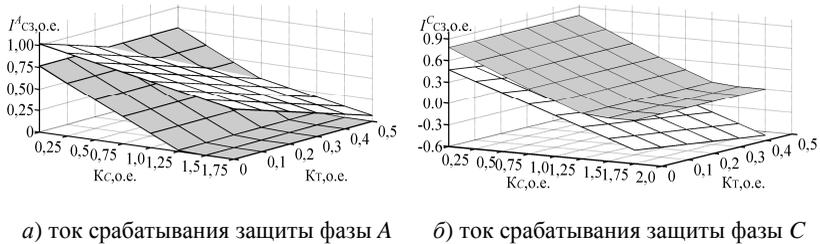


Рис. 6. Токи срабатывания защиты фаз А (а) и С (б) в пространстве параметров K_T и K_C при включении линии на холостой ход (затененная поверхность) и в режиме короткого замыкания фаз А и В (белая поверхность)

С учетом сложности восприятия новых принципов расчета параметров срабатывания токовых продольных дифференциальных защит автором в заключительной части изложено математическое описание методики выбора параметров срабатывания ($I_{C3 \min}$, КТ, КС) усовершенствованных продольных токовых дифференциальных защит с динамической коррекцией их рабочих и тормозных сигналов. Тогда, векторные функции селективности защиты в режимах холостого хода $W_{I_{C3 \text{ селект. XX}}}$ и короткого замыкания $W_{I_{C3 \text{ селект. КЗ}}}$ (рис. 7) описываются выражениями (с пояснениями только для фазы А):

$$W_{I_{C3 \text{ селект. XX}}} = I_{C3 \min} - \max \left\| \begin{array}{l} I_{C3 \text{ XX max}}^A(K_C) \\ I_{C3 \text{ XX max}}^B(K_C) \\ I_{C3 \text{ XX max}}^C(K_C) \end{array} \right\| \geq 0, \quad (1)$$

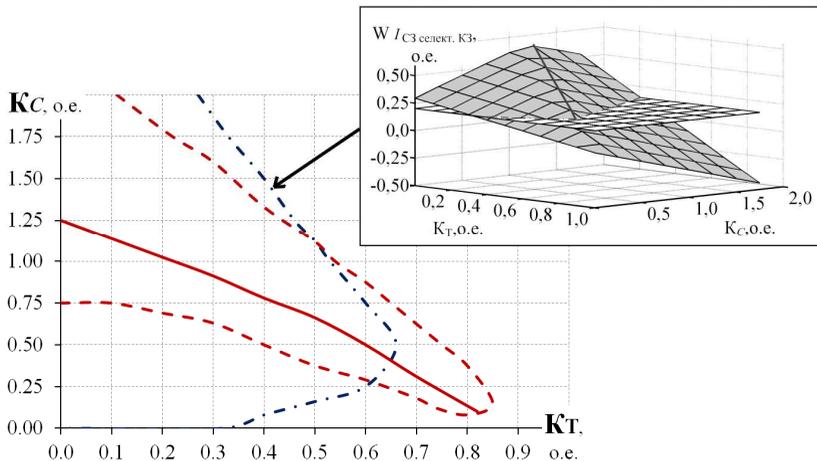


Рис. 7. Область селективности (штрихпунктирная линия), чувствительности (штриховая линия) и характеристика (сплошная линия) максимальной селективности и чувствительности защиты в пространстве параметров торможения (K_T) и коррекции (K_C)

$$W_{I_{C3 \text{ селект. КЗ}}} = \min \left\| \begin{array}{l} I_{C3 \text{ КЗ min}}^A(K_T, K_C) - I_{C3 \text{ XX max}}^A(K_C) \\ I_{C3 \text{ КЗ min}}^B(K_T, K_C) - I_{C3 \text{ XX max}}^B(K_C) \\ I_{C3 \text{ КЗ min}}^C(K_T, K_C) - I_{C3 \text{ XX max}}^C(K_C) \end{array} \right\| \geq 0, \quad (2)$$

где $I_{C3 \text{ XX max}}^A$, $I_{C3 \text{ КЗ min}}^A$ – соответственно максимальные и минимальные величины тока срабатывания защиты фазы A в режимах XX или $КЗ$, о.е.

Требования к защите по условиям заданной чувствительности ($K_{\text{чувств. зад}}$) относительно искомой уставки ($I_{C3 \text{ min}}$) описываются векторной функцией:

$$W_{I_{C3 \text{ чувств. КЗ}}} = \frac{I_{C3 \text{ КЗ min}}^{\min}(K_T, K_C)}{I_{C3 \text{ min}}} - K_{\text{чувств. зад}} \leq 0, \quad (3)$$

Абсолютная селективность защиты, характеризующаяся нулевым значением минимального тока срабатывания ($I_{C3 \text{ min}} = 0$), достигается

при 100-120 % коррекции рабочих сигналов (рис. 7, область малых $K_T = 0 \dots 0,2$ о.е.). Из анализа рис. 7 следует, что нормативная чувствительность достигается при коэффициенте торможения $K_T \leq 0,2$ о.е. и коэффициенте коррекции K_C равном $0,70 \dots 1,25$ о.е. Увеличение коэффициента торможения более чем $K_T = 0,35 \dots 0,40$ о.е. приводит к сужению области селективности (рис. 7).

Заключение

Выполненные исследования и разработки направлены на совершенствование основных технических быстродействующих средств противоаварийного управления энергосистемами, обеспечивающими бесперебойность их работы, качество электрической энергии, экономичность, техническую, информационную безопасность и автоматизацию её производства.

1. Автором разработаны и обоснованы новые структуры и алгоритмы формирования корректирующих сигналов с использованием нестационарных фильтров тока смещения воздушных линий электропередачи. Рассчитанные с их помощью токи смещения фаз используются для динамической коррекции рабочих и тормозных сигналов продольной дифференциальной защиты.

В результате сравнительного анализа цифровых фильтров тока смещения установлено, что наилучшими показателями с точки зрения простоты реализации, чувствительности и быстродействия обладают фильтры, в основе которых лежит преобразование Гильберта. Все дальнейшие оценки эффективности коррекции динамических свойств защиты получены при его применении.

2. Разработаны основы адаптивных средств дифференциальной защиты силового оборудования энергосистем. В их основе использование адаптивной коррекции рабочих и тормозных сигналов защиты. Самонастройка средств защиты достигается в результате применения градиентных параметрических численных методов идентификации параметров силового оборудования, которые влияют на величину минимального тока срабатывания защиты. Абсолютная селективность защиты, характеризующаяся нулевым значением минимального тока срабатывания ($I_{C3 \min} = 0$), достигается только коррекции рабочих сигналов в объеме 100-120 %.

3. Выполнено математическое описание оптимизационной задачи определения параметров срабатывания ($I_{C3 \min}$, K_T и K_C) чувствительной продольной токовой дифференциальной защиты с адаптивной коррекцией рабочих и тормозных сигналов.

В результате апробации этой методики показано, что абсолютная селективность защиты, характеризующаяся нулевым значением минимального тока срабатывания ($I_{C3 \min} = 0$), достигается при уровне коррекционных сигналов 100-120 % и более ($K_C \geq 1,2$ о.е.).

Библиографический список

1. **Попов М.Г.** Современные средства противоаварийного управления объединенными энергосистемами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. 41 с.
2. **Ragozin A.A., Popov M.G.** An analysis of effectiveness of using controllable shunting reactors in system-forming networks of power pools // Power of Russia. 2002. No 2. P. 26–28.
3. **Ragozin A.A., Popov M.G.** On the effect of the moments of nonconservative forces on the static stability of power systems // Power of Russia. 2002. No 10. P. 18–24.
4. **Ellithy K., Said S., Kahlout O.** Design of power system stabilizers based on μ -controller for power system stability enhancement // International journal of electrical power & energy systems. 2014. Vol. 63. P. 933–939.
5. **Perez S.** Modeling relay for power system protection studies: Doctoral Dissertation. Saskatoon (Canada): Department of Electrical Engineering, University of Saskatchewan, 2006. 284 p.
6. Исследование статической устойчивости сложных объединенных энергосистем произвольной структуры / М.Г. Попов, Е.В. Захарова, И.В. Снянский, К.С. Горячевский // Электрические станции. 2015. № 11. С. 61–69.
7. Повышение достоверности работы измерительных цепей релейной защиты / В.К. Ванин, М.Г. Попов, С.О. Попов, Т.Д. Амбросовская // Электрические станции. 2015. № 11. С. 30–35.
8. Increasing the reliability of the measuring circuits of protection relays / M.G. Popov, V.K. Vanin, S.O. Popov, T.D. Ambrosovskaya // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50, No 1. P. 87–92.
9. **Попов М.Г.** Дифференциальная защита межсистемных линий электропередачи с компенсацией зарядной мощности // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 1. С. 17–26.
10. **Харкевич А.А.** Спектры и анализ. М.: ГИФМЛ, 1962. 236 с.
11. **Хемминг Р.В.** Цифровые фильтры. М.: Сов. радио, 1980. 224 с.
12. **Гоноровский И.С.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Дрофа, 2006. 719 с.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЧАСТНОГО СЕКТОРА

д-р техн. наук, проф. Сапрыка А.В.
ассистент Жилин Е.В.

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

***Аннотация.** В работе рассмотрены причины возникновения несимметрии тока и напряжения в системах электроснабжения частного сектора. Указаны негативные последствия влияния несимметричного режима работы. На основании имитационного моделирования и аналитических расчетов установлено, что коэффициенты несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательности достигают 3,9 % и 6,2 % соответственно. Предложены методы снижения несимметрии тока и напряжения в системах электроснабжения частного сектора.*

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

В системах электроснабжения частного сектора основными потребителями являются маломощные однофазные электроприемники (ОЭП) размещенные на большой территории. Неравномерное включение ОЭП в сеть способствует появлению несимметрии тока и напряжения в системах электроснабжения частного сектора. Наличие несимметричного режима работы способствует появлению тока в нулевом проводе, который может превышать значение фазных токов, что приводит к преждевременному старению изоляции и увеличению дополнительных потерь электроэнергии.

Поэтому целью работы является анализ влияния несимметрии токов и напряжений на систему электроснабжения частного сектора.

Для решения поставленной задачи необходимо выполнить имитационное моделирование системы электроснабжения частного сектора, на основании которого будут определены показатели несимметрию. В системах электроснабжения частного сектора, показатели несимметрии характеризуются коэффициентами несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности, которые определяются по выражениям [1]:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}}; \quad (1)$$

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}}; \quad (2)$$

где $U_{2(1)}$, $U_{0(1)}$, $U_{1(1)}$ – напряжение обратной, нулевой и основной последовательности на основной частоте соответственно.

Для подтверждения результатов имитационного моделирования также производится аналитический расчет коэффициентов несимметрии.

Имитационное моделирование выполняется в программном комплексе Matlab&Simulink, преимуществом которого является наличие обширной базы библиотек и графической среды. Модель системы электроснабжения частного сектора выполнялось на основании экспериментальных исследований представлена на рис. 1 [2].

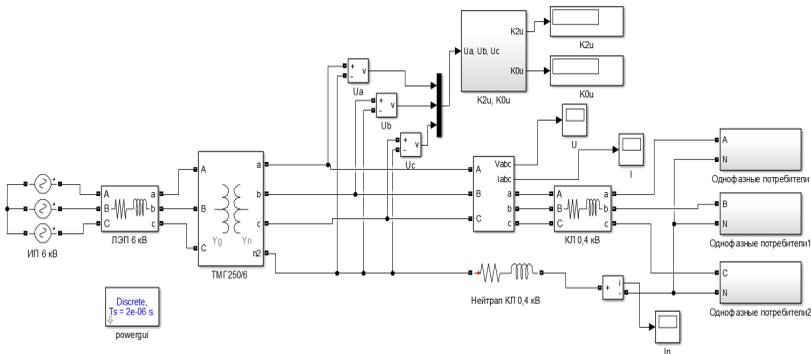


Рис. 1. Имитационная модель системы электроснабжения частного сектора

Недостатком программного комплекса Matlab&Simulink, является отсутствие блока, позволяющего определять коэффициенты несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательности, поэтому составлена алгоритм-схема, выполняющая расчет нужных показателей (рис. 2).

Результаты имитационного моделирования показывают, что коэффициенты несимметрии достигают следующих значений: $K_{2U} = 3,9$

%; $K_{OU} = 6,2 \%$, что превышает предельно и нормально допустимые значения ГОСТ 32144-2013.

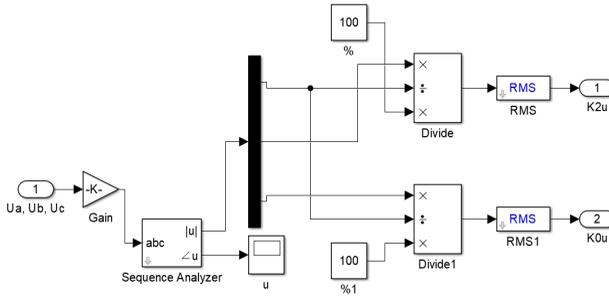


Рис. 2. Алгоритм-схема расчета коэффициентов несимметрии напряжения

Аналитический расчет коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности выполняется с помощью двум методик [3].

Классическим методом были рассчитаны комплексные симметричные составляющие показателей несимметрии напряжения по результатам экспериментальных измерений по формулам:

$$\begin{cases} \underline{U}_{1(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{U}_B a + \underline{U}_C a^2); \\ \underline{U}_{2(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{U}_B a^2 + \underline{U}_C a); \\ \underline{U}_{0(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C), \end{cases} \quad (3)$$

где $a = e^{j120^\circ}$ – комплексный множитель поворота вектора на 120° ; \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C – комплексные напряжения фаз А, В, С. $a = e^{j120^\circ}$.

Определив \underline{U}_1 , \underline{U}_2 и \underline{U}_0 находим коэффициенты несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательности системы фазных напряжений по выражениям (1) и (2).

Исходными данными для расчета является напряжение на шинах трансформаторной подстанции и углы между векторами напряжения полученные в результате экспериментальных исследований указанные в табл. 1. Результаты эксперимента подробно представлены и проанализированы в [4].

Таблица 1

Исходные данные для аналитического расчета					
Исходные данные для первой методики					
$U_A, В$		$U_B, В$		$U_C, В$	
225		-86,9-j215,1		-106,2-j191,5	
Исходные данные для второй методики					
$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$
237	234	231	396	400	398

Рассчитанные значения коэффициентов несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательности составили:

$$\begin{cases} \underline{U}_{A(1)} = 224,57 + j9,489В; \\ \underline{U}_{A(2)} = -10,209 - j1,634В; \\ \underline{U}_{A(0)} = 10,639 - j7,855В; \\ K_{2U} = 3,9\%; \\ K_{0U} = 6,2\%. \end{cases}$$

Значение коэффициентов несимметрии полученные на основании первой методики сопоставимы с результатами имитационного моделирования.

Также модульным методом были определены значения напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности по выражениям [5]:

$$\begin{cases} \underline{U}_{A(1)} = \frac{1}{6} \cdot (2U_A + \sqrt{3}(s+r) - (p+q)) + j((s-r) + \sqrt{3}(p-q)); \\ \underline{U}_{A(2)} = \frac{1}{6} \cdot (2U_A - \sqrt{3}(s+r) - (p+q)) + j((s-r) - \sqrt{3}(p-q)); \\ \underline{U}_{A(0)} = \frac{1}{3} \cdot (U_A + (p+q) - j(s-r)), \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{где } s = \sqrt{U_B^2 - p^2}; \quad r = \sqrt{U_C^2 - q^2}; \quad p = \frac{U_A^2 + U_B^2 - U_{AB}^2}{2U_A}; \quad q = \frac{U_A^2 + U_C^2 - U_{CA}^2}{2U_A}.$$

Исходными данными для расчета модульным методом являются значения фазных и линейных напряжений на шинах трансформаторной подстанции имитационной модели системы электроснабжения частного сектора представленные в табл. 1. Значение прямой, обратной и нулевой последовательности, а также величина коэффициентов

несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательности, рассчитанные по выражениям (1), (2) и (4) составили:

$$\begin{cases} \underline{U}_{A(1)} = 233,49 + j17,22B; \\ \underline{U}_{A(2)} = -8,848 - j4,579B; \\ \underline{U}_{A(0)} = 12,358 - j2,107B; \\ K_{2U} = 4\%; \\ K_{0U} = 5,9\%. \end{cases}$$

На основании имитационного моделирования и аналитических расчетов установлено, что величина коэффициентов несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательности достигают 4% и 6% соответственно. В работе [6] говорится, что превышение коэффициентов несимметрии более чем на 4% способствует увеличению тока нулевого провода до фазных токов и выше. Исследования, представленные в [7] показывают, что потери электроэнергии увеличиваются более чем на 8% при наличии несимметрии токов и напряжений. Следовательно, это говорит о необходимости использования специальных симметрирующих устройств (СУ). В результате проведенного анализа выбраны наиболее оптимальные СУ для системы электроснабжения частного сектора (рис. 3) [8].

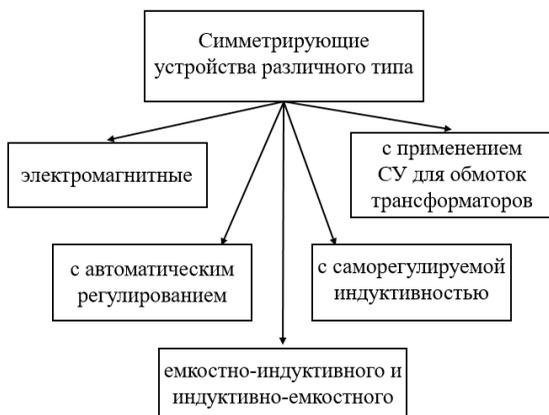


Рис. 3. Симметрирующие устройства

Электромагнитные СУ выполняются на трехстержневом магнито-проводе со схемой соединения обмоток «встречный зигзаг» с минимальным сопротивлением токам нулевой последовательности. К недостаткам СУ электромагнитного типа относится то, что оно является индуктивной нагрузкой, что приводит к повышению реактивной мощности и как следствие к снижению коэффициента мощности сети.

СУ емкостно-индуктивного и индуктивно-емкостного типа получили название, шунто-симметрирующие устройства. Они имеют низкое сопротивление токам нулевой последовательности, поэтому данные устройства замыкают на себе токи нулевой последовательности и не пропускают их на другие участки линии 0,4 кВ [9].

СУ с саморегулированием индуктивности снижают несимметричные токи и напряжения в трехфазных четырехпроводных сетях за счет саморегулирования индуктивности при изменении тока нулевой последовательности.

Обмотку СУ включают в расщелку нулевого провода трансформатора, из расчета на то, что при несимметричной нагрузке и появлении тока в нулевом проводе создаваемые в магнитопроводе потоки нулевой последовательности в рабочих обмотках трансформатора Y/Y_n полностью компенсируют противоположно направленные потоки нулевой последовательности от СУ [10].

Автоматические СУ в зависимости от мощности нагрузки в каждой фазе и загруженности линии устройства позволяют переключать нагрузку между фазами отдельных фидеров с целью равномерной нагрузки без изменения направления чередования фаз.

Однако использование рассматриваемых СУ может не окупиться даже за весь период эксплуатации, в виду их большой стоимости. Поэтому целью дальнейшей работы является выбор технических устройств с учетом минимума приведенных затрат при максимальной компенсации несимметрии токов и напряжений.

Выводы: 1. Имитационное моделирование и аналитический расчет коэффициентов несимметрии показали наличие несимметричных режимов работы в системе электроснабжения частного сектора, которые приводят к возникновению дополнительных потерь электроэнергии.

2. Хорошая сходимость результатов моделирования и аналитического расчета может быть использованы для решения задачи рационального выбора технических устройств компенсации несимметричных режимов работы.

2. Выбор наиболее оптимального типа СУ необходимо делать при условии двух критериев: минимума приведенных затрат и коэффициентов несимметрии.

Библиографический список

1. **Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Криштопа Н.Ю.** Метод расчета потерь мощности от несимметрии токов в электрических сетях 0, 38 кВ // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. № 36. С. 220–225.

2. **Авербух М.А., Жилин Е.В.** Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 40–45.

3. **Костюченко Л.П.** Имитационное моделирование систем сельского электроснабжения в программе MATLAB: учеб. пособие. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2012. 216 с.

4. **Авербух М.А., Жилин Е.В.** О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Энергетик. 2016. № 6. С. 54–57.

5. **Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Борощин А.Л.** Энергосбережение в низковольтных электрических сетях при несимметричной нагрузке: монография. СПб.: Лань, 2016. 280 с.

6. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаревич, В.Н. Горюнов, и др. // Омский научный вестник. 2013. № 2. С. 178–183.

7. Дополнительные потери мощности в электрических сетях при несимметричной нагрузке / А.В. Дед, А.И. Волынкин, М.Ю. Денисенко и др. // Омский научный вестник. 2013. № 1. С. 157–158.

8. **Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Филиппов А.О.** Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками // Электротехника. 2014. № 6. С. 8–12.

9. **Самарин Г.Н., Ружьев В.А., Егоров М.Ю.** Способы коррекции уровней напряжения и несимметрии напряжений в сетях 0,4 кВ // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2017. № 4 (49). С. 279–286.

10. **Манусов В.З., Морозов П.В.** Исследование методов снижения несимметрии загрузки трехфазной сети на тяговых подстанциях скоростных железных дорог переменного тока // Известия Транссиба. 2012. № 2 (10). С. 87–93.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Магистрант **Юдин А.А.**

Магистрант **Бондарь В.В.**

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

***Аннотация.** Разработаны математические модели для расчета и оптимизации режимов электроэнергетических систем по напряжению и реактивной мощности. Результаты расчетов и оптимизации установившихся режимов тестовой схемы электрической сети в программном комплексе Mathcad, полученные с использованием разработанных моделей, совпадают с результатами, полученными при расчетах в программном комплексе RastrWin.*

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

В связи с усложнением структуры электроэнергетических систем и повышением их оснащенности устройствами автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности [1] особую актуальность приобретает экономически целесообразное управление установившимися режимами электрических сетей [2], в том числе на основе мониторинга электропотребления [3]. Существующий на сегодняшний день в Единой энергетической системе России метод регулирования напряжения основан на поддержании заданных графиков напряжения в контрольных пунктах. Период разработки этих графиков, как правило, составляет один месяц или квартал, и они не актуализируются в режиме реального времени с учетом фактического состояния энергосистемы [4], что является сдерживающим фактором для получения потенциального энергосберегающего эффекта при регулировании напряжения [5]. Следовательно, большое значение имеет совершенствование системы регулирования напряжения и реактивной мощности в электроэнергетических системах, связанное с необходимостью создания расчетных моделей для анализа и оптимизации режимов.

Целью работы является разработка математических моделей для расчета оптимальных режимов напряжений в электрических сетях с

точки зрения снижения потерь активной мощности при соблюдении технических ограничений.

Далее рассматривается формирование математических моделей для тестовой схемы электрической сети, содержащей 10 узлов, в программном комплексе Mathcad (рис. 1).

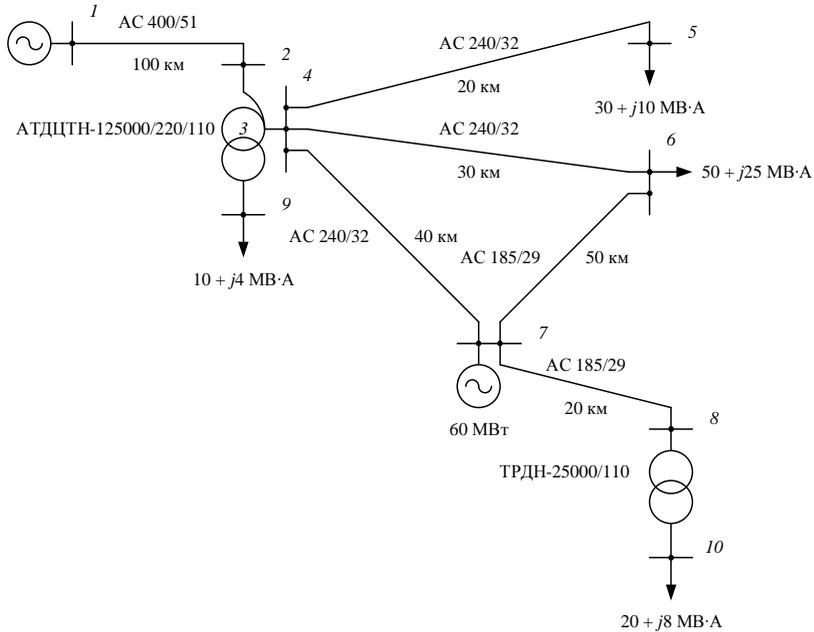


Рис. 1. Однолинейная тестовая схема электрической сети

Если уравнения узловых напряжений в форме баланса мощностей записаны в полярной системе координат (U, δ), то небалансы активной и реактивной мощности в i -м узле имеют вид [6]

$$W_{P_i} = g_{ii}U_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+1} g_{ij}U_iU_j \cos(\delta_i - \delta_j) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+1} b_{ij}U_iU_j \sin(\delta_i - \delta_j) - P_i;$$

$$W_{Q_i} = -b_{ii}U_i^2 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+1} b_{ij}U_iU_j \cos(\delta_i - \delta_j) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+1} g_{ij}U_iU_j \sin(\delta_i - \delta_j) - Q_i,$$

где g_{ii} , b_{ii} – активная и реактивная составляющие собственной проводимости узла; g_{ij} , b_{ij} – активная и реактивная составляющие взаимных проводимостей узлов; U_i , U_j – модули напряжений узлов; δ_i , δ_j – фазовые углы напряжений узлов; P_i , Q_i – активная и реактивная мощности узла, для генерирующего узла учитываются со знаком плюс, для нагрузочного – со знаком минус; $i = 1 \dots n$ (балансирующему узлу присвоен номер $n + 1$).

Для получения явных зависимостей небалансов активной и реактивной мощности от активных G_{ij} и реактивных B_{ij} составляющих проводимостей ветвей схемы замещения, а также вещественных K'_{ij} и мнимых K''_{ij} составляющих комплексных коэффициентов трансформации необходимо преобразовать приведенные выше выражения. Таким образом, например, для узла 4 (рис. 1) можно получить:

$$\begin{aligned}
 W_{P4} &= \left[G_{34} (K'_{34}{}^2 + K''_{34}{}^2) + G_{45} + G_{46} + G_{47} \right] U_4^2 - \\
 &- (G_{34} K'_{34} + B_{34} K''_{34}) U_4 U_3 \cos(\delta_4 - \delta_3) - G_{45} U_4 U_5 \cos(\delta_4 - \delta_5) - \\
 &- G_{46} U_4 U_6 \cos(\delta_4 - \delta_6) - G_{47} U_4 U_7 \cos(\delta_4 - \delta_7) - \\
 &- (B_{34} K'_{34} - G_{34} K''_{34}) U_4 U_3 \sin(\delta_4 - \delta_3) - B_{45} U_4 U_5 \sin(\delta_4 - \delta_5) - \\
 &- B_{46} U_4 U_6 \sin(\delta_4 - \delta_6) - B_{47} U_4 U_7 \sin(\delta_4 - \delta_7) - P_4; \\
 W_{Q4} &= - \left[B_{34} (K'_{34}{}^2 + K''_{34}{}^2) + B_{45} + B_{46} + B_{47} + \frac{B_{045}}{2} + \frac{B_{046}}{2} + \frac{B_{047}}{2} \right] U_4^2 + \\
 &+ (B_{34} K'_{34} - G_{34} K''_{34}) U_4 U_3 \cos(\delta_4 - \delta_3) + B_{45} U_4 U_5 \cos(\delta_4 - \delta_5) + \\
 &+ B_{46} U_4 U_6 \cos(\delta_4 - \delta_6) + B_{47} U_4 U_7 \cos(\delta_4 - \delta_7) - \\
 &- (G_{34} K'_{34} + B_{34} K''_{34}) U_4 U_3 \sin(\delta_4 - \delta_3) - G_{45} U_4 U_5 \sin(\delta_4 - \delta_5) - \\
 &- G_{46} U_4 U_6 \sin(\delta_4 - \delta_6) - G_{47} U_4 U_7 \sin(\delta_4 - \delta_7) - Q_4.
 \end{aligned}$$

Модули и фазовые углы напряжений в электрической сети рассчитываются методом Ньютона:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}^{(k+1)} \\ \boldsymbol{\delta}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}^{(k)} \\ \boldsymbol{\delta}^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{W}_P}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial \mathbf{W}_P}{\partial \boldsymbol{\delta}} \\ \frac{\partial \mathbf{W}_Q}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial \mathbf{W}_Q}{\partial \boldsymbol{\delta}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_P(\mathbf{U}^{(k)}, \boldsymbol{\delta}^{(k)}) \\ \mathbf{W}_Q(\mathbf{U}^{(k)}, \boldsymbol{\delta}^{(k)}) \end{bmatrix}.$$

Расчет установившегося режима заканчивается, когда небалансы активной и реактивной мощности становятся меньше заданной величины.

Для минимизации потерь активной мощности в электрической сети (рис. 1) необходимо составить модель целевой функции, с целью последующей верификации модели в программном комплексе RastrWin в ней учитываются только потери активной мощности в продольных элементах схемы замещения:

$$\begin{aligned}
 F = \Delta P_{\Sigma} = & (U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos(\delta_1 - \delta_2))G_{12} + (U_2^2 + U_3^2 - \\
 & - 2U_2U_3 \cos(\delta_2 - \delta_3))G_{23} + [U_3^2 + (K'_{34}{}^2 + K''_{34}{}^2)U_4^2 - \\
 & - 2K'_{34}U_3U_4 \cos(\delta_3 - \delta_4) - 2K''_{34}U_3U_4 \sin(\delta_3 - \delta_4)]G_{34} + \\
 & [U_3^2 + (K'_{39}{}^2 + K''_{39}{}^2)U_9^2 - 2K'_{39}U_3U_9 \cos(\delta_3 - \delta_9) - \\
 & - 2K''_{39}U_3U_9 \sin(\delta_3 - \delta_9)]G_{39} + (U_4^2 + U_5^2 - 2U_4U_5 \cos(\delta_4 - \delta_5))G_{45} + \\
 & + (U_4^2 + U_6^2 - 2U_4U_6 \cos(\delta_4 - \delta_6))G_{46} + (U_4^2 + U_7^2 - \\
 & - 2U_4U_7 \cos(\delta_4 - \delta_7))G_{47} + (U_6^2 + U_7^2 - 2U_6U_7 \cos(\delta_6 - \delta_7))G_{67} + \\
 & + (U_7^2 + U_8^2 - 2U_7U_8 \cos(\delta_7 - \delta_8))G_{78} + [U_8^2 + (K'_{810}{}^2 + K''_{810}{}^2)U_{10}^2 - \\
 & - 2K'_{810}U_8U_{10} \cos(\delta_8 - \delta_{10}) - 2K''_{810}U_8U_{10} \sin(\delta_8 - \delta_{10})]G_{810}.
 \end{aligned}$$

Данная функция является неявной, и ее минимизация выполняется методом приведенного градиента с разделением всех переменных на зависимые и независимые (управляемые). Для рассматриваемого примера (рис. 1) независимыми переменными являются модуль напряжения U_7 и вещественная составляющая коэффициента трансформации K'_{34} , модули и фазовые углы напряжений относятся к зависимым переменным. В состав целевой функции в качестве слагаемых могут входить штрафные функции, они вводятся при нарушении ограничений на зависимые переменные в форме неравенств. Ограничения в форме неравенств на независимые переменные учитываются закреплением этих переменных на нарушенных пределах. Ограничения в форме равенств (уравнения баланса мощности) учитываются на каждом шаге оптимизации путем расчета установившегося режима [7].

Градиент целевой функции можно определить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial F}{\partial \mathbf{K}'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial F}{\partial \mathbf{K}'} \end{bmatrix}_0 - \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial F}{\partial \delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{W}_p}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial \mathbf{W}_p}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \mathbf{W}_q}{\partial \mathbf{U}} & \frac{\partial \mathbf{W}_q}{\partial \delta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{W}_p}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \mathbf{W}_p}{\partial \mathbf{K}'} \\ \frac{\partial \mathbf{W}_q}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \mathbf{W}_q}{\partial \mathbf{K}'} \end{bmatrix},$$

где \mathbf{V} – вектор напряжений, которые являются независимыми переменными.

Значения независимых переменных на каждой итерации определяются по формулам

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} - t_i^{(k)} \frac{\partial F^{(k)}}{\partial V_i};$$

$$K_i'^{(k+1)} = K_i'^{(k)} - t_i^{(k)} \frac{\partial F^{(k)}}{\partial K_i'}.$$

Результаты расчета оптимального режима напряжений для схемы электрической сети (рис. 1) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета оптимального режима

Номер итерации	U_7 , кВ	K'_{34}	$\partial F / \partial U_7$	$\partial F / \partial K'_{34}$	t_1	t_2	ΔP_{Σ} , МВт
0	117,000	1,901	-0,081	-3,724	1,170	0,019	1,798
1	117,095	1,972	-0,044	-1,323	2,925	0,048	1,613
2	117,223	2,034	-0,008	0,839	7,313	0,012	1,595
3	117,280	2,025	-0,013	0,540	18,281	0,030	1,587
4	117,516	2,008	-0,020	0,137	45,703	0,074	1,578
5	118,410	1,998	-0,016	0,295	114,258	0,186	1,560
6	120,292	1,944	-0,029	-0,548	285,645	0,046	1,524
7	121,000	1,969	-0,008	0,747	285,645	0,012	1,513
8	121,000	1,960	-0,013	0,439	285,645	0,029	1,508
9	121,000	1,948	-0,020	-0,013	285,645	0,007	1,505
10	121,000	1,948	-	-	-	-	1,505

Шаг для каждой переменной на k -й итерации (табл. 1) вычисляется по формуле

$$t_i^{(k+1)} = \gamma t_i^{(k)},$$

где γ – эмпирический коэффициент, в данном примере принимался равным 2,5, 0,25 или 1 в зависимости от изменения знака каждой составляющей градиента и сходимости итерационного процесса.

В качестве критерия остановки расчета принимается малость относительного изменения целевой функции по сравнению с предыдущей итерацией.

Для рассматриваемой схемы потери активной мощности в результате оптимизации снизились на 16 %. Результаты расчетов в программных комплексах Mathcad и RastrWin совпадают.

Таким образом, предложенные математические модели позволяют определить рациональные уровни напряжений в электрической сети для каждого мгновенного установившегося режима. Рассмотренный алгоритм обеспечивает приемлемую сходимость расчетов.

Библиографический список

1. **Тамазов А.И.** Новый подход к регулированию напряжения и реактивной мощности в энергосистеме по минимуму потерь // *Электричество*. 2016. № 8. С. 29–36.
2. **Гвоздев Д.Б., Холопов С.С.** Новый подход к управлению уровнями напряжения и компенсацией реактивной мощности в электрических сетях 110–220 кВ // *Вестник МЭИ*. 2016. № 6. С. 49–57.
3. **Белоусов А.В., Кошлич Ю.А., Быстров А.Б.** Перспективы применения современных статистических и детерминированных методов прогнозирования в системах мониторинга энергопотребления // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2012. № 4. С. 192–196.
4. **Воронин В., Гаджиев М., Шамонов Р.** Направления развития системы регулирования напряжения и реактивной мощности в ЕНЭС // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2012. № 2 (11). С. 40–47.
5. **Бакалин Ю.И., Мухин Н.П., Виноглядов В.Н.** Сдерживающие факторы в организации энергосбережения и вопросы получения реальной энергоэффективности // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2013. № 2. С. 185–187.
6. **Идельчик В.И.** Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
7. **Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С.** Регулирование напряжений в электроэнергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 216 с.

3. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГО- ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 697.1

ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭФФЕКТА ПРИ УСТАНОВКЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ

магистрант **Бычихин С.А.**

магистрант **Свирин М.В.**

д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**

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

***Аннотация.** Целью работы являлось оценка энергосберегающего эффекта после установки в 18 образовательных учреждений Белгородского района автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов, осуществляющих погодное регулирование отопительной нагрузки. Установлено, что наибольшую величину экономии, 20-30%, обеспечивает снижение температуры в зданиях до оптимального уровня. Ликвидация «перетопов» в начальный и конечный периоды отопительного сезона позволяет экономить 5-10% тепловой энергии. Снижение температуры в нерабочие дни характеризуется экономией менее 1%. Усредненная удельная величина экономии по всем учреждениям составила 14%.*

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

Введение. Одним из способов энергосбережения в системах отопления является установка в зданиях автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов (АИТП), которые регулируют подачу тепловой энергии для отопления в зависимости от температуры наружного или внутреннего воздуха. На практике величину экономии оценивают методом аналогий с использованием фактических результатов установки АИТП. В литературе и нормативных источниках [1–6] величина экономии оценивается в весьма широких пределах – от 3-5% [1] до 20-30% [2]. Целью работы являлось оценка фактического энергосберегающего эффекта после установки АИТП в образовательных учреждениях.

Используемые данные и методы

Реконструкция систем отопления проводилась в летом и осенью 2016 г. в рамках энергосервисных контрактов. Для анализа были отобраны 18 объектов (12 школ и 6 детских садики), на которых до мероприятий учетом потребления тепловой энергии осуществлялся приборным способом. Здания имели следующие характеристики: количество этажей: 2, 3; площадь: от 999 до 5614 м²; отопливаемый объем: от 3702 до 2370 м³; материал стен: силикатный кирпич, панельные стены.

В качестве базового периода принят отопительный сезон 2015/2016 г., оцениваемые периоды – сезоны 2016/2017 и 2017/2018 г.

Для расчета ГСОП использовались фактические климатические данные метеостанции г. Белгорода, полученные с сайта gr5.ru. Расчет экономии относительной экономии тепловой энергии Δq , %, проводился с приведением данных к сопоставимым условиям:

$$\Delta q = \frac{\frac{Q_6}{\text{ГСОП}_6} \text{ГСОП}_н - \frac{Q_i}{\text{ГСОП}_i} \text{ГСОП}_н}{\frac{Q_6}{\text{ГСОП}_6} \text{ГСОП}_н} 100\% = \left(1 - \frac{Q_i}{Q_6} \frac{\text{ГСОП}_6}{\text{ГСОП}_i} \right) 100\%.$$

где Q_6 и Q_i – потребление тепловой энергии в базовый и оцениваемый период; ГСОП_6 , ГСОП_i и $\text{ГСОП}_н$ – градусо-сутки базового периода, оцениваемого периода и нормативное значение или значение для периода, к которому данные приводятся.

Потребление тепловой энергии в зданиях за каждый месяц базового периода были получены в районной теплоснабжающей организации. Посуточное потребление тепловой энергии за оцениваемые периоды получены с использованием Системы управления энергоресурсами Белгородской области, осуществляющей накопление и обработку дистанционно получаемых данных с приборов учета тепловой энергии. По ежедневному потреблению индивидуально для каждого здания определялись начало и конец отопительных периодов. Так как запуск АИТП в разных учреждениях проводился в различное время в период с 1 октября 2016 года по 20 декабря 2016 г., и для отдельных приборов учета имелись перерывы в работе, длительностью до месяца, оцениваемые периоды включали только те дни, в которые приборы учета работали, поэтому потребление тепловой энергии и ГСОП, используемые для расчета экономии, могли быть меньше этих показателей в отопительный сезон. В расчетах температура воздуха в зданиях t_{in} принималась постоянной и равной 20°C.

Полученные результаты и их анализ

Полученная удельная фактическая экономия в год после установки АИТП по сравнению с базовым отопительным сезоном приведена в табл. 1. Среднее значение экономии составило 14%, максимальное – 31%. Для отдельных учреждений экономия отсутствовала.

Таблица 1

Потребление тепловой энергии и величина экономии

№		Объём, м ³	Удельная экономия Δq
1	Детский сад № 20 п. Разумное	3702	6%
2	Детский сад № 7 с. Беловское	3787	20%
3	Детский сад № 14 с. Головино	5706	11%
4	Детский сад № 13 п. Политотдельский	3806	10%
5	Детский сад № 29 с. Красный Октябрь	12231	0%
6	Стрелецкая СОШ	5266	25%
7	Пушкарная СОШ	6542	4%
8	Беловская СОШ	8783	18%
9	Журавлевская СОШ	6560	9%
10	Хохловская СОШ	7275	31%
11	Мясоедовская ООШ	9524	7%
12	Краснооктябрьская СОШ	15654	21%
13	Разуменская СОШ №	18489	14%
14	Бессоновская СОШ	15175	15%
15	Отраденская СОШ	14564	24%
16	Разуменская СОШ № 2	16285	-2%
17	Щетиновская СОШ	22370	20%

Зависимости величины экономии Δq от площади, объёма или потребления теплоты нет (коэффициенты корреляции соответственно 0,04; 0,08; 0,25), но экономия зависит от удельной отопительной характеристики $q_{уд}$, Вт/(м³·К), коэффициент корреляции составил 0,93 для детских садиков и 0,45 для школ (рис. 1).

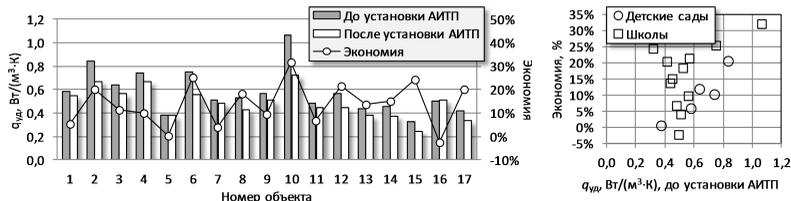


Рис. 1. Удельные тепловые характеристика здания и экономия тепловой энергии (при принимаемой постоянной температуре внутреннего воздуха 20°C)

Анализируя изменения характеристик до и после установки АИТП можно выделить три случая.

1. Отопительная нагрузка здания (зависимость расхода на отопление от температуры наружного воздуха) отрегулирована как в базовом периоде, так и в оцениваемом, но расход тепловой энергии на отопление уменьшается (рис. 2а), что характерно для объектов 1 (экономия 20%); 2 (18%); 9 (24%); 14 (25%); 15 (31%). В этом случае экономия достигается за счет ликвидации постоянных «перетопов» и снижения температуры в здании с повышенной до оптимальной. Для условий г. Белгорода средняя температура наружного воздуха за отопительный сезон близка к 0°C, поэтому изменение температуры внутри здания на 1°C приводит к изменению расхода на отопление на 5%. Поэтому до установки АИТП температура в зданиях составляла около 24°C.

2. Отопительная нагрузка здания до проведения мероприятий отрегулирована не была (рис. 2б, 3), что характерно для объектов 4 (экономия 11%); 5 (9%); 6 (0%); 7 (21%); 8 (7%); 10 (10%); 11 (4%); 12 (14%); 16 (20%). В этом случае экономия достигается за счет ликвидации «перетопов» в начале и конце отопительного сезона. На части объектов дополнительная экономия определяется так же снижением постоянно повышенной температуры в здании до оптимальной.

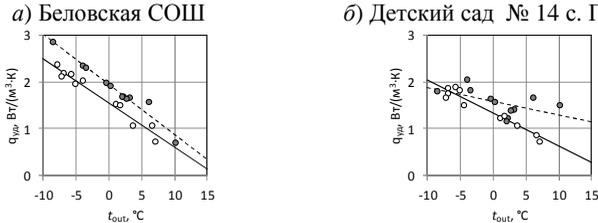


Рис. 2. Отопительная характеристика:

•, --- — до установки АИТП; ◦, — — после установки АИТП

3. На объектах 6 и 13 экономия отсутствовала, до проведения мероприятий в зданиях была температура ниже нормативной.

Настройка АИТП предусматривала снижение температуры в праздничные и выходные дни. Для каждого объекта за период два года произведен расчет среднего значения $q_{уд}$ отдельно для нерабочих и рабочих дней, а также $q_{уд}$ в первый нерабочий день после рабочих и в первый рабочий день, следующий за нерабочими. Результаты расчета представлены на рис. 3.

В среднем для всех объектов снижение расхода на отопление в нерабочие дни составило 0,9%. В первый рабочий день после нерабочих расход на отопление был выше среднего на величину до 6%. То есть полученная экономия впоследствии нивелируется повышенным расходом на отопление для прогрева здания.

Выводы. В работе для 18 образовательных учреждений Белгородского района произведен анализ экономии тепловой

энергии после установки в учреждениях автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов, осуществляющих погодное регулирование отопительной нагрузки. Установлено, что наибольшую величину экономии, 20-30%, обеспечивает снижение температуры в зданиях до оптимального уровня. Ликвидация «перетопов» в начальный и конечный периоды отопительного сезона позволяет экономить 5-10% тепловой энергии. Снижение температуры в нерабочие дни характеризуется малой величиной экономии, менее 1%, или ее отсутствием. Усредненная удельная величина экономии по всем учреждениям составила 14%.

Библиографический список

1. МДС 13-7.2000. Рекомендации по первоочередным малозатратным мероприятиям, обеспечивающим энергоресурсосбережение в ЖКХ города. Утв. приказом Госстроя РФ от 17 января 2000 г. № 5.
2. Методические рекомендации по расчету эффектов от реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности: под общ. ред. Е.Г. Гашо. М.: АЦ при Правительстве РФ, 2016. 56 с.
3. Экономическая эффективность энергосбережения в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / Л.И. Еремкин, Т.И. Королева, Г.В. Данилин и др. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. 184 с.
4. Шилкин Н. В. Экономические аспекты внедрения индивидуальных тепловых пунктов // Энергосбережение. 2007. № 3. С. 12–15.
5. Энергосбережение в жилищном фонде: проблемы, практика и перспективы. М.: Депа, Фонд «Институт экономики города», 2004. 108 с.
6. Практические результаты установки ИТП в типовом 9-этажном 4-подъездном панельном доме. URL <http://dom-pogoda.ru/automation/primer-ekonomicheskogo-effekta-raboty> (дата обращения 10.11.2018 г.).

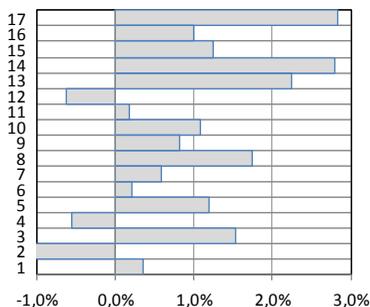


Рис. 3. Экономия при снижении отопительной нагрузки в нерабочие дни

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОТОЧНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ ГАЗА И ЭТАЛОННЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕСУРСОВ

канд. физ.-мат. наук, доц. **Величко М.А.**

канд. физ.-мат. наук, доц. **Гладких Ю.П.**

канд. филос. наук, доц. **Костина И.Б.**

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет НИУ «БелГУ», г. Белгород*

***Аннотация.** В статье описана новая разработка для промышленного применения – ультразвуковой расходомер с высоким динамическим диапазоном. Благодаря высокой точности измерения можно сохранить газовые ресурсы, а с помощью соответствующего программного обеспечения вычислительного устройства, избежать утечки газа, уменьшить потребление энергии и сократить трудовые затраты. Показаны новые технологии, позволяющие повысить точность измерений и увеличить интервал между поверками счетчиков. Описано низкое энергопотребление, позволяющее использовать ультразвуковой расходомер в труднодоступных условиях без непосредственного управления в течение нескольких месяцев. Также рассмотрено использование современных беспроводных технологий для сбора и передачи метрологических данных.*

Газ является основным топливом в России, на него приходится более 50% потребления первичных энергоресурсов – это достаточно много по мировым стандартам. Ни одна страна с развитой экономикой не имеет такой высокой доли газа в топливном балансе. Для сравнения заметим, что в Великобритании соотношение газа в энергопотреблении составляет – 40%, в Нидерландах – 38%, в Канаде – 27%, а в США – 26%. Гидроэнергетика преобладает в Норвегии и ее доля в газе составляет всего 9%. Однако на фоне таких стран, как Иран, где газ тоже дает 55% всей первичной энергии, или Алжир, где его доля составляет 60%, Россия выглядит вполне органично.

Тем не менее, потребление газа в России велико. Разумно отметить, что он равен совокупному потреблению Германии, Франции, Италии, Японии, Китая и Индии. Ежегодно Россия сжигает и перерабатывает более 420 миллиардов кубометров газа, уступая по этому показателю только США. В России доля экспортируемого голубого

топлива достигает всего 30%, остальная часть потребляется внутри страны. Чтобы сохранить свои позиции на зарубежных газовых рынках или даже завоевать новые, России необходимо сократить внутреннее потребление.

Измерение и сравнение расходов газа на всех этапах от газовых компаний до потребителей газа достаточно сложная работа. В частности, это эффективный учет газа, мониторинг газового потока и телеметрия [1]. Расходы потока газа должны быть измерены под различными условиями температуры, давления и влажности. Расходомер газа обычно состоит из трех основных частей, таких как герметичный корпус, измерительный преобразователь и счетное устройство. Измерительный механизм является основным элементом, а принцип преобразования потока в механическое, электрическое или иное воздействие на счетное устройство определяет тип расходомера. Механические преобразователи используют различные свойства газов для перемещения рычага, действующего на счетное устройство. Электронные датчики преобразовывают свойства подачи в электрический импульс, который увеличивает индикацию на дисплее, а конвертер использует физические свойства подачи газообразного вещества. Согласно принципу своей деятельности, существуют несколько типов счетчиков:

1) мембранный измеритель, в котором газ поочередно заполняет две измерительные камеры, разделенные мембраной. Каждая камера имеет фиксированный объем. Клапаны входного сигнала и выхода несимметрично синхронизированы друг с другом. Движение мембраны преобразуется рычагом в поворот привода счетного устройства, который показывает объем топлива, прошедшего через устройство;

2) роторный газовый счетчик, который использует давление газа в специальных баках для того чтобы управлять роторами, подсоединяется к приводу счетным механизмом. Счетчик переводит количество оборотов в количество топлива;

3) турбинный счетчик основан на скорости потока измерения путем подсчета количества оборотов турбины, которая вращается под давлением потока. Такие приборы учета используются только на муниципальных и промышленных предприятиях для учета больших объемов;

4) вихревой расходомер использует зависимость частоты колебаний давления, которые возникают после того, как струе газообразного вещества придается вихревая форма. Механизм учета этих колебаний сложен, требует применения микропроцессорной техники, поэтому

такие устройства являются дорогостоящими и используются только на крупных газораспределительных предприятиях;

5) ультразвуковой счетчик-расходомер, он обычно использует разницу времен распространения волн ультразвука вдоль и против подачи, оценивая скорость подачи, после чего преобразовывает ее к потреблению газа. Ультразвуковым расходомерам также необходима высокоточная электроника для преобразования нано и пико-вторых импульсов в цифровые сигналы [2–4].

Ультразвуковые расходомеры все чаще используются в различных отраслях промышленности. Преимущества счетчиков – расходомеров заключается в высокой точности измерения, широком динамическом диапазоне, низкой инерции, отсутствием потерь дополнительного давления, простотой дизайна. Ультразвуковые счетчики-расходомеры успешно заменяют роторные и турбинные счетчики-расходомеры.

Не так давно мы разработали новый промышленный времяпрелетный ультразвуковой расходомер газа ИргаРУ, который уже внесен в Государственный реестр средств измерений. Принцип его работы основан на импульсно-временном методе измерения расхода газа. Он состоит в измерении времени прохождения ультразвуковых импульсов по направлению потока газа в трубопроводе и против него. Возбуждение и прием импульсов осуществляется пьезоэлектрическими преобразователями, которые устанавливаются в цельнометаллическом корпусе расходомера под углом (от 30° до 45° , в зависимости от исполнения) к направлению потока. Скорость ультразвука в среде зависит от физико-химических свойств этой среды: температуры, давления и др. В то же время, она значительно больше скорости среды, так что действительная скорость ультразвука в движущейся среде мало отличается от скорости в неподвижной среде. Разница во времени транзита даже при скорости потока около 10 м/с составляет доли микросекунды, в то время как погрешность измерения не должна превышать нескольких наносекунд. Данные обстоятельства обуславливают необходимость использования сложных электронных схем в сочетании с микропроцессорной техникой, обеспечивающих компенсацию влияния этих факторов.

Конструктивно расходомер состоит из трех блоков: 1) основной конвертер подачи, который снабжен жилищем с встроенными ультразвуковыми приемопередатчиками; 2) блок питания со встроенным баьером искра защиты для обеспечения взрыва цепей защиты, при

необходимости; 3) электронный блок, который управляет ультразвуковыми приемопередатчиками, осуществляет прием, обработку, преобразование и передачу сигналов на вычислительное устройство. Эти сигналы содержат, в частности, информацию о времени распространения ультразвуковых импульсов, которые необходимы для расчета объемного расхода газа в рабочих условиях:

$$v = \frac{L \cdot (t_2 - t_1)}{2 \cdot t_1 \cdot t_2 \cdot \cos \alpha},$$

где: v – скорость потока в трубопроводе, L – расстояние между приемопередатчиками, α – угол между осью установки датчиков и осью трубопровода, t_1 и t_2 – время распространения ультразвуковых импульсов вдоль потока и против него.

Конструкция расходомера исключает возможность несанкционированного воздействия на программное обеспечение расходомера и измерительную информацию. Мы разработали и успешно протестировали собственные схемы управления пьезоэлектрическими приемопередатчиками, а также создали новые оригинальные алгоритмы обработки полученных сигналов. Это позволило нам: существенно расширить динамический диапазон измерения расхода газа до значений порядка 1:2000; повысить точность измерений до 1% в большинстве задач; использовать расходомер на трубопроводах практически любого диаметра; проводить измерение расхода различных физико-химических свойств газовых сред на высокой скорости, в широком диапазоне температур и давлений; не вводить дополнительные потери давления в трубопровод. При этом наш расходомер имеет достаточно простую конструкцию и не требует значительных длин прямых участков до и после его установки.

В конструкции расходомера использованы современные преобразователи микроконтроллеров, использующие энергосберегающие технологии, разработаны энергоэффективные алгоритмы передачи, приема и обработки ультразвуковых импульсов. Потребляемая мощность снизилась до нескольких мкВт, что помогло нам в реализации автономного питания от аккумуляторных батарей.

Коллеги из Туркменистана предоставили нам возможность протестировать нашу установку на солнечных батареях в условиях пустыни с почти безоблачной погодой и периодическими изменениями энергоснабжения. Эксперимент показал, что расходомер способен работать без непосредственного обслуживания несколько месяцев. В этом слу-

чае встает единственная задача – это получение информации с удаленного расходомера, поэтому нами была организована система телеметрии и разработано дополнительное программное обеспечение. Мы испробовали несколько решений при передаче метрологической информации с расходомера, такие как радиомодемы, GSM/GPRS или 4G/3G модемы. Наиболее эффективным решением для пустыни стал радиомодем с кодовой модуляцией, который передавал данные более чем на 7 км к центральному узлу. Сигнал 3G был достаточно высок только в центральном узле, где мы создали HTTP-клиент на базе солнечного микроконтроллера, который периодически размещал данные на web-сервере, расположенном в Ашхабаде.

Хотя ультразвуковые расходомеры очень эффективны в высоком динамическом диапазоне, они также должны быть откалиброваны, это означает, что их показания должны быть синхронизированы с эталонами. Это стандартная процедура для всех метрологических приборов, независимо от их цены, условий эксплуатации, динамических диапазонов, типов, размеров и других свойств. Проверку могут производить только специализированные организации с высокоточными стендами, которые должны быть включены в государственный реестр средств измерений. Обычно такие стенды представляют собой громоздкие системы, которые требуют много свободного места и высокой квалификации оператора. Кроме того, они или их части (например, сопла, в случае стендов на критических соплах) сами по себе требуют периодической повторной калибровки в организациях по стандартизации. Такие стенды стоят около нескольких миллионов рублей. Мы предлагаем ультразвуковую испытательную установку «KRAB-UM» – мобильный верификационный стенд (рис. 1).

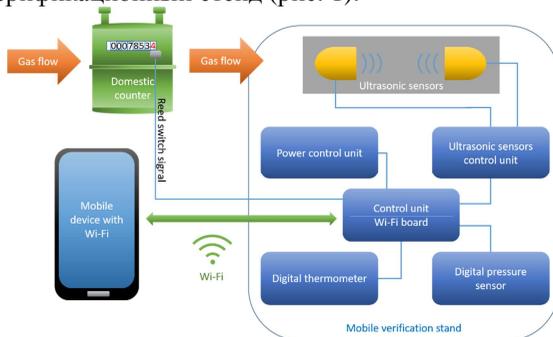


Рис. 1. Общая схема мобильного верификационного стенда

Принцип его работы заключается в автоматическом выборе точек поверки и наборе условий для проведения измерений, контроле показаний датчиков температуры и давления, автоматическом регулировании расхода, сравнении объемов газа, прошедшего через бытовой счетчик и через высокоточную ультразвуковую систему отсчета, анализе результатов измерений и принятии решений об успешности поверки.

Это первый ультразвуковой мобильный калибровочный стенд, который, помимо прочего, использует беспроводную технологию для передачи, хранения и отображения метрологических и других данных, и способен работать на батареях в течение 8 часов. Пикосекундная точность электронного расчета разницы во времени прохождения ультразвуковых импульсов между приемником и передатчиком, что до недавнего времени было невозможно, а также усовершенствованная конструкция гидравлической части эталонного устройства позволили разработать компактный высокоточный надежный стенд.

Мы разработали и собрали рабочую модель мобильного ультразвукового эталонного блока для автоматической поверки бытовых счетчиков (рис. 2).



Рис. 2. Передвижная ультразвуковая стойка тарировки

Установка успешно прошла лабораторные испытания и готова к полевым испытаниям. «KRAV-UM» может использоваться как на газопроводе, что позволяет проводить поверку бытовых и коммунальных счетчиков газа без демонтажа, так и в качестве стационарной опорной установки (в этом случае необходим проточный компрессор). Работать с нашим стендом достаточно просто, так как весь процесс автоматизирован и требует лишь перемещения между страницами в web-браузере, и нажатием одной кнопки. Информация о проведенной поверке хранится и шифруется, что обеспечивает достоверность результатов и возможность проследить процесс всех измерений.

Таким образом, мобильная калибровка с помощью нашего ультразвукового стенда может значительно облегчить жизнь, частным потре-

бителям газа и промышленным предприятиям, избавив их от необходимости снимать счетчики и сдавать в метрологическую службу. Наши счетчики-расходомеры можно организовать в сети, эксплуатируемой от одиночного удаленного центрального блока. Новые антиадезионные технологии позволяют повысить точность измерений и увеличить интервал между поверками. Низкое энергопотребление и высокая надежность позволяют использовать ультразвуковой расходомер в труднодоступных условиях без непосредственного управления в течение нескольких месяцев. Для сбора и передачи метрологических данных используются современные беспроводные технологии. Практически любое мобильное устройство может работать в качестве интерфейса для проверки компьютера, получая метрологические данные, как от эталона, так и от счетчика при калибровке по локальной сети WiFi. Кроме того, нашими приборами могут управлять неспециалисты, так как они практически полностью автоматизированы. Это может экономить время и финансовые ресурсы.

Библиографический список

1. **Богущ М.В.** Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. 335 с.
2. **Деревягин Г.А.** Исследование пьезодатчика мембранного типа // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 1(44). С. 159–161.
3. **Зулькарнаев В.Р.** Мировой рынок вихревых расходомеров. Текущее состояние рынка и позиции ОАО ИПФ «Сибнефтеавтоматика» // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010. № 2. С. 334–336.
4. **Золотаревский С.А., Гушин О.Г.** Организация учета природного газа. Основные принципы, методы и средства обеспечения метрологической надежности узлов коммерческого учета газа // Комплексный подход к учету газа. Новое метрологическое, коммуникационное оборудование и системы. Арзамас. 2012. С. 32–44.
5. **Руденко М.В., Никифоров Ю.В.** Проблемы стандартизации поверки счетчиков газа // Мир измерений. 2010. № 11 (117). С. 15–21.
6. Calibration of Ultrasonic Flow Meter on Wi-Fi Network Using a Web Browser / M. Velichko, O. Satler, L. Krasovskaya et al. // J. Advanced Research in Dynamical and Control Systems (Special Issue). 2018. Vol 8. P. 1593-1596.
7. Using Drone as WiFi Access Point During Infrared Thermography for Subsidiary Data Acquisition / M. Velichko, O. Satler, L. Krasovskaya et al. // J. Fundam. Appl. Sci. 2017. Vol 9. P. 1279-1288.

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЗДАНИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

канд. техн. наук **Выборнов Д.В.**

ассистент **Кляус Б.В.**

магистр **Плужник А.В.**

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

***Аннотация.** В статье проанализированы пути реализации энергосберегающих технологий в зданиях промышленного назначения. Рассмотрена проблема и возможность устранения теплопотерь через армопоясы наружных ограждающих конструкций. Рассмотрена технология использования энергосберегающих окон с электрохромным многослойным остеклением. Были рассмотрены различные системы отопления с целью выявления наиболее эффективной для промышленных зданий.*

Введение. С наступлением информационного века промышленные производства не сбавляют темп развития. Появляются новые отрасли промышленности, обслуживающие современные технологические потребности. Структура производства становится все более сложной и разносторонней.

Вопреки тому, что сама по себе промышленность состоит из массы отраслей, которые затрагивают все возможные нужды, конкретно предприятия подразделяются всего на две разновидности по направленности деятельности.

Добывающие предприятия составляют основу всего, что в мире производится. Занимаются такие предприятия добычей ресурсов.

Обрабатывающие предприятия — это предприятия, куда ресурсы попадают после их добычи. К данному типу относятся предприятия, производящие химическую и нефтехимическую продукцию, обработку металлов. Заводы, конструирующие технику, собирающие машины, установки и станки. Сфера производства материалов для строительства, деревообработка, производство бумаги и целлюлозы. Все предприятия легкой и пищевой промышленности также относятся к обрабатывающим, как и те, что занимаются ремонтом оборудования и составляющих все того же промышленного механизма [1].

Важным условием повышения эффективности, да и в целом соблюдения нормального рабочего режима производства на предприятиях, является создание комфортных условий в рабочих зонах персонала. Если территории добывающих предприятий зачастую находятся под открытым небом и в свою очередь условия комфортности поддерживаются снаряжением, защищающим как от рабочих процессов добычи ресурсов, так и от влияния атмосферных осадков, то обрабатывающие предприятия представляют собой закрытые производственные здания, исключая воздействие внешних метеорологических условий на рабочий процесс, ввиду этого последним необходимо уделять должное внимание для создания требуемого микроклимата в помещениях.

Как показывает европейский опыт [2], использование энергосберегающих технологии позволяют:

- на 20% сократить влияние парниковых газов путем снижения их выбросов в окружающую среду;
- увеличение долю потребления энергии путем её производства из возобновляемых источников до 20%;
- на 20% увеличить показатели энергоэффективности объектов.

Цель. Целью данной статьи является анализ потенциала энергосбережения в зданиях производственного назначения путем использования технологий, обеспечивающих требуемые условия комфорта для рабочего персонала.

Содержательная часть. Множество факторов влияет на энергосбережение в промышленном здании, а именно: теплотери через наружные ограждающие конструкции, тепло- и влагоизбытки, правильный выбор отопительного и вентиляционного оборудования.

В работе [3] при помощи симуляции распределения плотности теплового потока через толщу ограждающей конструкции в программе «Heat 2», было изучено влияние наличия арматурных поясов с разным материалом стержней на величину плотности теплового потока. Это позволило оценить увеличение средней теплопроводности армопояса за счет наличия теплопроводных включений, т.е. данная конструкция представляет своего рода «мостик холода», что неблагоприятно влияет на термическое сопротивление всей ограждающей конструкции и может привести к увеличению тепло- и влагопереноса через конструкцию стены.

Авторы пришли к выводу, что с теплотехнической точки зрения, использование арматуры из стекловолокна и других композитных материалов приводит к снижению теплового потока на 23%, что суще-

ственным образом отразится на теплотехнической характеристике здания, улучшит термическое сопротивление стен, повысит температуру на внутренней поверхности участков ограждающих конструкций в месте прокладки армопоясов.

В тоже время, в работе [4] в качестве энергосберегающей технологии было рассмотрено использование электрохромных многослойных стекол или, так называемых, интеллектуальных окон (рис. 1). 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.

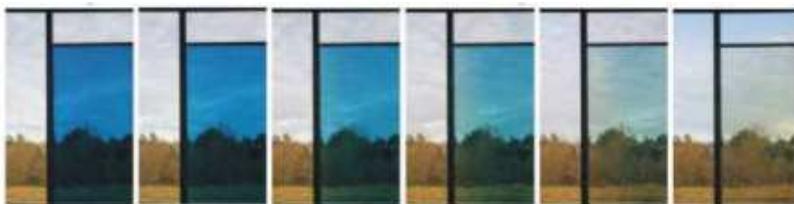


Рис. 1. Режимы электрохромного многослойного стекла

Как отмечает [5] в многоэтажных промышленных зданиях окна следует доводить до перекрытия и делать на всю ширину между несущими колоннами, что представляет собой значительную часть фасада здания, свыше 60%. Рассмотренные ранее интеллектуальные окна позволят в значительной мере снизить затраты энергии на охлаждение, тепловые нагрузки, а также электропотребление.

Отопление поддерживает в помещении на определенном уровне температуру воздуха и внутренних поверхностей ограждающих конструкций. В помещении обеспечивается тепловой комфорт — оптимальная температурная обстановка, благоприятная для деятельности людей в холодное время года.

Для создания и поддержания теплового комфорта в помещениях зданий требуются технически совершенные отопительные установки. И чем суровее климат местности и выше требования к обеспечению благоприятных условий в здании, тем более мощным и надежным должно быть отопление.

При действии системы отопления тепло передается от теплового источника в помещение. В помещении, как пространстве с неоднородным полем температуры, возникает теплообмен между отопительными приборами, внутренними и наружными ограждениями и людьми. При этом должна быть создана тепловая обстановка, благоприятная для хорошего самочувствия и продуктивной деятельности людей [6].

Вследствие того, что производственные помещения крупных промышленных отраслей обладают большими объемами, традиционная водяная система отопления является малоэффективной, а оборудование помещений необходимым количеством отопительных приборов с экономической точки зрения нецелесообразным. Естественное перемешивание холодного воздуха с нагретым отопительными приборами не позволяет в полном объеме прогреть воздух и обеспечить тепловой комфорт в помещении.

Более эффективной системой отопления производственных помещений по сравнению с водяной является паровая. В системах парового отопления используется свойство пара выделять скрытую теплоту при фазовом превращении. При конденсации в нагревательном приборе 1 кг пара помещение получает около 2260 кДж теплоты.

По сравнению с системами водяного отопления системы парового отопления имеют следующие преимущества [6]:

- благодаря малой плотности пар перемещается с большими скоростями, вследствие чего требуются меньшие диаметры теплопроводов, чем при водяном отоплении, поэтому стоимость теплопроводов в системах парового отопления ниже, чем в системах водяного отопления;

- больший коэффициент теплоотдачи от пара к стенкам отопительного прибора, благодаря этому и высокой температуре пара площадь поверхности отопительных приборов в системах парового отопления приблизительно на 25...30% меньше, чем и системах водяного отопления;

- быстрый прогрев помещений и выключение системы из работы;
- возможность использования систем отопления в зданиях повышенной этажности вследствие малой плотности пара.

Однако наряду со всеми перечисленными достоинствами, паровые системы отопления имеют ряд существенных недостатков [6]:

- невозможность качественного регулирования параметров теплоносителя, т.е. невозможность регулирования теплоотдачи отопительных приборов путем изменения температуры теплоносителя;

– постоянно высокая температура поверхности теплопроводов и отопительных приборов, что накладывает ограничения при использовании данных систем в запыленных помещениях, а также в зонах доступа людей к паропроводам;

– шум эксплуатирующихся систем, особенно при возобновлении работы после перерыва;

– сокращение срока службы паропроводов.

Как видно из перечисленных достоинств и недостатков, паровая система отопления накладывает значительные ограничения при её использовании, на сегодняшний момент существуют более эффективные системы отопления с более тонкими настройками.

Как отмечалось ранее, прогрев больших объемов воздуха помещений традиционными системами водяного и парового отопления является весьма малоэффективным и дорогостоящим. Альтернативой традиционным системам является инфракрасное отопление. Главное преимущество этого способа отопления заключается в прямой передаче тепла всем физическим предметам, находящимся в зоне действия инфракрасных нагревателей. При прямой передаче тепла от этих нагревателей в рабочую зону отапливаемого помещения с помощью электромагнитных волн отсутствует промежуточный теплоноситель. При этом затраты энергии для достижения необходимого баланса тепла минимальны.

Многими ведущими мировыми компаниями для отопления помещений различного назначения выпускается значительное количество типов, конструкций и моделей инфракрасных нагревателей. В настоящее время на мировом рынке представлены инфракрасные нагреватели, использующие в качестве энергоносителя: электричество, газ, горячую воду, пар и дизельное топливо. Учитывая дефицит и дороговизну энергоносителей (особенно природного газа), в настоящее время для целей отопления многих помещений нередко отдается предпочтение наиболее энергоэффективным нагревателям, в частности, электрическим. Их используют для отопления заводских корпусов, промышленных цехов, складских помещений и т.д. [7].

При оценке экономичности системы отопления, кроме энергозатрат, также имеет большое значение инерционность системы, то есть время достижения необходимой температуры. При условии применения инфракрасных нагревателей время нагрева минимально, так как отсутствуют затраты на прогрев промежуточного теплоносителя — воздуха, что в итоге приводит к значительному энергосбережению во

времени. В районах с централизованным теплоснабжением переход на отопление лучистой энергией позволяет достичь значительной экономии за счет того, что оплата производится только за действительно потребленную энергию.

При применении систем инфракрасного отопления полностью исключаются такие процессы как сооружение котельных, установка тепловых сетей, их ремонт, обслуживание, затраты на эксплуатацию, сокращается штат обслуживающего и аварийного персонала, запасы материалов и оборудования, освобождаются значительные площади, исчезает опасность размораживания системы в аварийной ситуации. Системы автоматического регулирования, которыми комплектуются инфракрасные нагреватели, полностью контролируют процесс обогрева помещений как по температуре, так и во времени. Системы регулирования можно подключить к центральному компьютеру с возможностью полного мониторинга энергетического хозяйства предприятия в целом [8].

Как отмечают авторы [9] главным условием возможности использования инфракрасных обогревателей для отопления является второе условие комфортности, ограничивающее интенсивность теплообмена при положении человека около нагретых и охлажденных поверхностей. На рис. 2 изображена зависимость допустимой температуры излучающей поверхности. Использование низкотемпературных лучистых отопительных панелей позволяет добиться выполнения второго условия комфортности, т. к. температура поверхности большинства электрических отопительных приборов не превышает 100 °С.

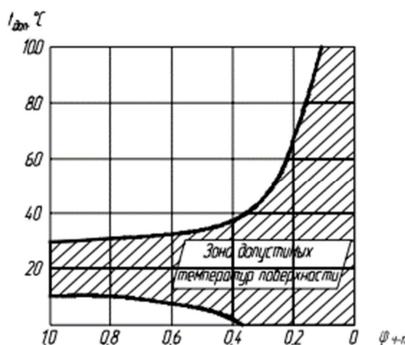


Рис. 2. Зона допустимых температур поверхности отопительного прибора из условий выполнения второго условия комфортности

Использование низкотемпературных электрических систем лучистого отопления позволяет добиться оптимальных параметров микроклимата при выполнении второго условия комфортности, ограничивающего применение инфракрасных приборов [9].

В инфракрасном отоплении используют наиболее безопасные для человеческого здоровья диапазоны волн, при минимальной величине мощности самого излучения. Однако следует постоянно следить за соблюдением основных правил использования оборудования, а также правильным его размещением, потому как в результате нарушений могут проявиться следующие отрицательные последствия [10]:

- перегрев, при наличии обогревателя в разы превышающего необходимую для данного помещения мощность;

- пересушивание кожи, когда положение человека не меняется длительное время, а обогреватель с установками высокого температурного режима воздействует только на одну сторону человеческого тела;

- часто вред инфракрасного отопления проявляется тогда, когда потолочный вариант излучателя устанавливается над головой человека, в данном случае воздействие обогревателя может вызывать сильные головные боли;

- излишняя мощность излучения может вызвать поражение клеток человеческого организма.

В случае, как и при паровом отоплении, система инфракрасного отопления накладывает ограничение на использование в помещениях со сосредоточением взрывоопасных веществ и пыли.

Исходя из приведенного выше анализа, самым эффективным решением энергосберегающим решением в промышленном здании является использование системы воздушного отопления, совмещённой с приточной вентиляцией.

Воздушное отопление является наиболее экономичным вариантом системы отопления, как по капитальным, так и по эксплуатационным расходам. Нет необходимости отдельно делать несколько различных инженерных систем, снижается общая металлоёмкость всей системы отопления, вентиляции и кондиционирования. Данный вариант применим не только для промышленных объектов, но также для жилых и общественных зданий [11].

Воздушное отопление по работе с наружным и внутренним рециркулируемым воздухом может быть [11]:

– с использованием только рециркулируемого воздуха (в данном случае реализуется только система воздушного отопления; такой вариант применим, когда объём вентиляции мал и используется естественная вентиляция, как правило, это большие промышленные объекты);

– с использованием только приточного воздуха (в этом случае приточная установка работает либо только в режиме вентиляции, либо при подаче подогретого воздуха в помещение совместно с воздушным отоплением);

– с использованием рециркулируемого и приточного воздуха (в этом случае целесообразно совместить систему воздушного отопления с вентиляцией и кондиционированием).

Главным достоинством системы воздушного отопления, совмещенного с вентиляцией по отношению к ранее рассмотренным системам, является то, что, помимо поддержания температурного режима в помещении, появляется возможность поддержания на необходимом уровне показателя относительной влажности, что в свою очередь благоприятно отразится на самочувствии человека.

При проектировании системы воздушного отопления в рабочей зоне должны быть обеспечены условия, отвечающие требованиям СП 2.2.1.1312-03 «Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий».

Выводы по работе

1. Энергосберегающим технологиям в промышленных зданиях необходимо уделять должное внимание, в первую очередь путем уменьшения потерь тепла через наружные ограждающие конструкции. Одним из таких путей является использование арматуры из стекловолокна и других композитных материалов, которые приводят к снижению теплового потока на величину порядка 23%.

2. Использование электрохромных многослойных стекол или, так называемых, интеллектуальных окон. 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.

3. Правильный выбор системы отопления позволяет максимально эффективно использовать её в условиях промышленного здания. Исходя из всех рассмотренных систем наиболее эффективной является система воздушного отопления, совмещенная с вентиляцией. Воздуш-

ное отопление является наиболее экономичным вариантом системы отопления, как по капитальным, так и по эксплуатационным расходам. Нет необходимости отдельно делать несколько различных инженерных систем, снижается общая металлоёмкость всей системы отопления, вентиляции и кондиционирования.

Библиографический список

1. **Велихов Е.П., Бетелин В.Б., Кушниренко А.Г.** Промышленность, инновации, образование и наука в России. М.: Наука, 2010. 141 с.
2. The integrity and implementation of the EU ETS: Special report. EN 2015, No 06 [Электронный ресурс]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. 72 p. URL: https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR15_06/SR15_06_EN.pdf
3. **Выборнов Д.В., Негода И.Н.** Влияние материала арматуры на плотность теплового потока в бетонных конструкциях // Энергетические, управляющие и информационные системы. Белгород, 2016. С. 321–324.
4. **Плужник А.В., Выборнов Д.В.** Тепловой контроль как вид мониторинга объектов ТГВ // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2007. № 5 (127). С. 50–54.
5. **Нойферт Э.** Строительное проектирование. М.: Стройиздат, 1991. 392 с.
6. **Каменев П.Н.** Отопление и вентиляция. 1 часть. М.: Стройиздат, 1975. 481 с.
7. **Болотских Н.Н.** Инфракрасное отопление помещений с помощью электрических панельных нагревателей // Науковий вісник будівництва: вип. 60. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. С. 101–115.
8. **Кузьмишкин А.А., Игнатьева Е.А., Забиров А.И.** Энергосбережение в строительстве: инфракрасное отопление // Молодой ученый. 2014. № 3. С. 314–315.
9. **Щацков А.О., Вакулович В.Л., Лыхач А.В.** Теоретические аспекты использования низкотемпературных систем лучистого отопления в жилых зданиях // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2017. № 5(127). С. 99–103.
10. Экономичное отопление обогревателями «Билюкс» [Сайт]. URL: <http://bilux.ua> (Дата обращения 20.10.2018).
11. **Лосев Д.П.** Воздушное отопление [Электронный ресурс] // С.О.К. Сантехника Отопление Кондиционирование. 2010. № 8ю URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/vozdushnoe-otoplenie> (Дата обращения 20.10.2018).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ DEA МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЕКТОВ

канд. техн. наук, доц. **Деревянов М.Ю.**¹
д-р техн. наук, проф. **Плешивцева Ю.Э.**¹
инженер **Кордюкова Л.С.**²
инженер **Рапопорт А.В.**³

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара

² ООО «ВакууммашЭлектро», г. Ижевск

³ ООО «ЕвроГаз», г. Москва

***Аннотация.** В статье рассматривается предлагаемая авторами методика многокритериальной оценки эффективности энергосберегающих проектов на промышленных предприятиях, разработанная на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA). Объектом исследования является завод, производящий ячеистый автоклавный газобетон. Для оценки эффективности выбраны девять типовых критериев эффективности и разработаны двенадцать DEA моделей, которые характеризуют технологические, экологические, экономические и обобщенные оценки анализируемых энергосберегающих проектов. Представленный подход имеет потенциал широкого применения на практике для принятия эффективных управленческих решений по формированию инвестиционных программ для промышленных предприятий.*

1. Введение. Современное состояние промышленного производства напрямую связано с эффективностью использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Внедрение энергосберегающих проектов позволяет промышленным предприятиям снижать потребление ТЭР, уменьшая тем самым величину себестоимости продукции, что позволяет предприятиям оставаться конкурентоспособными на рынке [1]. Однако, использование собственных или, тем более, заемных инвестиционных средств требует взвешенного подхода к выбору наиболее эффективных энергосберегающих проектов [2]. При этом следует учитывать не только экономическую составляющую, но и эффективность проектов по технологическим, экологическим, логистическим и другим критериям (показателям) [3].

Целью исследования является разработка процедуры многокритериальной оценки эффективности энергосберегающих проектов DEA

методом на примере промышленного предприятия по производству ячеистого автоклавного газобетона.

2. Описание объекта исследования. Для выявления потенциала энергосбережения и повышения энергетической эффективности было проведено энергетическое обследование завода по производству ячеистого автоклавного газобетона, по результатам которого предлагается 11 энергосберегающих проектов (табл. 1):

1) внедрение частотно-регулируемого привода электродвигателя насоса для подачи воды на технологию; 2) замена изоляции технологического паропровода; 3) внедрение системы энергоменеджмента по ГОСТ Р ИСО 50001-2012 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению.»; 4) замена горелочных устройств водогрейных котлов; 5) установка пластинчатого теплообменника на участке приготовления смеси; 6) реконструкция наружного освещения территории предприятия; 7) реконструкция внутреннего освещения главного цеха; 8) установка тепловой изоляции трубопровода системы отопления; 9) утепление фасада главного цеха; 10) утепление крыши главного цеха; 11) внедрение автоматической системы технического учета электрической энергии (АСТУЭ).

Перечисленные проекты позволяют экономить электрическую и тепловую энергию, а также природный газ. Однако, в условиях ограниченных инвестиций, не все проекты могут быть реализованы одновременно, вследствие чего возникает необходимость определения наиболее эффективных и малозатратных из них [4]. В табл. 1 приведены результаты технико-экономического расчета энергосберегающих проектов, а также представлены удельные показатели производства и прогнозируемая величина снижения выбросов CO_2 , которые могут являться критериями оценки эффективности энергосберегающих проектов [5]. В табл. 1 приняты следующие обозначения: I – инвестиции (тыс. руб.); C_{OP} – эксплуатационные расходы (тыс. руб.); DPP – дисконтированный срок окупаемости (месяцев); B – годовая экономия ТЭР в стоимостном выражении (тыс. руб.); NPV – чистая дисконтированная стоимость (тыс. руб.); ΔW – уменьшение энергоемкости оборудования (т у.т./м^3); ΔP – повышение экономичности работы, (тыс. руб./ м^3); $MTBF$ – среднее время наработки оборудования на отказ (часов); Em_{CO_2} – снижение выбросов CO_2 (т) [6].

3. Формулировка задачи многокритериальной оценки эффективности энергосберегающих проектов DEA методом. Для оценки эффективности энергосберегающий проект, рассматриваемый в каче-

стве DMU (англ. Decision Making Unit – единица принятия решения [7]), представляется в виде многомерной модели. Оценка эффективности проводится с помощью взвешенного соотношения между выходами и входами.

Таблица 1

Характеристики энергосберегающих проектов

№ пр.	I , (тыс.руб.)	C_{op} , (тыс.руб.)	DPP , (месяцев)	B , (тыс.руб.)	NPV , (тыс.руб.)	ΔW , (т у.т./М ³)	ΔP , (тыс.руб./М ³)	$MTBF$, (часов)	Em_{CO_2} , (т)
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
1	313.08	24.08	37	201.02	458.253	60.66	2801.4	9635	15.93
2	79.64	6.13	46	39.7	92.162	63.70	553.3	32604	7.33
3	1650	137.5	48	749.55	1,854.48	224.55	10445.8	47424	25.83
4	226.22	17.4	55	94.61	155.16	151.46	1318.5	10640	17.42
5	176.3	13.56	63	65.35	59.27	104.87	910.8	11742	12.06
6	258.46	17.23	41	147.75	360.99	44.60	2059.1	100000	11.71
7	1581.35	105.42	71	533.85	635.82	161.12	7439.9	100000	42.3
8	114.64	8.81	48	54.34	120.51	87.20	757.3	96360	10.03
9	1713.6	122.36	104	454.63	412.03	653.61	6335.9	131400	52.26
10	1531.87	109.42	78	483.14	727.03	775.23	6733.1	131400	66.25
11	2278	189.833	45	1148.16	2534.96	346.94	16001	105120	90.9

Входные величины $X_j, j = 1, 2, \dots, m$ – это затраты ресурсов, действовавших в осуществлении производственно-технологического процесса, уменьшение которых приводит к повышению итогового показателя эффективности f , т.е.:

$$\frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_j} < 0, j = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

В качестве выходных величин $Y_i, i = 1, 2, \dots, k$ выбираются факторы, положительно влияющие на суммарную эффективность DMU. Эти величины могут быть разнородны и иметь различную размерность, однако, они должны быть измеряемы количественно, а их увеличение должно приводить к возрастанию суммарной эффективности f , т.е.:

$$\frac{\partial f(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)}{\partial Y_i} < 0, i = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

На основе выбора m входов и k выходов многомерного объекта и математического условия достижения максимальной эффективности f_z для z -го проекта (DMU), $z = 1, 2, \dots, N$ искомый показатель эффективности может быть записан следующим образом [8]:

$$f_z = \frac{\sum_{i=1}^k u_{iz} Y_{iz}}{\sum_{j=1}^m v_{jz} X_{jz}} \rightarrow \max_{u_{iz}, v_{jz} \in G}, \quad (3)$$

где u_{iz} , $i = 1, 2, \dots, k$ – весовые коэффициенты, которые характеризуют относительный вклад каждого из выходов Y_{iz} , $i = 1, 2, \dots, k$ в относительный коэффициент эффективности f_z , $z = 1, 2, \dots, N$; v_{jz} , $j = 1, 2, \dots, m$ – весовые коэффициенты, которые характеризуют относительный вклад каждого из входов X_{jz} , $j = 1, 2, \dots, m$ в относительный коэффициент эффективности f_z , $z = 1, 2, \dots, N$, N – общее количество оцениваемых объектов.

Для определения численных значений эффективности f_z , $z = 1, 2, \dots, N$ каждого z -го оцениваемого проекта (DMU), $z = 1, 2, \dots, N$ необходимо, чтобы комплексная эффективность находилась на интервале $[0;1]$, для чего накладываются следующие ограничения:

$$\frac{\sum_{i=1}^k u_{iz} Y_{iz}}{\sum_{j=1}^m v_{jz} X_{jz}} \leq 1, \quad z = 1, 2, \dots, N; \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad u_{iz} > 0; \quad v_{jz} > 0. \quad (4)$$

Решение z -ой задачи (3) в условиях ограничений (4) позволяет найти значение показателя комплексной эффективности f_z и соответствующий набор весовых коэффициентов $u_{iz} \in G, i = \overline{1, k}$ и $v_{jz} \in G, j = \overline{1, m}$, максимизирующих функционал (3). Поставленная задача относится к задачам математического программирования и решается стандартными оптимизационными методами (метод наименьших квадратов, метод сопряженных градиентов и т.п.).

4. Математические модели многокритериальной оценки энергосберегающих проектов. Для многокритериальной оценки эффективности $N=11$ энергосберегающих проектов на предприятии предлагается 12 моделей оценивания отдельно по экономическим, технологическим, экологическим показателям и их комбинациям (рис. 1-12). Численные значения входных $X_{jz}, j = \overline{1, 3}$ и выходных параметров $Y_{iz}, i = \overline{1, 6}, z = \overline{1, 11}$ представлены в табл. 1. Для всех моделей, представленных на рис. 1–12, может быть сформулирована задача математического программирования в форме (3)–(4).

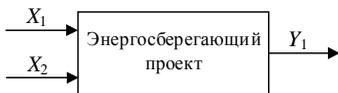


Рис. 1. Экономическая модель 1 (оценка изменения годовой денежной экономии)

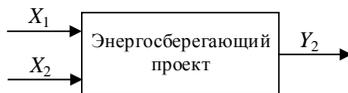


Рис. 2. Экономическая модель 2 (оценка изменения чистой дисконтированной стоимости)

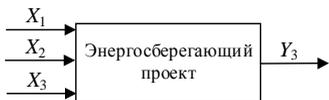


Рис. 3. Технологическая модель 3 (оценка снижения энергоемкости оборудования)



Рис. 4. Технологическая модель 4 (оценка повышения экономичности производства)



Рис. 5. Технологическая модель 5 (оценка повышения надежности)

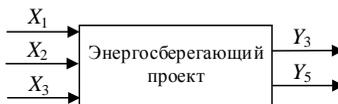


Рис. 6. Технологическая модель 6 (оценка снижения энергоемкости оборудования и повышения надежности)

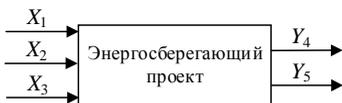


Рис. 7. Технологическая модель 7 (оценка повышения экономичности производства и надежности)

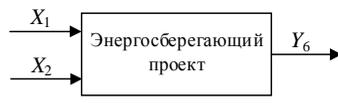


Рис. 8. Экологическая модель 8 (оценка снижения выбросов CO₂)

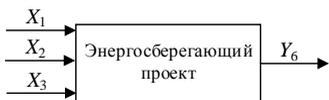


Рис. 9. Комплексная модель 9 (оценка снижения выбросов CO₂ с учетом дисконтированного срока окупаемости)

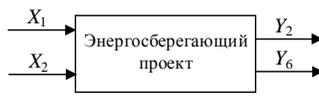


Рис. 10. Комплексная модель 10 (оценка экономико-экологической эффективности)

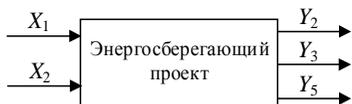


Рис. 11. Комплексная модель 11
(оценка экономико-
технологической эффективности)

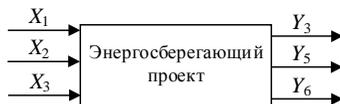


Рис. 12. Комплексная модель 12
(оценка эколого-технологической
эффективности)

5. Анализ результатов и выводы. Решения задач математического программирования в форме (3), (4) получены для каждого z -го энергосберегающего проекта, $z = \overline{1, 11}$, по каждой q -ой модели, $q = \overline{1, 12}$ и представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета эффективности энергосберегающих проектов
по выбранным моделям DEA методом

№ пр. (z)	DEA-оценка по выбранным моделям (f_{zq} , $z = \overline{1, 11}$, $q = \overline{1, 12}$)												Сумм. DEA-оценка $\sum f_{zq}$	Ранж.
	1 Рис.1	2 Рис.2	3 Рис.3	4 Рис.4	5 Рис.5	6 Рис.6	7 Рис.7	8 Рис.8	9 Рис.9	10 Рис.10	11 Рис.11	12 Рис.12		
1	1	1	0,344	1	0,107	0,345	1	0,553	0,914	1	1	0,914	9,18	5
2	0,776	0,791	1	0,776	0,487	1	0,896	0,952	1	1	1	1	10,68	1
3	0,708	0,768	0,471	0,878	0,405	0,513	0,878	1	0,378	0,768	0,769	0,513	8,05	8
4	0,651	0,469	1	0,651	0,088	1	0,660	0,336	1	0,838	0,838	1	8,53	7
5	0,577	0,230	0,816	0,577	0,091	0,816	0,592	0,568	0,816	0,744	0,744	0,816	7,39	9
6	1	1	0,316	1	1	1	1	0,170	0,777	1	1	1	10,26	4
7	0,591	0,288	0,228	0,742	0,577	0,605	0,762	0,357	0,674	0,370	0,314	0,710	6,22	11
8	0,739	0,718	1	0,739	1	1	1	0,507	1	0,952	1	1	10,66	2
9	0,439	0,168	0,744	0,521	0,518	0,745	0,547	0,434	0,681	0,357	0,514	0,745	6,41	10
10	0,522	0,332	1	0,641	0,691	1	0,698	0,838	1	0,507	0,682	1	8,91	6
11	0,785	0,760	0,776	1	0,958	1	1	0,744	1	0,765	0,765	1	10,55	3

Согласно данным, приведенным в табл. 2, приоритет при внедрении следует отдать энергосберегающим проектам, имеющим максимальное значение суммарной DEA-оценки $\sum f_{zq}$, $z = \overline{1, 11}$, $q = \overline{1, 12}$, которая определяется как сумма соответствующих оценок f_{zq} по всем 12 выбранным моделям для каждого z -го проекта. К ним относятся проекты № 2, 8, 11 и 6 (с 1 по 4 место при ранжировании), которые пока-

зали наибольшее значение относительной эффективности в большинстве моделей. Неэффективными оказались проекты № 7, 9, 5 (с 9 по 11 место). Ни для одной из моделей эти проекты не показали максимального значения относительной эффективности. Их следует исключить из инвестиционной программы предприятия. Остальные проекты № 1, 3, 4, 10 (с 5 по 8 место) подходят для инвестирования только в случае выделения дополнительных средств, требуют доработки в части технической реализации и использования более качественных материалов.

Данный подход позволяет оценить эффективность каждого энергосберегающего проекта, предлагаемого к внедрению на предприятии, по экономическим, технологическим и экологическим критериям. Разработанная процедура многокритериальной оценки эффективности энергосберегающих проектов DEA методом имеет потенциальные возможности широкого использования на практике для выработки эффективных управленческих решений по формированию инвестиционных программ на промышленных предприятиях.

Библиографический список

1. Key pillars of successful energy saving projects in small and medium industrial enterprises / V. Máša, P. Stehlík, M. Touš, M. Vondra // *Energy*. 2018. № 158. С. 293–304.
2. **Borisova N., Borisov A., Dushko O.** Modern problems of energy efficiency programs implementation at the enterprises of mechanical engineering // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Выпуск 129. № 01040.
3. **Trubaev, P.A., Tarasyuk, P.N.** Evaluation of energy-saving projects for generation of heat and heat supply by prime cost forecasting method // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2017. № 7 (5). С. 201–208.
4. **Abeelen, C., Harmsen, R., Worrell, E.** Counting project savings – an alternative way to monitor the results of a voluntary agreement on industrial energy savings // *Energy Efficiency*. 2016. № 9 (1). С. 153–169.
5. **Видунова, А.С., Астафьева О.Е.** Система ключевых показателей эффективности предприятия в области энергосбережения // *Экология и промышленность России*. 2012. № 6. С. 46–49.
6. **Водяников В.Т.** Экономические основы энергосбережения // *Вестник ФГОУ ВПО МГАУ*. 2010. № 5. С. 69–73.
7. **Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.** Measuring the efficiency of decision-making units // *European Journal of Operation Research*. 1978. Vol. 2, No 6. P. 429–444.
8. Сравнительная оценка ресурсной ценности объектов хранения нефте-содержащих отходов на основе DEA метода / Ю.Э. Плешивцева, М.Ю. Деревянов, Д.В. Каширских и др. // *Нефтяное хозяйство*. 2018. № 8. С. 104–109.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АЭС С РЕАКТОРАМИ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ ПУТЕМ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

студент **Костарев В.С.**

канд. техн. наук, доц. **Ташлыков О.Л.**

ст. преп. **Климова В.А.**

Уральский Федеральный Университет

им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, г. Екатеринбург

***Аннотация.** Важной задачей для экономики является повышение эффективности использования первичного топлива. Для АЭС с реакторами ВВЭР на сегодняшний день термический к.п.д. составляет около 33%, с реакторами на быстрых нейтронах – более 40%. Это означает, что большая часть произведенной тепловой энергии выбрасывается в атмосферу. В данной работе рассмотрены пути решения задачи повышения энергоэффективности на примере АЭС с реакторами на быстрых нейтронах за счет утилизации низкопотенциальной сбросной теплоты. Проведено обобщение результатов практической реализации утилизации низкопотенциальной тепловой энергии тепловых и атомных электростанций с использованием тепловых насосов. Выполнен анализ эффективности утилизации сбросной теплоты от различных систем АЭС.*

На сегодняшний день атомные и тепловые электрические станции составляют большую часть энергетической системы России (около 67%). Поэтому при эксплуатации ТЭС и АЭС необходимо учитывать фактор теплового загрязнения окружающей среды, который приводит к значительным последствиям для экологии, причем как в локальном, так и в глобальном масштабе. Снижение тепловых сбросов является актуальной задачей, стоящей перед тепловой и атомной энергетикой.

Одним из возможных способов уменьшения тепловых сбросов атомными электростанциями является применение теплового насоса в схеме паротурбинной установки, что способствует уменьшению нагрузки на окружающую среду за счет снижения тепловых выбросов путем утилизации сбросной теплоты.

Тепловой насос является термодинамической установкой, в которой теплота от низкопотенциального источника передается потребителю при более высокой температуре. При этом совершается механиче-

ская работа. В качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии могут выступать тепло технологических процессов и промышленные сбросы. Низкопотенциальную теплоту при помощи тепловых насосов можно трансформировать путем увеличения температуры среды до значения, достаточного для полезного использования. Такую теплоту можно направлять на отопление внутренних и внешних потребителей.

В качестве примера применения тепловых насосов на АЭС можно привести один из рассматриваемых в настоящее время вариантов теплоснабжения от АЭС населенных пунктов, находящихся на значительном расстоянии. Проект теплоснабжения Санкт-Петербурга от Ленинградской АЭС с использованием адсорбционных тепловых насосов позволяет существенно понизить температуру и давление энергоносителя при транспортировке с доведением их до требуемых (по условиям потребителя) вблизи мест потребления теплоты. Авторами этого проекта было заявлено, что при использовании тепловых насосов только для целей теплоснабжения, выручка блока АЭС мощностью 1,2 ГВт, возрастает с 6 млрд. руб./год до 12-12 млрд. руб./год при отпускаемом количестве тепла 16,2 млн. МВт·ч/год в зависимости от его стоимости в регионе [3]. Также в перспективе данного проекта предполагается выращивание микроводорослей (биореакторы) с крупномасштабной выработкой различных биопродуктов, в т. ч. и биотоплива при помощи утилизации низкопотенциальной теплоты [4].

Рассмотрим возможности применения тепловых насосов на АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. На сегодняшний день термический к.п.д. составляет 39,4% для БН-800 и 42,6% для БН-600, оставшаяся теплота (около 60%) безвозвратно теряется в системе охлаждения конденсатора паровой турбины, т. е. сбрасывается в окружающую среду.

В УрФУ на протяжении ряда лет ведутся работы по исследованию путей повышения энергоэффективности АЭС, в том числе с реакторами на быстрых нейтронах. В частности, в работах [5–8] проведены результаты анализа возможности использования тепловых насосов и возможности утилизации низкопотенциальной теплоты для энергоблока с реактором БН-600. По итогам этих работ сделан вывод, что хотя применение тепловых насосов в схеме охлаждения основного конденсатора с целью улучшения экономических показателей работы станции на сегодняшний день не оправдано экономически, его использование позволяет сократить тепловые сбросы АЭС. Для энергоблока с реактором БН-600 сокращение теплового загрязнения составило от 5 до 6%, в

зависимости от времени года и режима работы теплового насоса (рис. 1) [5]. Наивысшие показатели были достигнуты в летний период: в июле абсолютное уменьшение тепловых сбросов составило 64 500 кВт и 69 500 кВт при подключении теплового насоса перед конденсатором и после конденсатора соответственно.

Также был предложен вариант установки тепловых насосов в систему приготовления подпиточной воды для теплосетей г. Заречный [5]. Было рассчитано, что в случае установки 3 тепловых насосов по 300 кВт (по 1 на петлю), чистая прибыль составит 2 845 888 руб/год, при сроке окупаемости 4,7 года.

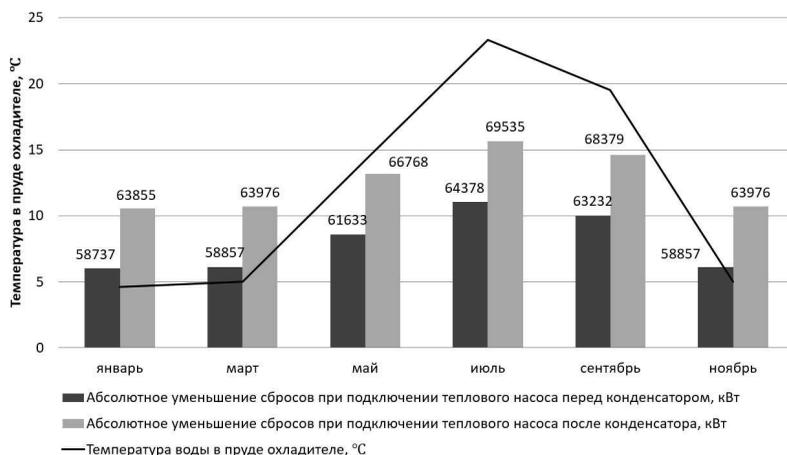


Рис. 1. Абсолютное уменьшение тепловых сбросов энергоблока с реактором БН-600

Целью данной работы является исследование возможности повышения энергоэффективности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах за счет утилизации низкопотенциальной теплоты, сбрасываемой вспомогательными системами.

В качестве возможного источника низкопотенциального тепла был рассмотрен четвертый энергоблок Белоярской АЭС с реактором БН-800.

Дополнительная теплота, полученная при помощи тепловых насосов, может использоваться на:

– отопление производственных и административно-бытовых зданий АЭС;

– подогрев воды, используемой для системы отопления и горячего водоснабжения г. Заречный.

Потребляемая производственными и административно-бытовыми зданиями АЭС тепловая мощность может достигать нескольких мегаватт. Потребители теплоты на энергоблоке с реакторами на быстрых нейтронах приведены на рис. 2.

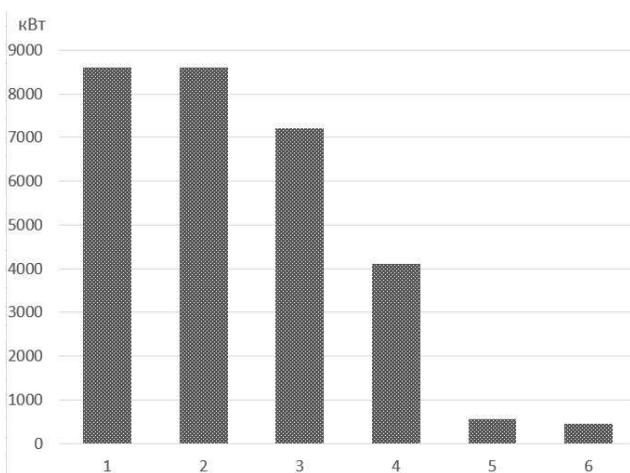


Рис. 2. Потребители теплоты на Белоярской АЭС: 1 – приточная вентиляция, воздушные отопительные системы и т.д. (машинный зал), 2 – приточная вентиляция (пом. А), 3 – приточная вентиляция (пом. Б), 4 – приточная вентиляция (пом. В), 5 – воздушные занавесы (ж/д коридор), 6 – прочие потребители. Обозначения помещений условные

В настоящее время теплота для этих потребителей берется из отборов рабочего пара турбины, что экономически невыгодно, в то время как утилизация сбросной теплоты с использованием тепловых насосов может позволить повысить энергоэффективность станции и уменьшить тепловое загрязнение среды.

Источниками низкопотенциальной теплоты на энергоблоке БН-800 являются вспомогательные системы, охлаждаемые промежуточным контуром. В табл. 1 приведены данные по возможным источни-

кам низкопотенциальной теплоты. Замеры параметров проводились при работе энергоблока на номинальной мощности, с помощью приборов по месту расположения оборудования, ИВС, термощупа ТХ-5.11. Также были использованы данные проектных материалов и [9].

Таблица 1

Расходы охлаждающей воды и температурные характеристики некоторых потребителей системы промконтура

Наименование потребителя	Температура вх./вых. промконтура, °С	Кол-во рабочих/резервных	Расход охлаждающей воды, м ³ /ч
Охладитель выпара расширителя дренажей	16,5/17,2	1	140
Воздухоохладители возбуждителя	16,5/19,1	4	150 (4x37,5)
Охладители обмотки статора генератора	16,5/37,9	1/1	600
Охлаждение основных питательных насосов ПЭН	17,1/18,1	3/1	262,4 (4x65,6)
Охлаждение предвключенных питательных насосов ПЭН	17,4/18,3	3/1	105,6 (4x26,4)
Охладитель грязного конденсата	16,5/26,5	1	400

Расчеты по определению тепловых сбросов производились по формуле:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}})$$

где G — расход технической воды, c_p — удельная теплоемкость воды, $t_{\text{вых}}$ и $t_{\text{вх}}$ — температуры на входе и на выходе источника соответственно.

Результаты расчетов приведены на рис. 3. В результате исследований было установлено, что наиболее эффективным возможным источником тепла является система охлаждения обмотки статора генератора (тепловая мощность 14 905,1 кВт при перепаде температур на входе и на выходе 21,4°С).

Для повышения потенциала технической воды, отводящей теплоту от охладителей обмотки статора генератора, предлагается использовать тепловой насос, повышающий температуру до 50–55 °С, что является достаточным для отопления или горячего водоснабжения.

Как показывает опыт Германии, наиболее эффективно использование при отоплении задний с помощью тепловых насосов теплых по-

лов. Этот опыт может быть использован при проектировании зданий строящихся и проектируемых энергоблоков АЭС, в том числе БН-800.

Очевидно, что с точки зрения эффективности производства электрической и тепловой энергии использование тепловых насосов во вспомогательных системах будет оправдано. По предварительным расчетам при установке в тепловую схему энергоблока с реактором БН-800 одного теплового насоса мощностью 1,5 МВт, срок окупаемости составит около 4,8 лет.

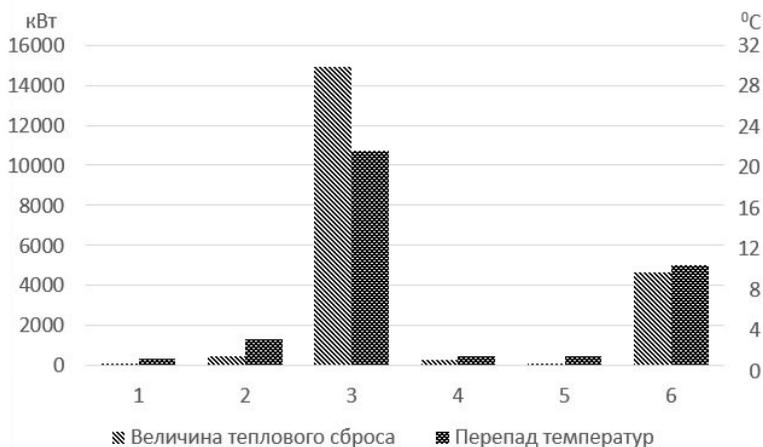


Рис. 3. Тепловые сбросы и перепады температур вспомогательных систем энергоблока БН-800: 1 – охладитель выпара расширителя дренажей, 2 – воздухоохладители возбудителя, 3 – охладители обмотки статора генератора, 4 – охлаждение основных питательных насосов ПЭН, 5 – охлаждение основных предвключенных насосов ПЭН, 6 – охладитель грязного конденсата

Таким образом, применение тепловых насосов для утилизации низкопотенциального тепла на энергоблоке БН-800 будет иметь следующие положительные моменты:

- уменьшение отбора пара из тепловой схемы блока, что приведет к дополнительной выработке энергии при неизменных затратах на производство;

- уменьшение тепловых выбросов в окружающую среду.

В настоящее время ведется работа по расчетному обоснованию экономической эффективности утилизации сбросной теплоты вспомо-

гательных систем энергоблока АЭС с реактором на быстрых нейтронах БН-800 и проектируемого блока с реактором БН-1200.

Библиографический список

1. Пат. 81259 Рос. Федерация, МПК F01K13/00. Тепловая электрическая станция / Н.Н. Ефимов, И.А. Лапин, П.А. Малышев и др. № 2007119246/22; заявл. 23.05.2007; опубл. 10.03.2009.

2. Пат. 2247840 Рос. Федерация, МПК F01K13/00. Способ работы тепловой электрической станции / В.А. Стенин. № 2003101028/06; заявл. 14.01.2003; опубл. 10.03.2005.

3. Использование сбросного тепла АЭС для регионального теплоснабжения и производства биопродукции: Доклад на заседании Общественного Совета Госкорпорации Росатом, 06 августа 2013 [Электронный ресурс] / А.И. Савицкий, С.Б. Пустовалов, С.В. Егоров и др. URL: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/zasedania_2013/Doklad_Vasilev_2013.pdf.

4. Сбросное тепло АЭС — высокоэффективный экологически безупречный энергоресурс для регионального теплоснабжения [Электронный ресурс]. URL: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/VII_forum_2012/Egorov.pdf

5. Семенов М.Ю., Ковин И.В., Ташлыков О.Л. Анализ возможности утилизации низкопотенциальной теплоты с использованием теплового насоса в паротурбинном контуре АЭС с реактором на быстрых нейтронах / Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сб. мат. Всерос. научно-практ. конф. и выставки студ., асп. и мол. ученых. Екатеринбург, 2010. С. 399–402

6. Семенов М.Ю., Ташлыков О.Л. Оценка использования тепловых насосов в схеме АЭС с целью снижения тепловых сбросов в окружающую среду / Энергетика настоящего и будущего: Сб. мат. I Евроазиатской выставки и конф. 16-18 февраля 2010 г. Часть 2. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. С. 28–30.

7. Ташлыков О.Л., Толмачев Е.М., Семенов М.Ю., Сапожников Б.Г. Снижение тепловых нагрузок АЭС на окружающую среду путем использования тепловых насосов в схеме основного конденсатора паротурбинной установки // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С.16–21.

8. Ташлыков О.Л., Ковин И.В., Кокорин В.В. Утилизация низкопотенциальной теплоты АЭС с реактором на быстрых нейтронах с использованием теплового насоса. // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С.22–25.

9. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяков и др; под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 548 с.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ

канд. техн. наук, проф. **Косухин М.М.**

зав. лабораторией **Косухин А.М.**

магистрант **Шаповалова А.С.**

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

***Аннотация.** Изложены некоторые технологические и эксплуатационные особенности выбора материалов и технологий их применения при устройстве штукатурных фасадных систем. Показано, что в реальном повышении энергетической эффективности ограждающих конструкций при проведении реконструкционных работ по их тепловой изоляции с применением штукатурных систем, определяющая роль отводится правильному, научно обоснованному выбору материалов и способам их применения. Такой выбор должен базироваться на результатах профессионального технического обследования ограждающих конструкций жилых зданий, построенных в разные времена в разных климатических условиях эксплуатации. Отмечено, что для выполнения наружной тепловой защиты зданий сегодня на строительном рынке существует большой ассортимент строительных материалов и систем. Поэтому возникает необходимость их правильного выбора. Представлены некоторые особенности выбора материалов и технологий, наиболее распространенных в строительной практике штукатурных систем для тепловой изоляции, базирующиеся на результатах практического опыта и многочисленных обследований технического состояния отремонтированных объектов.*

***Ключевые слова:** жилые здания, ограждающие конструкции, капитальный ремонт, энергоэффективность, тепловая изоляция, фасадные системы, штукатурные системы, фасадные штукатурки.*

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

Введение. 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 [1].

Для выполнения этих требований в настоящее время на строительном рынке существуют различные современные многослойные системы утепления фасадов [2]. Такие системы легко технологически реализуются при возведении новых жилых объектов с заранее запроектированными материалами и технологиями. Что же касается старых жилых домов, большая часть которых построена по старым теплотехническим нормам и не соответствует современным теплотехническим параметрам, то задачи приведения их к действующим стандартам значительно усложняются. Жилые дома, даже одноименных серий, но построенные в разные времена и в разных условиях эксплуатации имеют различную степень физического износа. Поэтому использование одних и тех же материалов и типовых технологий не всегда приносит желаемый результат. В этой связи, качественному выполнению ремонтных работ по устройству тепловой изоляции ранее построенных объектов должно предшествовать обязательное профессиональное техническое обследование в каждом индивидуальном случае. Только на основании результатов таких обследований можно правильно запроектировать материалы и технологию проведения работ с получением реального желаемого эффекта.

Основная часть. Реконструкция существующего жилищного фонда с целью повышения его энергоэффективности предусматривает, как правило, устройство наружных систем тепловой изоляции ограждающих конструкций [3], которые подразделяются на штукатурные и вентилируемые. Обе такие системы отличаются своими конструктивными особенностями, преимуществами и недостатками [2].

В данной работе отмечены некоторые технологические и эксплуатационные особенности выбора материалов и технологий их применения при устройстве штукатурных фасадов.

Используемые на сегодняшний день в строительной практике штукатурные системы, в зависимости от толщины штукатурного слоя и используемых при этом материалов, подразделяются на легкие и тяжелые и относятся к системам «мокрого типа». Применение таких систем при реконструкции старой застройки позволяет значительно снизить тепловые потери зданий через наружные ограждения, повысить внутреннюю комфортность помещений и обеспечить снижение энергетических затрат на отопление [4]. Главным преимуществом штукатурных систем по сравнению с другими является то, что их

можно применять в зданиях старой застройки, не изменяя при этом их архитектурной выразительности. А это очень важно для сохранения архитектурного ансамбля исторической застройки при проведении реконструкции городской застройки [5]. В связи с тем, что эксплуатационные свойства и долговечность таких систем определяются в основном используемыми материалами, то важным является их правильный выбор. В настоящее время для этих целей используются различные сухие строительные смеси.

Производителей сухих строительных смесей для скрепленных теплоизоляционных систем сегодня более чем достаточно, что делает подобные системы наиболее распространенными на рынке теплоизоляции фасадов. Самые известные производители предлагают комплексные системы, а не отдельные продукты. Качество их материалов отвечает самым высоким европейским стандартам.

В настоящее время строительный рынок представлен широким ассортиментом тонкослойных фасадных штукатурок. Наиболее популярные из них являются: минеральные, силикатные, силиконовые и акриловые.

1. Минеральная фасадная штукатурка – это самый распространенный вид штукатурки, изготавливается она из цементно-песчаного раствора, и в процессе работы достаточно проста, даже начинающий мастер может легко справиться с нанесением на стены этой декоративной штукатурки. Минеральная штукатурка паропроницаема, поэтому подходит для утепления фасада, как пенопластом, так и базальтовой ватой. Больше конечно используется для пенопласта (пенополистирола), т.к. этот материал дешевле ваты, и находится в одной ценовой категории с минеральной штукатуркой. К недостаткам можно отнести небольшой срок эксплуатации до ремонта – 10 лет. А также эта декоративная штукатурка неэластична, т.е. неустойчива к трещинам и микротрещинам, которые с течением времени могут появиться на фасаде. Еще один недостаток то, что в основном минеральная штукатурка продается в мешках в белом цвете или под покраску, и нет возможности заколеровать ее в массу. Возможные фактуры: короед, камешковая штукатурка.

2. Акриловая штукатурка. У этой фасадной штукатурки срок эксплуатации до ремонта составляет 15-25 лет. Это достаточно пластичная штукатурка, которая производится на основе акриловых смол (из подобного материала изготавливают клей ПВА), скрывает мелкие трещины на фасаде за счет того, что она может растянуться при небольших усадках, и это позволяет сохранить первоначальный вид фа-

сада на более длительный период. К недостаткам акриловых штукатурок можно отнести паронепроницаемость, соответственно производители не рекомендуют использовать ее с базальтовой ватой в системах утепления методом скрепленной изоляции. Акриловая фактурная штукатурка больше подходит для пенопласта (пенополистирола). А также она не любит пыль, которая притягивается и не смывается дождем, после долгих лет эксплуатации фасады теряют яркость цвета и поэтому ее не рекомендуют использовать возле пыльных дорог. Возможные фактуры: короед, камешковая штукатурка.

3. Силикатная штукатурка. Срок эксплуатации силикатной штукатурки до ремонта составляет 20-25 лет. Эта фактурная штукатурка паропроницаема поэтому ее зачастую используют при утеплении фасада методом скрепленной изоляции, где используется базальтовая вата (например Fasrock, Danova Fasad), и наоборот не рекомендуется при использовании пенопласта (пенополистирола), т.к. пенопласт «не дышит». Фасад с силикатной штукатуркой устойчив к трещинам за счет ее пластических свойств. Большой плюс силикатной штукатурки в том, что она антистатична, отталкивает пыль и хорошо моется, что позволяет сохранять ее внешний вид длительное время. Возможные фактуры: короед, камешковая штукатурка.

4. Силиконовая штукатурка. Основной показатель – срок эксплуатации силиконовой штукатурки до ремонта составляет 20-25 лет. Это на данный момент самая технологично «продвинутая» фасадная штукатурка. Она еще более эластична и паропроницаема, обладает длительным сроком эксплуатации, высокими показателями растяжения. Эта фактурная штукатурка антистатична и легко моется, поэтому ее можно использовать рядом с пыльными дорогами. В связи с тем, что силиконовая штукатурка разрабатывалась для прибалтийских регионов, необходимо отметить, что основной отличительной ее особенностью является то, что она не впитывает солей и не образует высолов на поверхности. Возможные фактуры: короед, камешковая штукатурка.

Важнейшей составляющей фасадных штукатурок является связующее, определяющее свойства готового покрытия. Необходимо учитывать, что связующее должно соответствовать обрабатываемой поверхности по физическим и химическим параметрам. Основной характеристикой фасадных штукатурок является паропроницаемость. Среди перечисленных выше видов, хорошую паропроницаемость имеют минеральные, силиконовые и силикатные штукатурки. У акриловых смесей паропроницаемость практически отсутствует, что обуславливает их использование для

покрытия фасадов с пенополистирольным утеплением. Так как фасады с минераловатным утеплением являются паропроницаемыми, то их отделывают штукатурками, обеспечивающими диффузию водяного пара. Покрытие же их смесями на основе акриловых смол нивелирует всю пользу от паропроницаемых материалов и может создать много проблем в эксплуатации такого фасада. Одним из немаловажных аспектов фасадной штукатурки является ее внешний вид. На него практически не влияют ни тип связующего, ни его характеристики. Обычно с первого взгляда даже специалисту сложно определить вид штукатурки, использованной при отделке того или иного фасада. Длительные сроки эксплуатации и устойчивость к различным климатическим воздействиям самой штукатурки и определяют в конечном итоге внешний вид фасада. На долговечность штукатурки в известной степени влияет ее фактура и цвет.

Стойкость штукатурок. Долгая сохранность оштукатуренной поверхности в первоначальном виде определена стойкостью штукатурки к механическим повреждениям и изменению климатических условий. Покрытия, устойчивого к обоим этим факторам не существует. Ультрафиолетовое излучение практически не разрушает минеральные и силиконовые штукатурки, акриловые же весьма подвержены его деструктивному влиянию. Однако, акриловые и силиконовые штукатурки намного более устойчивы к механическим повреждениям, нежели силикатные и минеральные. Воздействию низких температур более всего подвержены силиконовые и акриловые смеси, менее всего – минеральные. Силиконовые штукатурки имеют самые высокие грязеотталкивающие свойства, акриловые – самые низкие. Это обусловлено в большей степени природой связующего вещества. Из-за вязкой структуры акриловых смол, являющихся основой акриловой штукатурки, ее поверхность обладает повышенной адгезией к грязи, которая со временем становится ее частью.

На стойкость оштукатуренных поверхностей существенное влияние оказывает биологическая коррозия, для предотвращения которой штукатурные составы должны содержать фунгицидные и биоцидные вещества [6]. Их отсутствие приводит к появлению через некоторое время на поверхности фасада буро-зеленых пятен. Но изменение цвета – не самый большой вред от присутствия микроорганизмов, плесени и грибка. Главное, что они медленно, но планомерно разрушают структуру самого покрытия.

Существенное влияние на долговечность штукатурки оказывает фактура ее поверхности. Дело в том, что чем поверхность более глад-

кая, тем быстрее она трескается и тем более видны на ней появляющиеся трещины. Шероховатые поверхности легче переносят напряжение, реже трескаются, поэтому специалисты советуют не использовать гладкие покрытия при декорировании фасадов зданий. Наиболее часто используют так называемые «барашек» и «короед». Фактура «барашек» может создаваться метлой, ветошью, полутерком или специальным валиком. «Короед» – это фактура, напоминающая изъеденную насекомыми поверхность. Для ее формирования используют штукатурки с добавлением мелкого камня, который при затирке создает бороздки. Направление этих бороздок определяется направлением движения полутерка. Разновидностью такой фактуры является «царапанная» штукатурка, но ее используют гораздо реже. Мелкий гравий, находящийся в составе такой штукатурки при затирке царапает ее верхний слой, обнажая нижние. Зерновой состав тоже влияет на срок эксплуатации штукатурки. Так, покрытие с крупным зерном более шероховатое, поэтому устойчиво к напряжению и меньше растрескивается. Выбор за потребителем – производители предлагают сейчас штукатурки с различным зерном, от одного до четырех миллиметров. Считается, что гладкие поверхности меньше подвержены загрязнению. Это утверждение может быть ошибочным, так как с одной стороны грязь на гладкой поверхности задерживается меньше, а с другой из-за наличия микротрещин она видна только сильнее. Адгезия грязи также зависит и от направления бороздок.

Говоря о влиянии цвета на стойкость штукатурки необходимо отметить, что на саму целостность покрытия цвет влияния не оказывает. Но сохранность самого цвета может быть разной. Самые сочные и насыщенные тона выцветают быстрее. Насыщенность цветов определяется по шкале, где 0 – это черный цвет, а 100 – белый. Чем показатель насыщенности оттенка ближе к нулю, тем он темнее, тем активнее он притягивает солнечный свет, а поэтому – быстрее выгорает. Более того, темные цвета больше нагреваются, следовательно, страдают от большего напряжения и подвержены растрескиванию в большей степени, чем светлые тона. Утепление фасада – фактор, влияющий на сохранность покрытия темного цвета, так как при нагревании все тепло достается покрытию. Из-за слоя утеплителя стенам ничего не достается. Поэтому для таких стен рекомендуют использовать цвета с насыщенностью менее 40. Оттенки, имеющие по шкале насыщенности менее 20 единиц, в таких случаях запрещены к использованию. На фасады без утеплителя ограничения не распространяются, но и с ними

надо осторожно подходить к выбору цвета. Минеральные виды штукатурок имеют ограниченную цветовую гамму – всего около сотни оттенков, в то время как силиконовые и акриловые имеют более полутора миллионов тонов. Можно противостоять разрушению штукатурки, если выполнять некоторые правила, позволяющие продлить ее долговечность. Во-первых, необходимо беречь покрытие от воды, так как там, где вода – там сразу появляются микроорганизмы. Во-вторых, не стоит пренебрегать текущим ремонтом, так как небольшое повреждение со временем может распространиться на соседние участки. Если штукатурка отошла, это место зачищают и покрывают снова тем же способом, как было наложено первоначальное покрытие. В трещинах может накапливаться влага, что приведет к отслоению, поэтому их необходимо заделывать по мере образования. Сохранность цвета обеспечивают, используя фасадные краски. Необходимо обратить внимание, что тип краски должен соотноситься со связующим, присутствующим в составе штукатурки. Силикатные краски можно использовать с любой основой штукатурного покрытия, но силиконовые – только с силиконовыми и минеральными, а акриловые – только с минеральными и акриловыми. И в завершении необходимо отметить, что поверхность можно и нужно подвергать очистке. Профессионально это могут сделать специалисты сухим льдом, а самостоятельно можно смыть загрязнения, используя водяной компрессор с холодной или даже горячей водой с моющими средствами при более заметном загрязнении.

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 вывести 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 протяжении длительного периода эксплуатации системы утепления [7].

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 и практического опыта 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. Важным при этом является то, чтобы отремонтированное здание наряду с улучшенными теплофизическими параметрами сохранило свою архитектурную выразительность и длительные сроки эксплуатации.

Библиографический список

1. 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 государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С.51–61.
2. Повышение энергоэффективности гражданских зданий путем использования навесных фасадных систем скрепленного типа / М.М. Косухин, А.М. Косухин, М.А. Богачева, К.С. Комарова // Энергетические системы: Сб. ст. II Междунар. научн.-практ. конф. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. С. 461–470.
3. Пути повышения энергоэффективности жилого фонда Белгородской области при проведении капитального ремонта / М.М. Косухин, А.М. Косухин, О.Н. Шарапов и др. // Научные технологии и инновации: Междунар. научн.-практ. конф. Белгород, 2016. Ч. 9. С. 55–62.
4. К вопросу об оптимизации средств капитального ремонта и реконструкции жилого фонда с учетом комфортности среды проживания / М.М. Косухин, А.М. Косухин, А.В. Шевцова, М.А. Богачева // Научные технологии и инновации: Междунар. научн.-практ. конф. Белгород, 2016. Ч. 2. С. 87–89.
5. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Карпова А.О. Фасадные системы: «Прочность, польза, красота» // Вестник МГСУ. 2015. № 10. С. 201–208.
6. Биостойкие цементные бетоны с полифункциональными модификаторами / М.М. Косухин, Л.Ю. Огрель, В.И. Павленко, И.В. Шаповалов // Строительные материалы. 2003. № 11. С.48–49.
7. Kosukhin M.M., Kosukhin A.M., Komarova K.S. Increasing of the Energy Efficiency in Civilian Buildings Applying Fixed Type of Facade // Journal of Physics: Conference Series, 2018. 1066 (1), art. no. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/012012.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ФУНДАМЕНТ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МАЛОЭТАЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

канд. техн. наук. проф. **Косухин М.М.**

зав. лабораторией **Косухин А.М.**

студент **Коржова Ю.Н.**

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

***Аннотация.** Дана характеристика современной энергоэффективной конструкции фундамента мелкого заложения, обеспечивающая возможность кроме своего основного функционального назначения, выполнять тепловую защиту здания от контакта с грунтом основания. Отмечено, что устройство таких фундаментов особенно актуально в регионах с суровыми климатическими условиями и вечномерзлыми грунтами, что очень важно для нашей страны с большим избытком ее климатических поясов. Приведена принципиальная технология возведения, достоинства и недостатки фундамента, дающие основание предполагать, что за данной энергосберегающей технологией большое будущее.*

***Ключевые слова:** энергоэффективные конструкции, энергосберегающие технологии, фундаментная плита, утепленная шведская плита, фундаменты для вечной мерзлоты.*

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

Введение. В условиях энергоэффективности и энергосбережения строительного производства, наряду с многочисленными типовыми энергосберегающими мероприятиями, особая роль отводится используемым материалам и конструкциям для строительства зданий и сооружений. При этом речь идет, в основном, о материалах ограждающих конструкций – наружные стены и конструкции покрытий. Тем не менее, на сегодняшний день, требования энергоэффективности и энергосбережения можно успешно реализовывать и на стадии устройства фундаментов, которые часто выполняют также роль ограждения в зданиях. Это особенно актуально в климатических районах с вечной мерзлотой.

Основная часть. Строительство любого здания начинается с закладки фундамента. Современные технологии предлагают всевозмож-

ные варианты обустройства опоры для дома, используя новейшие разработки и материалы. На фоне набирающих популярность энергосберегающих технологий, европейские строители разрабатывают соответствующие методы сохранения тепла в жилых помещениях. Хорошими эксплуатационными характеристиками отличается фундамент, так называемая шведская плита [1].

Второе название этой конструкции – УШП фундамент, говорит само за себя (утепленная шведская плита). Технология, пришедшая на отечественный рынок, благодаря европейским разработчикам. В частности шведские инженеры разрабатывали поэтапное конструирование, всю нормативную документацию, чертежи. В результате чего вся технология и стала называться шведской.

Утепленная шведская плита – это составной утепленный фундамент мелкого заложения, подходящий для возведения малоэтажных домов каркасного типа, срубов, домов из пенобетона и кирпича.

Основная идея заключается в изолировании бетонной плиты основания от грунта с помощью утеплителя по типу экструдированный пенополистирол.

Слой утеплителя толщиной 200 мм выполняет одновременно три задачи:

- теплоизоляция плиты фундамента;
- распределение нагрузки на грунт;
- амортизация морозного пучения почвы.

Как и у любого фундамента по типу монолитной плиты УШП хорошо распределяет нагрузку дома по всей поверхности застройки и обеспечивает прочность конструкции, устойчивость к усадке и деформации стеновых элементов [2].

Сама плита качественно изолирована от грунта, что позволяет монтировать систему теплого пола непосредственно в плиту, а также организовать черновой пол без дополнительных стяжек или надстроек.

В итоге обустройством фундамента утепленной шведской плитой застройщик получает в одном элементе сразу несколько конструктивных решений:

- прочное основание, не зависящее от свойств грунта;
- теплоизоляцию фундамента под всем строением;
- опционально систему теплого пола, распределенную изначально под всем домом;
- готовое черновое основание, поверх которого сразу же допускается обустройство напольного покрытия.

В качестве утеплителя используется экструдированный пенополистирол с повышенной прочностью и усилием на сжатие при деформации 2% не менее 0,2 кПа [2].

Учитывая равномерное распределение нагрузки, фундамент способен выдержать десятки тонн нагрузки без ощутимых просадок или деформаций.

С точки зрения технологии устройства, утепленная шведская плита – это фундамент со сложной многослойной структурой, состоящей из следующих чередующихся слоев:

- песчаная подушка из песка крупной фракции;
- слой геомембраны;
- дренажная система для отвода жидкости из-под фундамента;
- песчаная подушка из песка мелкой и средней фракции;
- утеплитель ЭППС 100 мм по периметру и под отмостку;
- слой гравия;
- утеплитель ЭППС в основании фундамента толщиной 200 мм за исключением мест под расположение стеновых опорных конструкций;
- монолитная армированная бетонная плита с усилением в месте установки стеновых конструкций и по всему периметру здания [3].

Толщина песчаной и гравийной подложки под фундамент может достигать от 300 до 600 мм. Зависит толщина от типа грунта, его несущей способности и подбирается индивидуально на основании целого ряда факторов.

Основная задача заключается одновременно в выравнивании и стабилизации основания и отведения влаги от фундамента.

В качестве подготовительных работ выбирается грунт и выравнивается поверхность площадки с минимальными отклонениями от плоскости и горизонтали, что обязательно проверяется нивелиром или уровнем.

Песок и впоследствии гравий укладываются послойно по 10-15 см с обязательной трамбовкой и увлажнением. После каждого этапа проверяется и корректируется плоскость, чтобы избежать перекосов или неровностей [4].

После первого слоя песка крупной фракцией расстилается геомембрана для гидроизоляции основания и трубы дренажной системы. Обустройство дренажа выполняется по углублениям по периметру фундамента специальными дренажными трубами с частой перфорацией.

Их оборачивают геотекстилем для защиты от заиливания и засорения. Обязательно формируются наклонные отводы и колодцы для

контроля работы и откачки жидкости, дальнейшей транспортировки воды к дренажным полям.

Чаще утеплитель дополнительно заглубляется на половину или 2/3 уже подготовленной песчаной подушки, создавая преграду оттоку тепла из-под будущего фундамента.

Опалубка формируется и укрепляется согласно требованиям СНиП для обустройства и заливки монолитных бетонных плит. Основная толщина для УШП 100 мм, там, где будут опираться несущие стены и будет нагрузка от стационарного оборудования, например, котельная толщина увеличивается до 200-250 мм, фактически формируя ребра жесткости.

Закладываются трубы для подвода коммуникаций. Используются ПВХ трубы необходимого диаметра с подводкой от внешней части фундамента к точке ввода. Последующие слои и бетонирование выполняются с обходом труб утеплителем с плотным прилеганием и замуровыванием в толще плиты.

По всей площади фундамента укладывается утеплитель в один слой плитами толщиной 100 мм. Согласно проекту застилается второй слой по всей площади за исключением полос под усиление для стен [4].

Используются специальные плиты экструдированного пенополистирола повышенной прочности и с L-образным пазом с торцов. Плиты стыкуются без зазоров и щелей. Дополнительно склеивать или фиксировать их не нужно.

Плита обязательно армируется. Для этого используется арматура толщиной от 12 мм, связанная в единый каркас. По ребрам формируются объемные каркасы с двумя и более рядами арматуры, а по основной площади распределяется арматурная сетка с ячейкой 150-200 мм в один слой.

В некоторых случаях лучше предусмотреть двухрядное армирование по всей площади, если предполагается значительная нагрузка от конструкции самого дома. Определить это должен проектировщик на основании строгих расчетов.

Если предполагается установка теплого пола, то по каркасу армирования распределяется труба сшитого полиэтилена с разделением на контуры под каждое отдельное помещение на первом этаже. Все контуры завязываются на коллекторную группу.

Еще до заливки бетона теплый пол проверяется под давлением, а герметичность опрессовывается. Коллекторная группа крепится к деревянной доске в качестве основы и к арматурным прутьям, пришпунтованным к каркасу армирования в качестве закладных элементов.

Заливка бетона выполняется за один заход, для чего необходимо строго рассчитать требуемый объем материала и заказать точное число бетономешалок, желательнее с бетононасосом и манипулятором подачи. При распределении бетона используются глубинные вибраторы для равномерного и полного заполнения опалубки [2]. В целях повышения качества готовой плиты и снижения трудоемкости ее изготовления на стадии формирования рекомендуется использовать высокоподвижные бетонные смеси, модифицированные эффективными полифункциональными модификаторами [5].

К преимуществам шведского фундамента относятся высокие энергосберегающие показатели. Даже в случае поломки системы отопления тепло будет сохраняться до двух суток, а за это время можно произвести ремонтные работы. Благодаря тому, что все коммуникационные системы устанавливаются непосредственно в основание дома, это оптимизирует в целом процесс постройки здания. Так как бетон заливается по уровню, то такое основание является идеальным для чистового пола и укладки любого напольного покрытия. На данном основании возводятся любые строения с малой этажностью (до трёх этажей): панельные, каркасные, блочные, каменные, кирпичные дома или срубы.

Ориентировочно за месяц от начала расчистки площадки можно начинать возводить стены дома, что значительно сокращает сроки строительства в целом. Все работы могут быть выполнены в течение одного сезона. Проблемы с возникновением сырости и разрастания грибков минимизируются. Данное основание является энергосберегающим, и сохраняет тепло в 3-4 раза больше, нежели стандартные, ленточные и другие фундаменты [6].

Недостатками шведского фундамента являются высокие расходы на возведение данного основания. Однако экономятся средства на дальнейшую установку систем коммуникаций. Для строительства нужен ровный участок земли. В случае наличия уклона увеличивается количество материалов и все работы удорожаются. Для данного фундамента не подходит торфяной вид грунта, так как он обладает слишком низкой несущей способностью. Для воплощения сложного строительного проекта или возведения большого дома потребуется привлечение квалифицированных мастеров, обладающих опытом работы с плитными фундаментами. Если фундаментная плита в среднем достигает толщины 30-40 см, то уровень пола может сравняться с уровнем земли, что приведет к низкому цоколю. Использование качественных строительных материалов, как правило, импортных, может повлиять

на финансовые затраты. Данное основание не подходит для тяжелых и больших строений. Выход из строя коммуникационных систем при дальнейшей эксплуатации дома может привести к дополнительным расходам. Какими бы прочными и надежными не были современные трубы, они имеют свой срок службы. Поэтому необходимо просчитывать все нюансы и выбирать для строительства только высококачественные материалы, дабы минимизировать затраты в дальнейшем [7].

Выводы. Таким образом, исходя из выше изложенного, можно без всяких сомнений сделать вывод о том, что подобная система фундаментов обязательно получит дальнейшее использование и развитие, а число сторонников «утепленной шведской плиты» будет постоянно расти. Такая энергосберегающая технология особенно актуальна при возведении фундаментов в регионах с суровыми климатическими условиями и вечномерзлыми грунтами, широко распространенными на территории нашей страны. Это дает основание судить о том, что данная энергоэффективная технология найдет повсеместное применение в строительстве и за ней широкое будущее.

Библиографический список

1. **Косухин М.М., Косухин А.М., Коржова Ю.Н.** Энергоэффективный фундамент для коттеджного строительства // Наука и инновации в строительстве. Сб. докл. Междунар. научн.- практ. конф. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. С. 171–176.
2. Фундамент – утепленная шведская плита [Электронный ресурс]. URL: <http://stroimsvoidom.com/uteplennaya-shvedskaya-plita/> (дата обращения 12.10.17).
3. СТО 72746455-4.2.1-2013. Мелкозаглубленные плитные фундаменты. Проектирование и устройство мелкозаглубленных плитных фундаментов типа «Утепленная шведская плита»: Стандарт организации. М.: ООО «ТехноНИКОЛЬ – Строительные Системы», 2013. 32 с.
4. УШП фундамент. Технология [Электронные ресурс]. URL: <http://stroyday.ru/stroitelstvo-doma/fundament-doma/ushp-fundament-texnologiya.html>. (дата обращения 12.10.17).
5. **Kosukhin M.M., Shapovalov N.A., Kosukhin A.M.** Colloid-Chemical Bases on Creation of Multifunctional Modifiers of Concrete Mix and Concrete / Solid State Phenomena. 2017. Vol 265, P. 331–336.
6. Шведская плита для фундамента дома [Электронные ресурс]. URL: <http://kakpostroitdomic.ru/fundament/shvedskaya-plita.html> (дата обращения 12.10.17).
7. **Красовицкий М.Ю.** Проектирование фундаментов промышленных и гражданских зданий. М.: МИИТ, 2011. 137 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОНОВ

канд. техн. наук, доц. **Орлов С.М.**

ассистент **Романенко Б.Р.**

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

***Аннотация.** Защита атмосферы - социальная и экономическая проблема, неразрывно связанная с задачей создания комфортных условий для жизни и работы человека. Во многих промышленных выбросах содержатся ценные продукты, которые безвозвратно теряются. Поэтому очистка промышленных выбросов имеет санитарное и экономическое значение. При очистке газа от пыли наибольшее распространение получили циклоны, которые, как правило, устанавливаются в качестве предварительной ступени очистки. При этом аппараты тонкой очистки рассчитываются на весь объем газа. В настоящее время не исследован вопрос концентрации пыли и газодинамические процессы, протекающие в выхлопной трубе. Данные исследования позволяют более рационально использовать энергию, затраченную на очистку газов в циклонах.*

Существующее положение

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

Циклоны являются наиболее характерными представителями су-хих 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]. Однако у циклонов есть и существенный недостаток - степень очистки сильно зависит от дисперсного состава частиц пыли в поступающем на очистку газе (чем больше размер частиц, тем эффективнее очистка), они не улавливают мелкодисперсную пыль $d < 20\mu\text{м}$. Имеется множество теоретических и экспериментальных работ, направленных на повышение эффективности улавливания пыли в циклонах. На основе данных исследований разработано большое количество конструкций циклонов, однако добиться существенного повышения эффективности не удалось, поэтому циклоны, как правило, используются для предварительной (грубой) очистки газов от пыли, перед аппаратами тонкой очистки. Аппараты второй (тонкой) ступени очистки (рукавные, электрофильтры и др.) требуют

значительно больших капитальных и эксплуатационных затрат, поэтому вопрос совершенствования циклонов, направленный на уменьшение объемов газов, направляемых на аппараты второй ступени очистки является актуальным.

В настоящее время основное направление работ выбрано на исследование нисходящего вихревого потока и его сепарационных свойств. Однако восходящий поток исследован недостаточно. Данный подход не рационален, поскольку на восходящий вихревой поток затрачено не менее 50% энергии, затраченной на закрутку запыленного потока газа в циклоне. Не исследован вопрос концентрации пыли в восходящем потоке и газодинамические процессы, протекающие в нем. Проведение данных исследований является актуальной задачей, поскольку позволит значительно повысить энергоэффективность циклонов.

Цель работы: исследование газодинамических процессов и концентрация пыли в восходящем вихревом потоке циклона.

Содержательная часть

Восходящий поток в циклоне вращается по закону твердого тела с постоянной угловой скоростью. Радиус вихря у разных авторов принимается разный. Так у Барта [3] радиус восходящего вихря в циклонах равен радиусу выхлопной трубы R_2 , по Тер-Линдену равен $2/3R_2$ [5], по Стейрманду, он равен $1/2R_2$ [4].

Несмотря на разность мнений, радиус восходящего вихря в циклоне в подавляющем большинстве случаев принимается, равен радиусу выхлопной трубы R_2 . Поскольку восходящий вихрь вращается как твердое тело с постоянной угловой скоростью, то удобней вместо тангенциальной скорости пользоваться угловой. Угловая скорость равна:

$$\omega = \frac{V_{\text{т.вих}}}{R_2}, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость восходящего вихря, с^{-1} ; $V_{\text{т.вих}}$ – тангенциальная скорость на внешней границе восходящего вихря, м/с ; R_2 – радиус выхлопной трубы.

Во вращающихся потоках, ограниченных цилиндрическими поверхностями с радиусами R_1 и R_2 , при реальных вязких газах, распределение скоростей выражается уравнением [6]:

$$VR^n = k = \text{const}. \quad (2)$$

Большинство исследователей циклонов (Барт, Даниельс, Девис, Пирумов и др.) принимают $n = 1$. В подавляющем случаях, все размеры циклона приводятся кратными его диаметру. Тогда распределение скорости в криволинейном канале на внешней границе восходящего вихря будет равно:

$$V_{г.вых} = \frac{V_{вх}(1 - K_2)}{K_2 \ln \frac{1}{K_2}}, \quad (3)$$

где $V_{вх}$ – скорость газа во входном патрубке, м/с; K_2 – отношение диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона.

Подставив (3) в (1), получим значение угловой скорости:

$$\omega = \frac{2V_{вх}(1 - K_2)}{DK_2^2 \ln \frac{1}{K_2}}. \quad (4)$$

Помимо традиционных сил, действующих в циклоне: центробежной силы $F_{ц}$ и силы сопротивления среды F_c , необходимо учитывать и силу F_p , возникающую за счет значительного радиального градиента давления, направленного к оси восходящего вихря [5].

Баланс сил, действующих в восходящем вихре циклона равен:

$$F_c = (F_{ц} - F_p). \quad (5)$$

Центробежная сила в данном случае равна:

$$F_{ц} = m\omega^2 R = \frac{\pi\rho_q d_q^3 \omega^2 R}{6}, \quad (6)$$

где ρ_q – удельный вес частицы, кг/м³; d_q – диаметр частицы, м.

Восходящий вихрь в циклоне представляет собой вихревой цилиндр. Если в области циркуляционного течения распределения давления для несжимающейся жидкости определяется уравнением Бернулли, то в вихревой области распределение давления определяется из условия равновесия вращающихся частиц. На такую вращающуюся частицу A (рис. 1) действует две уравновешивающие друг друга силы.

С одной стороны центробежная сила, равная [7]:

$$dF_{ц} = \rho_r R^* d\theta \omega^2 R^*, \quad (7)$$

где ρ_r – удельный вес газа, кг/м³.

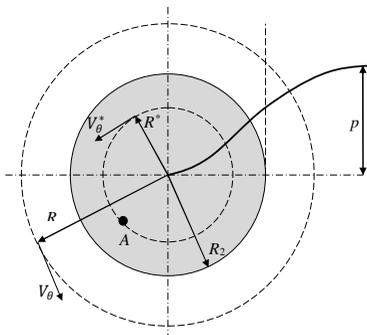


Рис. 1. Распределение статического давления в плоском вихре

С другой сила dP , обусловленная перепадом давления в вихревом цилиндре и равная:

$$dP = R^* d\theta dp. \quad (8)$$

Приравняв эти силы (7) и (8), получаем:

$$dp = \rho_r \omega^2 R^* dR^*. \quad (9)$$

Пропустим промежуточные выкладки, которые изложены в [7], а так же преобразовав формулу для данного случая, получим:

$$p^* = -\frac{\rho_r V_{\text{вх}}^2 (1 - K_2)^2}{2K_2^2 \left(\ln \frac{1}{K_2}\right)^2} (1 - n^2). \quad (10)$$

В данном случае n обозначает долю радиуса выхлопной трубы R_2 и может принимать значения в пределах $n = 0 \div 1$.

На рис. 2 показана зависимость распределения статического давления в поперечном сечении выхлопной трубы циклона.

В теоретическом и экспериментальном исследованиях использовался циклон НИИОГаза типа ЦН11-300. Как показывают построенные зависимости, теоретические исследования хорошо совпадают с экспериментальными данными. Максимальное расхождение не превышает 8%. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований были аппроксимированы линейными функциями. Величины достоверности аппроксимации R^2 составляют вполне приемлемую для практических расчетов точность.

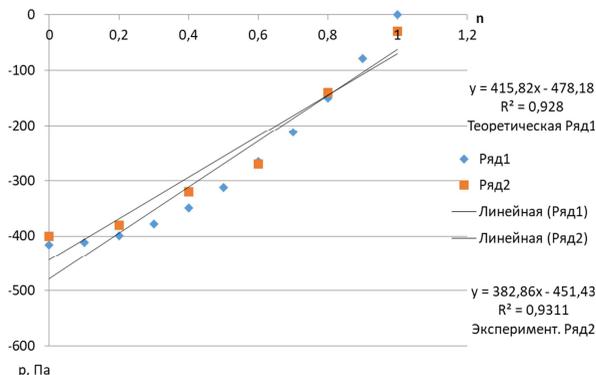


Рис. 2. Зависимости распределения статического давления по поперечному сечению выхлопной трубы: ряд 1 – теоретическая; ряд 2 – экспериментальная

Радиальное ускорение в поперечном сечении выхлопной трубы циклона равно:

$$a_{ц} = -\frac{dp}{\rho_{г}dn}, \quad (11)$$

где $\rho_{г}$ – удельный вес газа, кг/м^3 .

Поскольку радиальный градиент давления в поперечном сечении выхлопной трубы циклона с достаточной для практических расчетов точностью может быть заменен линейной функцией, тогда:

$$a_{ц} = \frac{\Delta p}{\rho_{г}R_2} = \frac{\Delta p}{0,5\rho_{г}K_2D}, \quad (12)$$

где Δp – разность давлений у внутренней стенки выхлопной трубы и ее центром, Па.

Значение разности давлений у внутренней стенки выхлопной трубы и ее центром Δp можно определить, решив уравнение (11) при $n = 0$, тогда:

$$\Delta p = \frac{\rho_{г}V_{вх}^2(1 - K_2)^2}{2K_2^2 \left(\ln \frac{1}{K_2}\right)^2}. \quad (13)$$

Подставив (13) в (12) и сделав преобразования получим:

$$a_{\text{ц}} = \frac{\Delta p}{0,5\rho_r K_2 D} = \frac{V_{\text{вх}}^2 (1 - K_2)^2}{DK_2^3 \left(\ln \frac{1}{K_2}\right)^2}. \quad (14)$$

Зная расстояние от оси циклона до внутренней поверхности выхлопной трубы R_2 и ускорения $a_{\text{ц}}$ можно определить время прохождения газа от внутренней стенки выхлопной трубы циклона к его центру, которое равно:

$$t_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{DK_2}{a_{\text{ц}}}} = \frac{DK_2^2 \ln \frac{1}{K_2}}{V_{\text{вх}}(1 - K_2)}. \quad (15)$$

Для сферических частиц со стоковским характером обтекания внешним потоком газа, время релаксации имеет вид [8]:

$$\tau = \frac{\rho_{\text{ч}} d_{\text{ч}}^2}{\rho_r 18\nu_r}, \quad (16)$$

где ν_r – коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с.

На рис. 3 показаны зависимости времени релаксации частицы в газовом потоке и время прохождения газового потока от внутренней стенки выхлопной трубы циклона к его центру для различных условий.

Как видно из графиков (рис. 3) зависимости времени $t_{\text{ц}} = f(V_{\text{вх}})$ и $t_{\text{ц}} = f(K_2)$ составляют значения одного порядка с $\tau = f(d_{\text{ч}})$. Однако, несмотря, что время $t_{\text{ц}} = f(D)$ значительно больше $\tau = f(d_{\text{ч}})$ все равно на пыль, находящуюся в выхлопной трубе, будет действовать сила, обусловленная тем, что под действием градиента давления газ в выхлопной трубе в радиальном направлении движется с ускорением $a_{\text{ц}}$. Частицы пыли увлекаются газовым потоком и движутся вместе с ним равномерно ускоренно, но отставая на время релаксации τ . Тогда скорость частицы в радиальном направлении относительно потока будет равна:

$$\Delta V = V_r - V_{\text{ч}} = a_{\text{ц}} t - a_{\text{ц}}(t - \tau) = a_{\text{ц}} \tau. \quad (17)$$

На рис. 4 показаны зависимости скорости частиц относительно потока для различных условий.

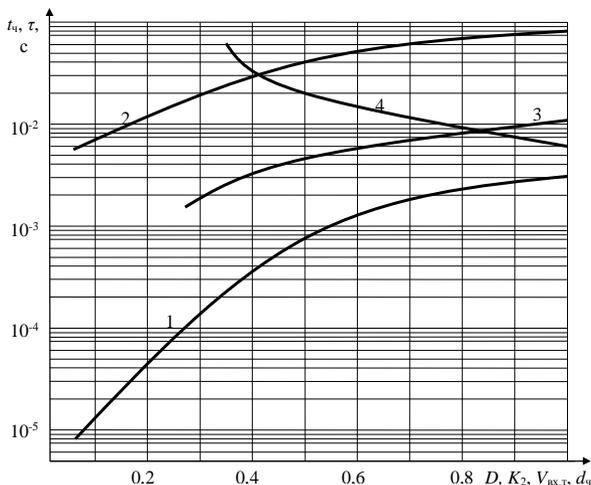


Рис. 3. Графики зависимостей:

$$1 - \tau = f(d_i); 2 - t_{\tau} = f(V_{\text{вх.т}}); 3 - t_{\tau} = f(K_2); 4 - t_{\tau} = f(D)$$

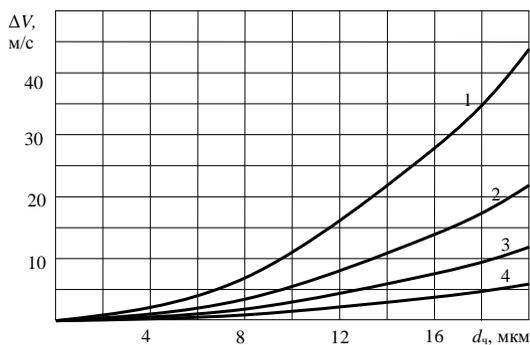


Рис. 4. Зависимости $\Delta V = f(d_i)$ при:

$$1, 3 - D = 0,3 \text{ м}; 2, 4 - D = 0,6 \text{ м}; 1, 2 - K_2 = 0,33; 3, 4 - K_2 = 0,59$$

Как видно из приведенных графиков, (рис. 4) Скорость частицы относительно газового потока может достигать значительных величин. Так при $K_2 = 0,33 \text{ м}$, $D = 0,3 \text{ м}$ и $d_i = 20 \text{ мкм}$ скорость частицы

$\Delta V = 44,0$ м/с. Это говорит о том, что распределение частиц пыли в восходящем вихре циклона носит сложный характер, который требует дальнейшей работы в этом направлении.

Выводы по работе

1. Установлено, что в восходящем вихревом потоке циклона, помимо центробежной и силой сопротивления среды, присутствует и сила, обусловленная радиальным градиентом давления, направленная к оси циклона.

2. Получена зависимость ускорения газового потока, в радиальном направлении, направленная к оси циклона.

3. Полученные зависимости справедливы для циклонов любой конструкции, поскольку из конструктивных параметров в зависимостях присутствуют только диаметр циклона и отношение диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона, что присутствует в циклонах любой конструкции.

4. Дальнейшая работа в данном направлении является перспективной и должна быть продолжена.

Библиографический список

1. **Гурвиц А.А.** Пылеулавливание в металлургии: Справочник. М.: Металлургия, 1984. 336 с.
2. **Алиев Г.М.** Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок. М.: Металлургия, 1988. 368 с.
3. **Bart W.** Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund neuerer untersuchungen // Brennstoff-Warmekraft. 1956, No 8, P. 1–9.
4. **Stairmand C.J. Kelsey R.N.** The Role of the cyclone in reducing atmospheric pollution // Chemistry and industry. 1955. No 41. p. 1324–1330.
5. **Ter Linden A.I.** Investigations into Cyclone Dust Collectors // The Inst. of Mechanical Eng. 1949. Vol. 160, No 2. P. 233–251.
6. **Пирумов А.И.** Обеспыливание воздуха. М.: Стройиздат, 1981. 296 с.
7. **Дейч М.Е., Зарянкин А.Е.** Гидрогазодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1984. 384 с.
8. **Василевский М.В.** Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 258 с.

4. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 662.61

ГИБРИДНАЯ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩАЯ СТАНЦИЯ

аспирант **Варакута В.В.**

д-р техн. наук, проф. **Бирюков А.Б.**

канд. техн. наук, доц. **Гнигитёв П.А.**

*Донецкий национальный технический
университет, г. Донецк*

***Аннотация.** В работе представлены запасы вторичной и низкопотенциальной теплоты (ВНТ) одной из шахт Донбасса. Предложена схема гибридной энергогенерирующей станции на базе тепловой машины с низкотемпературным рабочим телом в условиях угледобывающей шахты, при использовании в качестве первичной энергии ВНТ. Проанализирован термодинамический цикл и основные энергетические характеристики предложенной схемы. Установлено, что полная мощность электрогенерации при отсутствии затрат на отопление составляет более 70% мощности, потребляемой шахтой при угледобыче. Работа по подъёму воды осуществляется практически без затрат ВНТ за счёт разности плотностей составляющих БРТ, что позволяет максимально использовать регенерацию теплоты в термодинамической схеме ТМУ за счёт гидростатического столба жидкой фазы БРТ, обусловленного глубиной шахтного ствола.*

Введение. При добыче угля подземным способом, в технологическом цикле с различными теплоносителями сбрасывается огромное количество ВНТ, возможность использования которого в настоящее время не реализована. Запасы ВНТ могут достигать значительной величины и даже превышать потребности предприятия в энергоресурсах [1]. Вместе с тем, глубина разработки более половины угольных шахт Донбасса достигает 700 и более метров, что позволяет использовать высокопотенциальную гидравлическую энергию за счёт гидростатического столба жидкой фазы рабочего тела, обусловленного глубиной шахтного ствола. Поэтому утилизация, трансформация и возвращение

в хозяйственный оборот низкопотенциальных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и вторичных энергоресурсов (ВЭР), неизбежно возникающих при подготовке угольного месторождения и добыче угля является актуальной задачей [2].

Состояние вопроса. В настоящее время рассмотрен вопрос эффективности энергогенерирующей станции на базе тепломашинной установки (ТМУ) с паротурбинной установкой (ПТУ) на низкокипящем рабочем теле (НРТ), в условиях угледобывающих шахт при использовании в качестве первичной энергии ВНТ. При этом сравнительная оценка предельно возможной эффективности выполнена для идеального цикла Карно, реализуемого в условиях имеющегося перепада температур между нагревателем и холодильником, учтена динамика изменения внешних факторов, влияющих на основные энергетические характеристики [3].

Хорошо изучены термодинамические характеристики и теплотехнические свойства различных НРТ используемых как в холодильной технике, так и в энергетике [4].

Эрлифт или «воздушный подъемник», впервые в промышленности применен русскими инженерами В.Г. Шуховым и А.В. Бари, о чем упоминает Д. И. Менделеев в 1886 году. Одним из первых ученых, который предложил методику расчета эрлифта, основанную на теории подобия и анализе экспериментальных исследований, был проф. В.Г. Гейер. Под его руководством специалистами Донецкого политехнического института проводились масштабные исследования эрлифтных установок как на угольных шахтах для подъема горной массы на поверхность и чистки подземных емкостей, так и для золошлакоудаления на электростанциях, для гидротранспорта пульпы различной плотности на обогатительных фабриках и других объектах [5].

Порядка 20% выработки электрической энергии приходится на ГЭС. Разработана теория высоконапорных гидроагрегатов. Оборудование ГЭС и ГАЭС различной мощности, стандартизировано и производится серийно [6].

В связи с изложенным выше возникает потребность анализа, расчета и проектирования энергогенерирующих систем на основе ТМ использующих ВНТ и высокопотенциальную гидравлическую энергию за счёт гидростатического столба жидкой фазы бинарного рабочего тела (БРТ) в условиях угольной шахты.

Целью данной работы является анализ термодинамической схемы энергогенерирующей станции на базе различных типов ТМ и гидроаг-

регатов (ПТУ, эрлифт, гидротурбина) с БРТ (НРТ + вода) в качестве потребителя ВНТ шахты и определение её возможных энергетических характеристик.

Методика исследования

Анализ работы схемы электрогенерирующей станции, представленной на рис. 1, в условиях угольной шахты, выполнен на основании упрощенных расчетных зависимостей для типовых параметров силового, гидроэнергетического и теплотехнического оборудования, а также с учетом известных из литературных источников характеристик процессов образования ВИЭ и ВЭР при подземной добыче угля с глубиной разработки более 800 м.

Начиная с 2004 года на шахте создавалась самая мощная на постсоветском пространстве когенерационная установка с использованием шахтного метана в качестве топлива. Работы осуществляла компания «Синапс». Здесь создан когенерационный энергетический комплекс на базе 12 газопоршневых установок типа JMS 620 австрийской фирмы «Jenbacher», работающих на шахтном метане с концентрацией 25%. Суммарный к.п.д. этих энергетических установок по теплу и электроэнергии доходит до 86%, что недостижимо на других энергетических объектах. Установленная электрическая мощность одной установки составляет 3,035 МВт, а тепловая – 2,63 Гкал/ч. Основной продукцией энергокомплекса на данной шахте является электроэнергия, вырабатываемая газопоршневыми установками, размещенными в специальном здании. Выработанная электроэнергия, за годовой цикл составляет 122,046 МВт·ч. Одновременно энергокомплекс вырабатывает через систему охлаждения газопоршневой установки тепловую энергию той же мощности (3050 кВт), что и электрической с температурой +110°C. Базовый вариант использования тепла, вырабатываемого газопоршневой установкой, предусматривает подачу его в систему горячего водоснабжения. В летнее время года, в связи со снижением потребности в горячей воде, избытки теплоты отводятся в окружающую среду [2].

Анализ проводился для условий одной из шахт Донбасса на основании следующих характеристик: марка добываемого угля Ж, максимальная добыча угля – 2,031 млн. т/год, максимальная глубина горных работ – 1400 м, температура горного массива – +49°C, газоносность угольных пластов шахты составляет от 19 до 23 м³/т, общее количество воздуха, подаваемого в шахту – 40 тыс. м³/мин, общий приток воды в действующие горные выработки – 600 – 650 м³/ч. Средний удельный расход электроэнергии составил 84,6 кВт·ч/т.

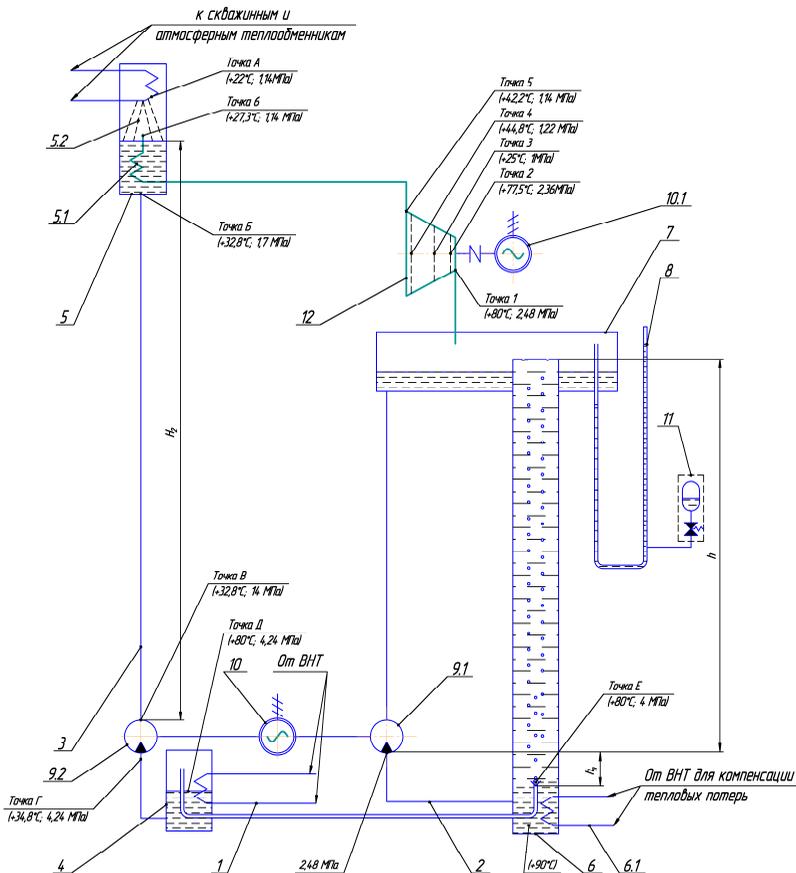


Рис. 1. Схема тепломашинной установки

Результаты исследования

Оценочные запасы ВНТ шахты представлены в табл. 1. Суммарные запасы ВНТ в отопительный период $Q_{\text{ВНТ}} = 97,4$ МВт, в остальное время $Q_{\text{ВНТ}} = 122,6$ МВт.

Для функционирования тепловой машины необходимы источник тепла с более высоким температурным уровнем – нагреватель и источник тепла с более низким температурным уровнем – холодильник. В нашем случае нагревателем является теплоноситель (вода), поступающий от источников ВНТ шахты. Его температура составляет +10°C.

Таблица 1

Оценочные запасы ВНТ шахты

Наименование источника	Способ получения теплоты	Удельные запасы теплоты, кВт·ч/т (W)	Мощность теплового потока, МВт (Q)	Температура источника, °С
Дегазационный метан	Сжигание в газопоршневых установках типа JMS 620	$W_m = 0 \dots 108,5$	$Q_1 = 0 \dots 25,2$	110
Угольная пыль	Сжигание в котлах с пылеугольными горелками и горелками на водоугольной смеси	$W_{п} = 826,4$	$Q_2 = 198,3$	110
Шахтные воды	Природный геотермальный и техногенный характер	$W_{вод} = 69,2$	$Q_3 = 16,6$	49
Отработанный рудничный воздух	Природный геотермальный и техногенный характер	$W_{рв} = 58,4$	$Q_4 = 14$	26

Холодильником могут служить породы на глубине от 30 до 100 м со средней температурой $+12^{\circ}\text{C}$ и атмосферный воздух при его температуре ниже $+12^{\circ}\text{C}$.

Предлагаемая схема ТМУ (рис. 1) включает два контура: водяной контур и контур НРТ. Водяной контур состоит из колоны эрлифта 6 со смесителем, теплообменника - компенсатора тепловых потерь 6.1, разделительного бака накопителя 7 со стабилизатором давления 8 и исполнительного устройства стабилизатора 11, линии подачи воды на гидротурбину и водяной гидротурбины 9.1, линии подачи воды 2 в колону эрлифта. В качестве НРТ используется фреон R407c. Контур НРТ состоит из колоны эрлифта 6 со смесителем, разделительного бака накопителя 7, ПТУ с паровой линии НРТ 12, теплообменника-регенератора 5.1, конденсатора-регенератора 5 с теплообменником конденсатора и градирней 5.2, гидравлической линии подачи фреона 3 на гидротурбину, гидротурбины НРТ 9.2, линии подачи фреона на испаритель, испарителя-пароперегревателя 4 с теплообменником 1 подвода ВНТ и паровой линии подачи НРТ на смеситель Эрлифта. Выходные валы гидротурбины 9.1 и гидротурбины 9.2, механически связаны с валом электрогенератора 10. Для возможности утилизации тепловых потерь при электро-

генерации, генераторы 10 и 10.1 выполнены водоохлаждаемыми и их система охлаждения включена в схему подвода теплоносителя ВНТ.

Проанализируем работу установки в соответствии с термодинамическим циклом контура НРТ, представленном на рис. 2, в $P - S$ координатах.

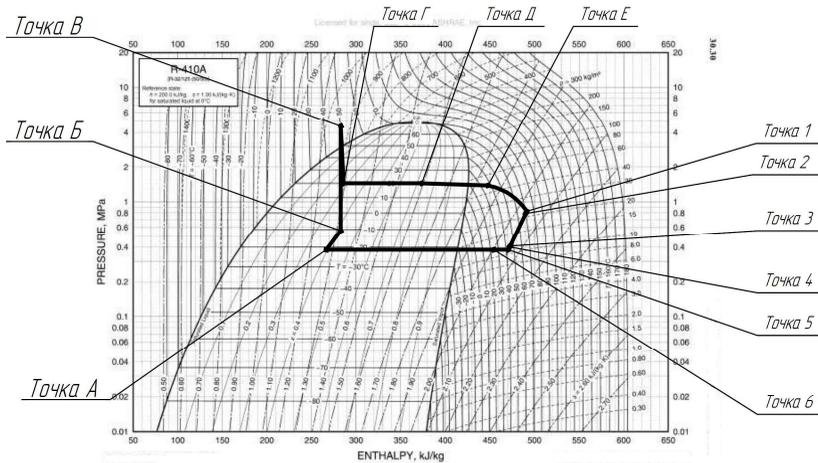


Рис. 2. Термодинамический цикл контура НРТ

При подводе теплоты в испарителе – пароперегревателе, НРТ испаряется и достигает параметров перегретого сухого пара (точка Г – точка Д – точка Е). Выходя из смесителя в колонне эрлифта, пар расширяется по изотерме (точка Е – точка 1) и совершает работу по подъёму воды до поверхности излива в разделительном баке накопителе. Из разделительного бака накопителя перегретый пар поступает в ПТУ, где так же совершает полезную работу (точка 1 – точка 5). Проходя через теплообменник – регенератор, пар отдаёт часть теплоты конденсату (точка 5 – точка 6). Часть теплоты, так же отдаётся конденсату в градирне (точка 6 – точка А). Оставшаяся теплота отводится теплообменником конденсатора (точка А). Нагрев сконденсированного НРТ осуществляется в градирне, в регенеративной части конденсатора (точка А – точка Б), за счёт диссипации в гидротурбине НРТ (точка Б – точка В – точка Г) и завершается в испарителе – пароперегревателе (точка Г – точка Д – точка Е).

Найдём оптимальное значение удельного расхода НРТ, соответствующего максимальной подаче эрлифта:

$$q_{\max} = \left(\frac{2}{\alpha - 1} \right) \left(1 + \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} g n_p}{2\rho_7} \right) = k \frac{M_{R407c}^3}{M_{\text{H}_2\text{O}}},$$

где $\alpha = h_n/H = 838/1219 = 0,682$; $H = h_n + h = 381 + 838 = 1219$ м – высота эрлифтной ступени в шахтном стволе; $p_7 = 2,48$ МПа = $2,48 \cdot 10^6$ Па – давление над поверхностью излива в разделительном баке и на выходе гидротурбины 9.1.

Из работы [7]:

$$h = \frac{p/0,1 - 5}{K - 1} = \frac{42,4/0,1 - 5}{2,2 - 1} = 381 \text{ м},$$

где $p = 4,24$ МПа = $42,4$ кг/см² – рабочее давление НРТ на выходе из смесителя (точка 1); $K = 2,2$ – коэффициент погружения; $h_p = hK = 381 \cdot 2,2 = 838$ м; $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000$ кг/м³; $g = 9,81$ м/с².

Тогда:

$$q_{\max} = \left(\frac{2}{0,682 - 1} \right) \left(1 + \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 838}{2,2 \cdot 4810^6} \right) = 5,14 \frac{M_{R407c}^3}{M_{\text{H}_2\text{O}}}.$$

Удельный вес перегретого пара НРТ над поверхностью излива – $\gamma_{\text{НРТ}} = 92,5$ кг/м³.

Оптимальный удельный массовый расхода НРТ:

$$q_{\max}^m = q_{\max} \gamma_{\text{НРТ}} = 5,14 \cdot 92,5 = 475,5 \frac{\text{кг}}{\text{М}_{\text{H}_2\text{O}}^3}.$$

Количество ВНТ, необходимое для подъёма 1 м³ воды до уровня излива:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ВНТ уд}} &= (h_E - h_{\Gamma}) q_{\max}^m + r q_{\max}^m = \\ &= (414,1 - 251) \cdot 475,5 + 70,16 \cdot 475,5 = 110 \ 915 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Удельная мощность на выходном валу гидротурбины 9.1:

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{q_{\text{H}_2\text{O}} g (h - 1)}{1000} \eta_{\Gamma} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot (381 - 1)}{1000} 0,7 = 2609,5 \text{ кВт}.$$

Удельная мощность на выходном валу гидротурбины 9.2:

$$N_{R407c} = \frac{q_{R407c} g (H_2 - p_4)}{1000} \eta_{\Gamma} = \frac{475,5 \cdot 9,81 \cdot (1400 - 424)}{1000} 0,7 = 4552,7 \text{ кВт},$$

где $p_4 = p = 4,24$ МПа = 424 м.

Определяем параметры НРТ на участке 1 – 5.

Точка 1

Параметры НРТ на входе в ПТУ:

$$T_1 = +80^\circ\text{C}; p_1 = 2,48 \text{ МПа}; h_1 = 456,6 \text{ кДж/кг.}$$

Точка 5

Параметры НРТ на входе в конденсатор:

$$T_5 = +42,2^\circ\text{C}; p_5 = 1,14 \text{ МПа}; h_5 = 437 \text{ кДж/кг.}$$

Точка 2

Давление пара перед соплами:

$$p_2 = 0,95p_0 = 0,95 \cdot 2,48 = 2,36 \text{ МПа.}$$

Температура пара перед соплами: $T_2 = 77,5^\circ\text{C}$.

Энтальпия пара перед соплами: $h_2 = 456,4 \text{ кДж/кг}$.

Теоретический удельный объём пара перед соплами:

$$v_0 = 0,0114 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Точка 4

Падение давления в выходной коробке и выхлопном патрубке турбины:

$$\Delta p = p_5 \lambda (0,01 c_{\text{вп}})^2 = 1,14 \cdot 0,06 \cdot (0,01 \cdot 110)^2 = 0,083 \text{ МПа,}$$

где λ – коэффициент сопротивления выхлопного патрубка, принимаем 0,06; $c_{\text{вп}}$ – скорость пара в выходном сечении выхлопного патрубка турбины, для конденсационной турбины принимаем 110 м/с.

Давление за рабочими лопатками венца рабочего колеса:

$$p_4 = p_5 + \Delta p = 1,14 + 0,083 = 1,22 \text{ МПа.}$$

Температура пара за рабочими лопатками венца рабочего колеса:

$$T_4 = +44,8^\circ\text{C.}$$

Энтальпия пара за рабочими лопатками венца рабочего колеса:

$$h_4 = 438,4 \text{ кДж/кг.}$$

Точка 3

Теплоперепад идеальной турбины:

$$H_{0\text{ид}}^T = h_1 - h_5 = 456,6 - 437 = 19,6 \text{ кДж/кг.}$$

Располагаемый (перерабатываемый) теплоперепад ступени:

$$H_0^T = h_1 - h_4 = 456,6 - 438,4 = 18,5 \text{ кДж/кг.}$$

В сопловой решётке должен быть переработан теплоперепад:

$$H_{0\text{с}}^T = H_0^T (1 - \rho) = 18,2(1 - 0,03) = 17,65 \text{ кДж/кг,}$$

где ρ – степень реактивности для активной ступени, принимаем 0,03.

Тогда энтальпия пара за сопловой решёткой на входе в рабочую решётку:

$$h_3 = h_1 - H_{0c} = 456,6 - 17,65 = 439 \text{ кДж/кг.}$$

Давление пара за сопловой решёткой на входе в рабочую решётку:
 $p_3 = 1,25 \text{ МПа.}$

Температура пара за сопловой решёткой на входе в рабочую решётку: $T_3 = +45,7^\circ\text{C.}$

Определим эффективную удельную мощность на муфте электрогенератора ПТУ приведенную к подъёму 1 м^3 воды до уровня излива:

$$N_m = q_{\max}^m H_{0\text{ид}}^T \eta_{\text{оe}},$$

где $\eta_{\text{оe}} = \eta_{\text{др}} \eta'_{\text{oi}} \eta_{\text{тм}} \eta_{\text{ввр}} = 0,93 \cdot 0,75 \cdot 0,98 \cdot 1 = 0,68$ – относительный эффективный к.п.д. турбины, где $\eta_{\text{др}} = H_0^T / H_{0\text{ид}}^T = 18,2/19,6 = 0,93$; η'_{oi} – внутренний относительный к.п.д., принимаем 0,75; $\eta_{\text{тм}}$ – механический к.п.д. турбины, принимаем 0,98; $\eta_{\text{ввр}}$ – коэффициент выхода внутренней работы, при отсутствии отборов пара из турбины, принимаем равным 1.

Тогда

$$N_m = 475,5 \cdot 19,6 \cdot 0,68 = 6370,5 \text{ кВт.}$$

Удельная мощность электрогенерации:

$$\begin{aligned} N_{\text{уд}} &= (N_{\text{H}_2\text{O}} + N_{R407c} + N_m) \eta_{\text{э}} = \\ &= (2609,5 + 4552,7 + 6370,5) \cdot 0,95 = 12856,1 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

К.п.д. установки:

$$\eta = \frac{N_{\text{уд}}}{Q_{\text{ВНТ уд}}} = \frac{12856,1}{110915} = 0,116.$$

Полная мощность электрогенерации в отопительный период:

$$N = N_{\text{уд}} \frac{Q_{\text{ВНТ}}}{Q_{\text{ВНТ уд}}} = 12856,1 \frac{97400}{110915} = 11289,6 \text{ кВт} = 11,3 \text{ МВт,}$$

в остальное время (при отсутствии отбора ВНТ на нужды отопления):

$$N = 12856,1 \frac{122600}{110915} = 14210,5 \text{ кВт} = 14,2 \text{ МВт.}$$

Выводы. Полная мощность электрогенерации при отсутствии затрат на отопление составляет более 70% мощности, потребляемой шахтой при угледобыче. Работа по подъёму воды осуществляется практически без затрат ВНТ за счет разности плотности составляющих БРТ (теплота затрачивается только на восполнение тепловых потерь оборудования и при наличии теплоизоляции не превышает 5% потребляемого ВНТ), что позволяет максимально использовать регенерацию теплоты в термодинамической схеме ТМУ за счёт гидростатического столба жидкой фазы БРТ, обусловленного глубиной шахтного ствола. Однако, из расчёта видно, что реальный к.п.д. такой установки достаточно низок ($\eta = 11,6\%$), поэтому необходимо провести анализ гибридной схемы ТМУ в состав которой, наряду с эрлифтом и ПТУ на НРТ входила бы компрессионная или абсорбционная холодильная машина, для получения максимального теплоперепада на ПТУ, независимо от изменения внешних факторов (сезонные колебания количества ВНТ, сезонные и суточные колебания температуры атмосферного воздуха), что может привести к повышению среднего к.п.д. за годовой цикл работы.

Библиографический список

1. Оценка показателей энергогенерирующей станции с низкокипящим рабочим телом в условиях угольной шахты / А.Б. Бирюков, В.В. Варакута, П.А. Гнитиев, А.С. Приходько // Вестник ИГЭУ. 2018. № 4. С. 12–19.
2. Пути использования низкопотенциальных возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов угольных шахт / А.Б. Бирюков, В.В. Варакута, Д.И. Пархоменко, П.А. Гнитиев // Вестник МЭИ. 2018. № 5. С. 24–33.
3. **Бирюков А.Б., Варакута В.В., Гнитиев П.А.** Оценка эффективности энергогенерирующей станции, утилизирующей вторичную и низкопотенциальную теплоту в условиях угольных шахт, методом термодинамического анализа // Вестник ИГЭУ. 2018. № 2. С. 12–20.
4. **James M. Calm** ARTI refrigerant database. Primary and recently-added citations. Arlington: Great Falls, 1999. 323 p.
5. **Стифеев Ф.Ф.** Исследования режимов работы эрлифта для подъема пульпы повышенной плотности // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2014. № 3. С. 89–95.
6. Предварительный национальный стандарт гидроэлектростанции. Номенклатура машинного оборудования: ПНСТ 50-2015 ИЕС/TR 61364 (1999). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2016. 76 с.
7. **Василевский М.В., Романдин В.И.** Оценки методов транспортировки жидкостей эрлифтными устройствами // Вестник науки Сибири. 2012. № 1 (2). С. 120–125.

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ ПЛАМЕНИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В БИОГАЗЕ И ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ГОРЕЛКИ

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

магистрант **Парфилова Е.С.**

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

***Аннотация.** В данной статье описано уравнение регрессии для определения длины пламени газозоообразной смеси, имитирующей биогаз, в зависимости от содержания углекислого газа в смеси и тепловой мощности газовой горелки. Чтобы обеспечить работу теплопотребляющего агрегата на биогазе или на природном газе, а также наладить правильный процесс горения в нем при одновременном сжигании биогаза и природного газа в одном топочном устройстве (по мере необходимости), следует знать длину пламени при горении газообразного топлива от тепловой мощности газовой горелки и содержания диоксида углерода в топливе для выбора оптимальных размеров топочного пространства.*

В последнее время биогаз в качестве топлива для хозяйств и промышленных объектов становится более актуальным, что обусловлено высокой стоимостью природного газа и необходимостью использования возобновляемых источников энергии.

Целью работы является анализ влияния содержания углекислого газа (CO_2) в газозоообразной смеси, имитирующей биогаз, на длину пламени в зависимости от тепловой мощности газовой горелки и влияние длины пламени на выбор размеров топки.

Использование биогаза при сжигании в промышленных котлах и в коммунальном хозяйстве требует изменения горелочных устройств, которые в свою очередь были рассчитаны для сжигания природного газа. Это связано с тем, что основным отличием биогаза от природного газа является пониженное содержание метана (CH_4) – 50-75% (в природном газе – 90-99%) и наличие CO_2 в больших количествах.

Для достижения требуемой тепловой мощности в существующих горелочных устройствах биогаз, содержащий CO_2 в больших количествах, при горении создаёт более короткое пламя, в результате чего меняется процесс теплообмена в топочном пространстве.

Основные характеристики горения биогаза и характеристики отдельных газов, принятые по [1], а также данные, которые рассчитаны использованием зависимостей горения газообразного топлива, приведенных в [2], представлены в табл.1.

Таблица 1

Основные характеристики горения биогаза с различным содержанием диоксида углерода

Наименование показателей	Содержание диоксида углерода, β_{CO_2} , %						
	0	10	20	30	40	50	60
Нормальная скорость распространения пламени U_n , см/с	38,0	33,44	28,88	24,32	19,76	15,2	10,64
Температура пламени биогаза T_d , °С	1221	1193	1164	1145	1131	1120	1112
Концентрационная граница воспламенения биогаза верхняя L_B , %	15	16,4	18,1	20,1	22,7	26,1	30,6
Концентрационная граница воспламенения биогаза нижняя L_n , %	5	5,5	6,2	7,0	8,1	9,5	11,6
Отношение концентрационных границ воспламенения биогаза, L_B/L_n	3,0	2,97	2,93	2,88	2,82	2,74	2,63
Кинематическая вязкость, $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	14,7	13,29	12,11	11,13	10,30	9,58	8,95

Используя экспериментальную установку, которая описана в работе [3], исследуем влияние тепловой мощности и содержания CO_2 в биогазе на длину газового пламени. Природный газ с содержанием 0,84% CO_2 разбавляли диоксидом углерода в количестве 11,7-22% CO_2 , в результате длина факела уменьшалась соответственно на 16-28%. При одной и той же тепловой мощности по мере увеличения содержания CO_2 в смеси $CH_4 + CO_2$ длина биогазового факела становилась меньше, при этом факел становился более прозрачным.

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 2.

Полученные данные обрабатывались с использованием множественного регрессионного анализа методом Брандона, который описан в [4]. Для расчётов была использован программный продукт для Excel,

описание которого приведено в [5]. В надстройке реализован автоматический подбор пар «вид зависимости – фактор», всегда обеспечивающий выбор пары – лидера по коэффициенту корреляции с текущим откликом. Для конечного уравнения также выводится средняя относительная ошибка прогноза (аппроксимации).

Таблица 2

Результаты экспериментальных данных зависимости длины факела от тепловой мощности (насадок $d = 3$ мм) и содержания диоксида углерода в биогазе

Длина пламени, L , мм	Тепловая мощность газовоздушной смеси, Q , Вт	Содержание диоксида углерода, β_{CO_2} , %	Длина пламени, L , мм	Тепловая мощность газовоздушной смеси, Q , Вт	Содержание диоксида углерода, β_{CO_2} , %
132	180	0,84	478	883	0,84
227	335	22	490	1991	11,7
261	374	11,7	510	2844	11,7
300	410	0,84	531	1126	0,84
318	677	22	540	2767	0,84
372	533	0,84	560	1392	0,84
372	740	11,7	560	3060	0,84
380	1072	22	580	2246	0,84
410	1494	22	581	2518	0,84
430	1126	11,7	588	3332	0,84
430	1871	22	590	1656	0,84
447	2305	22	611	1994	0,84
469	1518	11,7	621	3719	0,84

При добавлении диоксида углерода в газовую смесь наблюдаем уменьшение длины пламени при истечении из насадка горелки диаметром 3 мм.

С помощью множественного регрессионного анализа методом Брандона получаем нелинейное уравнение регрессии, зависящее от двух параметров:

$$L = 453,5265 \cdot (0,0516 \cdot Q^{0,4077}) \times \quad (1)$$

$$\times (-0,07 \cdot 10^{-3} \cdot \beta_{CO_2}^2 - 6,8 \cdot 10^{-3} \cdot \beta_{CO_2} + 1,0779),$$

где L - длина газового пламени, мм; Q - тепловая мощность газовой смеси, Вт; β_{CO_2} - содержание в газовой смеси диоксида углерода, %.

При этом находим коэффициент множественной корреляции $R_{mn} = 0,91$, множественный критерий Фишера $F_{mn} = 4,4$ и табличное значение критерия Фишера $F_{mn} = 1,99$. Средняя относительная ошибка прогнозирования (аппроксимации) результирующего уравнения регрессии: 10,308%.

На основе проведённых расчётов строим поверхность трёхмерного уравнения регрессии (рис. 1).

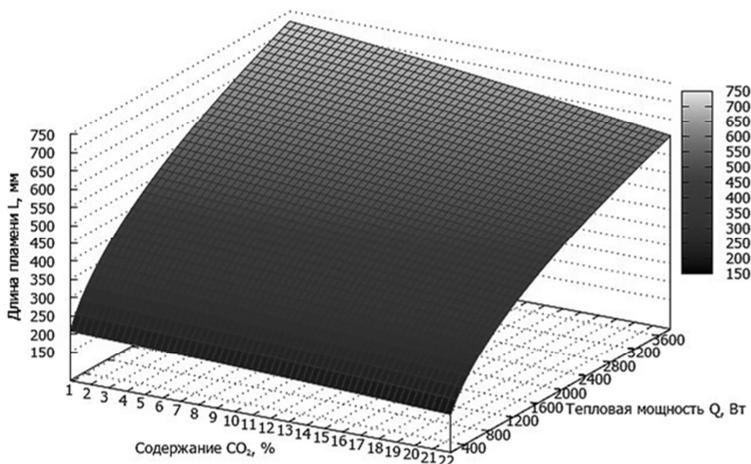


Рис. 1. Поверхность уравнения зависимости длины газового пламени L , мм, от тепловой мощности газозвушной смеси Q , Вт, и содержания в газовой смеси диоксида углерода, β_{CO_2} , %

Ранее авторами была рассмотрена зависимость между длиной биогазового пламени, содержанием углекислого газа в смеси и скоростью истечения из горелки [6]. В результате расчётов было получено уравнение (2):

$$L = 453,5265 \cdot (0,4191 \cdot W^{0,3954}) \cdot (1,1233 - 0,0131 \cdot \beta_{CO_2}), \quad (2)$$

где L - длина газового пламени, мм; W - скорость истечения газовой смеси, м/с; β_{CO_2} - содержание в газовой смеси диоксида углерода, %.

Используя уравнения (1) и (2) были рассчитаны длины пламени в зависимости от содержания CO_2 , от скорости истечения смеси и тепловой мощности горелки, а затем вычислены отношения длины пламени к длине пламени при содержании CO_2 равном 0. Результаты вычислений представлены в табл.3

Таблица 3

Отношение длины пламени биогаза к длине пламени
при содержании CO_2 равном 0

Содержание CO_2 , β_{CO_2} , %	0	0,84	11,7	22	30	35	40	50
Отношение длины пламени L в зависимости от тепловой мощности Q	1	0,9902	0,8636	0,7434	0,6501	0,5918	0,5335	0,4169
То же, от скорости W	1	0,9947	0,9173	0,8298	0,7523	0,6996	0,6438	0,5222

Как отмечается в [7] определение размеров камеры горения зачастую производится по допустимым теплонапряжениям объёма топки. Там же указывается, что такой метод в значительной мере субъективен и во многом зависит от опытности проектанта, так как в этом случае не учитывается характер работы горелок и полноценность использования объёма топки.

В работе [7] предлагается метод расчёта размеров камеры горения топки на основе характеристик горелок (длины пламени, угла раскрытия его и т.д.).

Для улучшения условий работы футеровки соприкосновение раскалённых продуктов сгорания со стенками топки должно быть после достижения максимальной температуры пламени, что, по данным приведенным в [7], происходит на расстоянии от $7,2d$.

Принимаем расстояние $10d$, тогда диаметр топки определяем по формуле, приведенной в [7]:

$$D_T = 2 \cdot 10d \cdot \sin(\gamma/2) + d, \quad (3)$$

где d – диаметр выходного сечения горелки, м; γ - угол раскрытия пламени, град.

Подставляя значение $\sin(\gamma/2)$, при значении угла раскрытия пламени 40° получим:

$$D_T = 20 \cdot 0,341 + d = 6,82d + d = 7,82d. \quad (4)$$

Длина топки определяется по формуле:

$$L = l_0 + \Delta l, \quad (5)$$

где l_0 - длина газового пламени, м; Δl – дополнительная длина камеры горения на выравнивание потока, которую можно принять равной $(0,4 \div 0,5)D_T$ [7].

В результате расчётов были определены размеры топки при расходе топлива $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ и диаметре выходного сечения горелки 30 мм и различном содержании диоксида в смеси. При этом учитывалось отношение длин пламени, приведенное в табл. 3. Результаты расчётов приведены в табл. 4

Таблица 4

Размеры топки в зависимости от содержания диоксида CO_2 в топливе при расходе топлива $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ и диаметре выходного сечения горелки 30 мм

Содержание CO_2 $\beta_{\text{CO}_2}, \%$	Отношение длины пламени в зависимости от скорости	Диаметр топки D_T , мм	Максимальная длина топки $L_T^{\text{max}}, \text{мм}$	Минимальная длина топки $L_T^{\text{min}}, \text{мм}$
0	1	367	551	461
0,84	0,9902	363	547	457
11,7	0,8636	317	500	411
22	0,7434	273	456	367
30	0,6501	239	422	332
35	0,5918	217	401	311
40	0,5335	196	379	290
50	0,4169	153	337	247

Используя данные табл. 3, можно определить длину пламени и геометрические размеры камеры горения топки по тепловой мощности теплоагрегата и содержанию диоксида углерода в смеси.

Выводы

1. В результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость длины газового пламени от тепловой мощности газовой смеси и содержания в газовой смеси диоксида углерода, которая описывается выражением (1).

2. На основе полученных зависимостей были определены длины пламени в зависимости от содержания CO_2 , от скорости истечения смеси и тепловой мощности горелки, а затем вычислены отношения длины пламени к длине пламени при содержании CO_2 равном 0, которые могут быть использованы при выборе геометрических размеров топки.

3. Предварительные расчёты показали, что одни и те же топки при содержании диоксида углерода до 20% могут использоваться как для природного газа, так и для биогаза (см. табл. 4).

Библиографический список

1. **Стаскевич Н. Л., Северинец Г. Н., Вигдорчик Д. Я.** Справочник по газоснабжению и использованию газа. Л.: Недра, 1990. 762 с.

2. **Иссерлини А.С.** Основы сжигания газового топлива. Л.: Недра, 1987. 336 с.

3. Экспериментальное исследование горения биогаза и его использование в промышленных котлах / И.Я. Сигал, А.В. Марасин, А.В. Смилуха и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 17 (139). С. 84–89.

4. **Деняк О.А.** Множественный регрессионный анализ методом Брандона в EXCEL // Логистика: современные тенденции развития. Ч.1: Материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. 7, 8 апреля 2016 г. /ред. кол.: В.С. Лукинский (отв. ред.) и др. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2016. С.108–111.

5. **Деняк О.А.** Множественная регрессия в EXCEL. [Сайт]. URL: <http://brandden.ucoz.com>.

6. **Захаров В.И., Парфилова Е.С.** Определение длины пламени при горении биогаза // Актуальные проблемы развития городов: Электр. сб. ст. по материалам II откр. респ. науч.-практ. конф. мол. уч. и студ. 01 марта 2018 г., Макеевка, 2018. С. 492–495.

7. **Исламов М.Ш.** Проектирование топок специального назначения. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 168 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫРАБОТКИ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

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

магистрант **Рудых В.Д.**

*Новосибирский государственный технический
университет, г. Новосибирск*

***Аннотация.** На сегодняшний день задачи повышения энергоэффективности ветроэнергетических установок, оптимизации их выработки являются актуальными ввиду непостоянства ветра, как источника энергии. Это способствует развитию, исследованию и использованию интеллектуальных систем для управления режимами работы ветроэнергетических установок. К таким системам относят в том числе и те, что построены с использованием алгоритмов на основе нечеткой логики. В данной статье представлены результаты исследований, направленных на поиск оптимальных функций принадлежности для нечетких множеств входных и выходных переменных. Эти переменные и их функции принадлежности используются в нечетких алгоритмах, сформированных для целей повышения выработки мощности ветроэнергетической установки при заданных условиях эксплуатации.*

Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 16-38-60080 «Нейро-нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетической установкой для повышения её энергоэффективности».

Ветроэнергетика является одним из перспективных направлений возобновляемой энергетики. Ресурс ветра находится в свободном доступе, неисчерпаем и не загрязняет окружающую среду. Оптимизация работы ветроустановок (ВЭУ), поиск инновационных способов управления – всё это делает ВЭУ более конкурентоспособными на рынке электроэнергии.

Большое внимание в работах зарубежных и отечественных ученых уделяется разработке новых интеллектуальных способов управления, которые позволят регулировать выработку ВЭУ в зависимости от тех или иных условий работы. В настоящее время довольно популярны

на техническом рынке методы искусственного интеллекта. К ним относятся и нечеткие алгоритмы. Уже разработаны в разной степени контроллеры на основе нечеткой логики, позволяющие управлять различными контурами ВЭУ, а именно – поворотом гондолы на ветер, изменением угла заклинения лопастей, изменением скорости вращения ротора, изменением длины лопасти. Эти устройства показали себя с лучшей стороны по сравнению со стандартными PI- и PID- контроллерами, так как имеют регулировочную характеристику наиболее близкую к желаемой [1].

Цель данной работы - выявить наиболее оптимальные функции принадлежности, которые используют контроллеры для изменения скорости вращения ротора ВЭУ и угла заклинения лопастей в программном пакете FuzzyLogicToolbox/Simulink/Matlab для повышения выработки мощности ветроэнергетической установки при заданных условиях эксплуатации.

Материалы и методы

Для достижения цели используется аппарат нечеткой логики. Функции принадлежности, лингвистические переменные для входных и выходных величин, правила нечетких продукций в виде: “если, то” вводятся в программный пакет FuzzyLogicToolbox/Simulink/Matlab для их последующего закрепления за одним из контроллеров, прописанных в Simulink/Matlab [2].

Исследование проведено для двух контуров управления ВЭУ, в качестве функций принадлежности рассматривались кусочно-линейная функция, синусоидальная, гауссовская [3].

Входными переменными для алгоритма изменения скорости ротора приняты изменение выходной мощности ΔP_0 и последующее изменение скорости ротора $L\omega_r$. Выходная переменная – изменение скорости ротора $\Delta\omega_r$. Блок схема нечеткого контроллера представлена на рис. 1.

В блоке фаззификации значения входных переменных преобразуются в соответствующие нечеткие множества с человеческими описательными и интуитивными значениями, такими как термы большой, средний, малый и нулевой. Правила логического вывода применяются с использованием следующего принципа: «если последнее изменение выходной мощности ΔP_0 во время поиска максимальной мощности положительно и велико, а последнее изменение желаемой скорости генератора $L\Delta\omega_r$ положительно, то мониторинг максимальной мощности будет продолжен с одинаковым положительным направлением с большим увеличением $\Delta\omega_r$ » [4].

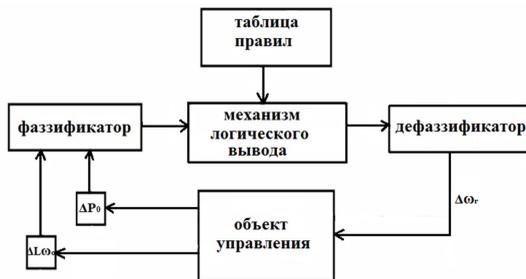


Рис. 1. Блок-схема реализации алгоритма на основе нечеткого вывода для регулирования скорости вращения ротора

Для алгоритма изменения угла атаки лопастей приняты следующие входные переменные: отклонение вырабатываемой ВЭУ мощности от номинального значения, которому присвоено пять функций принадлежности, скорость ветра, которой соответствуют три функции принадлежности, и последнее приращение вырабатываемой мощности ВЭУ, которая задана пятью функциями. Выходная переменная – изменение угла заклинения лопастей [5]. Блок-схема контроллера с алгоритмом на основе нечеткой логики для изменения угла заклинения лопасти ВЭУ приведена на рис. 2. При работе ВЭУ в зонах со скоростью ветра ниже номинальной угол заклинения будет равен нулю, чтобы турбина производила максимальную энергию. Контроллер отстроен по скорости ветра, то есть он начинает функционировать при скорости ветра выше номинальной, которая регламентирована в техническом паспорте ВЭУ.

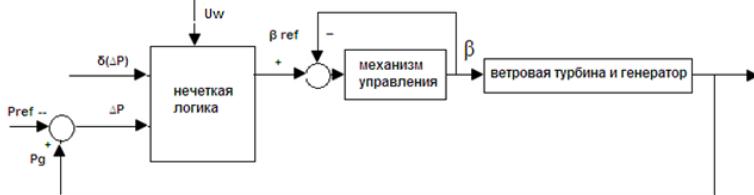


Рис. 2. Блок-схема контроллера с алгоритмом на основе нечеткой логики для изменения угла заклинения лопасти ВЭУ

Алгоритмы реализованы в Simulink/Matlab. Для примера, на рис. 3 приведен блок изменения угла заклинения лопастей [6].

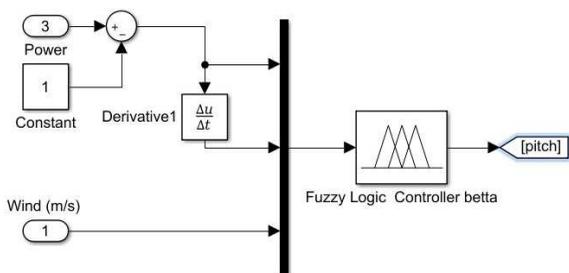


Рис. 3. Блок изменения угла заклинения с применением алгоритма на основе нечёткой логики

Результаты и выводы

Графические результаты, полученные в ходе моделирования работы алгоритма отличаются между собой незначительно и плохо различимы при сравнении графиков. В связи с чем, правильнее привести количественные результаты.

В табл. 1 приведены данные по выработанной энергии за одинаковый временной интервал при использовании разных функций принадлежности для контроллера управления скоростью ротора.

Таблица 1
Выработанная энергия для разных функций принадлежности контроллера скорости ротора

Функция принадлежности	$W_{ВЭУ}$, о.е.
Треугольная	201,357
Сигмоидальная	202,986
Гауссовская	205,781

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при одинаковых входных переменных, наиболее оптимальное изменение скорости ротора ($\Delta\omega_r$) на выходе достигается при использовании симметричной гауссовской функции принадлежности.

В табл. 2 приведены данные по выработанной энергии за одинаковый временной интервал при использовании разных функций принадлежности для контроллера управления углом заклинения лопасти. Исследования рассмотренного алгоритма показали, что его использо-

вание при больших скоростях ветра снижает нагрузку на компоненты турбины [7].

Таблица 2

Выработанная энергия для разных функций принадлежности контроллера угла заклинения лопастей

Функция принадлежности	$W_{ВЭУ}$, о.е.
Треугольная	319,527
Сигмоидальная	336,039
Гауссовская	327,305

При сравнении результатов выработанной энергии ВЭУ, полученных с помощью Simulink/Matlab при прочих равных условиях наблюдается увеличение выработанной энергии при использовании сигмоидальной функции принадлежности.

При использовании оптимальных функций принадлежности ВЭУ придет в точку максимальной выработки мощности быстрее, чем при использовании других функций.

Библиографический список

1. **Удалов С.Н.** Возобновляемая энергетика. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 607 с.
2. **Леоненков А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ–Петербург, 2005. 736 с.
3. **Зубова Н. В., Рудых В. Д.** Поиск оптимальных функций принадлежности нечетких множеств для оптимизации систем управления ветроэнергетической установкой // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 2 (95). С. 51–57.
4. Maximum power search in wind turbine based on fuzzy logic control / E. Adzic, Z. Ivanovic, M. Adzic, V. Katic // Acta Polytechnica Hungarica. 2009. Vol. 6, No 1. P. 131–149.
5. Pitch angle control for variable speed wind turbine / J. Zhang, M. Cheng, Z. Chen, X. Fu // DRPT2008. Nanjing, China, 2008. P. 1–6.
6. **Штовба С.Д.** Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. Разд. 1.7.5.7. ANFIS [Электронный ресурс]. URL: http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/1_7_5_7.php
7. **Степанчиков Д.М.** Алгоритмы управления ветроэнергетической установкой на основе нечеткой логики // Вестник Херсонского нац. техн. ун-та. 2018. № 1(64). С. 175–182.

О ПРИМЕНЕНИИ МУЛЬТИКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА ПРИ ВЫБОРЕ ХОЛОДИЛЬНОГО АГЕНТА ДЛЯ ПАРОКОМПРЕССИОННОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

канд техн. наук, проф. **Карнаух В.В.**¹
д-р техн. наук, проф. **Бирюков А.Б.**²
студентка **Шмелёва В.В.**¹

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

²Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

***Аннотация.** Проведен сравнительный анализ эффективности работы пароконденсационного теплового насоса типа «вода-вода» на природных и синтетических холодильных агентах, который включен в качестве дополнительного элемента в систему оборотного водоснабжения промышленного предприятия и предназначен для теплоснабжения близлежащих административно-бытовых зданий. Представлены результаты анализа эффективности работы пароконденсационного теплового насоса на R744, R600a и R1234ze на основе мультикритериального подхода.*

Непрерывный выброс парниковых газов в результате антропогенной деятельности человечества влечет за собой дальнейшее потепление и долгосрочные изменения во всех компонентах климатической системы, повышая вероятность тяжелых необратимых воздействий на здоровье населения и окружающую среду [1].

Так, из-за вредных выбросов в атмосферу продуктов сгорания за последние 40-50 лет планетарная температура повысилась на 0,6-0,7 °С и средний уровень океанов поднялся на 10-15 см. Спектр пагубных тенденций к 2020 г. может быть очень широким: от повышения уровня Мирового океана на 30-100 см до изменения климатических систем перераспределения осадков [8].

Одним из путей существенного сокращения выбросов парниковых газов и сохранения невозобновляемых энергоресурсов является использование энергосберегающих технологий на основе применения тепловых насосов в коммунальном и производственном теплоснабжении.

Целью данных исследований является анализ эффективности работы пароконденсационной теплонасосной установки (ТНУ), использующей в качестве рабочего вещества R744, R600a или R1234ze.

В качестве источника низкопотенциальной теплоты принимается теплота охлаждающей воды в системе оборотного водоснабжения промышленного предприятия.

На основании работ [2, 3] в качестве исследуемого объекта использовался тепловой насос типа «вода-вода» с рекуперативным теплообменником и переохладителем при выбранном режиме:

- источник низкопотенциальной теплоты: технологическая вода из системы оборотного водоснабжения ТЭЦ $t_n = 25^\circ\text{C}$;
- потребитель: административно-бытовое помещение $t_b = 60^\circ\text{C}$ (на горячее водоснабжение);
- температура кипения холодильного агента $t_0 = 10^\circ\text{C}$.

Холодильные агенты, используемые для сравнительного анализа, представляют собой: природные, такие как R744, R600a, и хладагент четвертого поколения R1234ze. Основные характеристики холодильных агентов приведены в табл. 1 [6, 7].

Таблица 1
Основные характеристики холодильных агентов

Холодильный агент	R744	R600a	R1234ze
Химическая формула	CO ₂	C ₄ H ₁₀	CF ₃ CH=CHF
Молекулярная масса, кг/кмоль	44,1	58,1	114
Нормальная температура кипения при $p = 1$ атм, К	194,6	261,2	254
Критическая температура, К	304,1	407,98	382,4
Критическое давление $p_{кр}$, бар	73,8	36,846	36,36
Потенциал разрушения озонового слоя ODP	0,0	0,0	0,0
Потенциал глобального потепления GWP	0,0	0,01	0,00
Класс безопасности	A1	A3	A2

Построение термодинамических циклов работы ТНУ на предлагаемых холодильных агентах при заданных режимах и соответствующие расчеты проводились с использованием прикладных программ Simpleone-stage CO₂ (IPU@DanskEnergi, freeware), CoolPack (IPU@Mechanical Engineering Technical University of Denmark, freeware) и Microsoft Excel 2010.

В качестве примера показан термодинамический цикл для R1234ze на фазовой диаграмме Log (p)- h при $t_0=10^\circ\text{C}$, $t_k=60^\circ\text{C}$ (рис. 1). Были построены циклы при варьировании температуры низкопотенциального источника от 15°C до 40°C , что приближает расчеты к реальным условиям, но за «основной» режим принята $t_n=25^\circ\text{C}$.

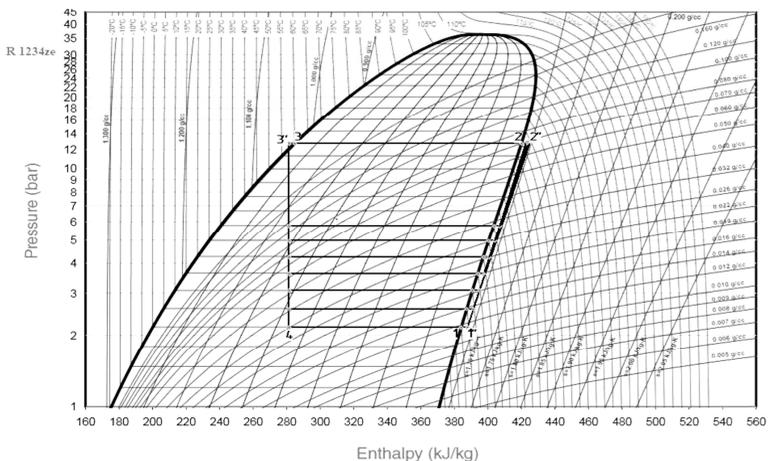


Рис. 1. Термодинамический цикл парокомпрессионной одноступенчатой ТНУ, работающей на R1234ze при переменной температуре испарения, в том числе $t_0=10^\circ\text{C}$ и $t_k=60^\circ\text{C}$

Эффективность работы одноступенчатого парового компрессора с водяным охлаждением оценивались по алгоритму, приведенному в [2, 3, 5].

Расчетные параметры рабочих веществ были сведены в табл. 2.

Для выполнения сравнительного анализа был использован мультикритериальный подход, хорошо себя зарекомендовавший при расчетах [4].

Мультикритериальный алгоритм сравнительного анализа реализуется следующим образом:

– для каждого критерия выбрано «желаемое» значение критерия $D_i=D_{max}$ и $D_i=D_{min}$;

– если абсолютное значение выбранного параметра должно стремиться к минимальному значению, то $D^0_{absREF_i}$ вычисляется по формуле (1):

$$D^0_{absREF_i} = \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} ; \quad (1)$$

– если абсолютное значение выбранного параметра должно стремиться к максимальному значению, то $D^0_{absREF_i}$ вычисляется по формуле (2):

$$D^0_{absREF_i} = \frac{D_{\max} - D_i}{D_{\max} - D_{\min}} . \quad (2)$$

Таблица 2

Расчетные параметры холодильных агентов
при $t_0=10\text{ }^\circ\text{C}$ и $t_k=60\text{ }^\circ\text{C}$

Параметр	Холодильный агент		
	R744	R600a	R1234ze
Тепловая нагрузка испарителя, q_0 , кДж/кг	126,25	264	116
Тепловая нагрузка на конденсатор, q_t , кДж/кг	163,39	313	141
Удельная тепловая нагрузка для переохлаждителя, $q_{по}$, кДж/кг	8	8	8
Общая тепловая нагрузка теплового насоса, $q_{тн}$, кДж/кг	170,39	321	149
Работа сжатия в компрессоре, $l_{сж}$, кДж/кг	34,2	57	27
Эксергетический к.п.д. теплового насоса, η_e	0,48	0,52	0,52
Коэффициент преобразования теплоты COP (μ)	4,98	5,63	5,52
Тепловой эквивалент электроэнергии, потребляемой компрессором на сжатие рабочего вещества, кДж/кг	42,52	63,16	29,92

В ходе выполнения расчетов определяется обобщенный критерий D_{absREF} , минимальное значение которого соответствует лучшему рабочему веществу из представленных.

Расчитанные критерии для R744, R600a, R1234ze представлены в сводной табл. 3.

Таблица 3

Оценка критериев предлагаемых рабочих веществ

Параметр	Холодильный агент						
	К	R744	R600a	R1234ze	D_{\max}	D_{\min}	ΔD
Общая тепловая нагрузка теплового насоса $q_{\text{тн}}$, кДж/кг	К1	170,39	321,0	149	321	149	172
Эксергетический к.п.д. ТН η_e	К2	0,48	0,52	0,52	0,52	0,48	0,04
Коэффициент преобразования теплоты COP (μ)	К3	4,98	5,63	5,52	5,63	4,98	0,65
Потенциал разрушения озонового слоя ODP	К4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Потенциал глобального потепления GWP	К5	0,0	0,01	7,0	7,0	0,0	7,0
Индекс воспламеняемости	К6	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0

Результаты сравнения обобщенных критериев показаны на рис. 2, где продемонстрировано преимущество природного холодильного агента R600a.

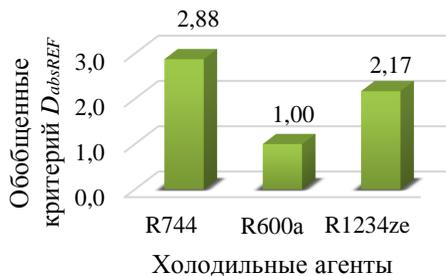


Рис. 2. Мультикритериальный выбор хладагентов при $t_0 = 10^\circ\text{C}$ и $t_k = 60^\circ\text{C}$

В теплонасосных установках можно использовать различные хладагенты, но выбор должен основываться на аспектах экологичности, безопасности, эффективности и выполнимости конструктивных элементов.

На основании выполненного мультикритериального анализа, учитывающего как термодинамические, так и экологические показатели, установлено, что природный хладагент R600a может рассматриваться как наилучший хладагент для парокомпрессионного теплового насоса типа «вода-вода» для горячего водоснабжения административно-бытовых зданий.

Целью дальнейших работ является развитие метода мультикритериального анализа рабочих веществ ТНУ.

Библиографический список

1. Изменение климата, 2014 г. Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Р.К. Пачаури, М.Р. Аллен, В.Р. Баррос; Под ред. Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер. Женева, Швейцария: МГЭИК, 2014. 163 с.
2. **Карнаух В.В., Бирюков А.Б., Шмельёва В.В.** Теоретические исследования применения природных хладагентов на примере диоксида углерода в высокотемпературных тепловых // Энергетические системы: сб. трудов II Междунар.-науч.-техн. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. С. 39–47.
3. Comparative analysis of different refrigerants used in a high-temperature vapor-compression heat pump / V.V. Karnaukh, A.B. Biryukov, V.A. Mazur, K.A. Rzheshik // Int. J. of Energy for a Clean Environment. 2017. Vol.18 (2). P.161–174.
4. **Karnaukh V.V., Mazur V.A., Biryukov A.B.** Trade-off working fluid selection for heat pumps // Proceeding of the Minsk International Seminar Held 10-13 September 2018. Minsk, Belarus, 2018. С. 337-345.
5. **Трубаев П.А., Гришко Б.М.** Тепловые насосы: Учеб. пос. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 142 с.
6. Хладагенты группы ГФО и их особенности / Б.С. Бабакин, Г.В. Борщев, С.Б. Бабакин, А.Г. Белозеров // Холодильная техника. 2017. № 6. С. 37–41
7. The Environmental Alternative to Traditional Refrigerants [Сайт]. URL: <http://honeywell-refrigerants.com>
8. **Белусов В.Н., Смородин С.Н., Лакомкин В.Ю.** Энергосбережение и выбросы парниковых газов (CO₂): учебное пособие. СПб.: СПбГТУРП, 2014. 52 с.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПО ПРИВЕДЁННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ RDF-ТОПЛИВ

ст. преп. **Корнилова Н.В.**

д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**

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

***Аннотация.** Предложен метод расчета потерь теплоты и коэффициента полезного действия методом обратного баланса на основе данных газового анализа, который может быть использован для оперативной оценки работы установок при сжигании отходов различного вида. С учетом того, что на практике в составе отходящих газов определяется только содержание кислорода и монооксида углерода, разработан расчет потерь теплоты с отходящими газами с использованием значений только этих компонентов, без использования значения содержания в продуктах горения углекислого газа. Проанализированы потери теплоты для котлов и печей малой мощности, предложен метод расчета потерь теплоты для этих установок. На основании анализа конструктивных параметров твердотопливных котлов для сжигания низкокалорийного топлива и отходов деревообработки, была получена зависимость удельной площади внешней поверхности котла от мощности. Предложенная методика апробирована при расчете потерь в водогрейном твёрдотопливном котле со слоевой топкой конструктивной мощностью 200 кВт при сжигании брикетированных отходов.*

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

Использование различных биологических топлив и RDF совместно с традиционными органическими топливами требует информации о характеристиках процесса горения и методов оценки эффективности установок для сжигания отходов при сжигании топлива в различных пропорциях [1]. Биотопливо в связи с разнообразием источников характеризуется большой вариацией физических и химических свойств, что оказывает влияние на эффективность горения [2]. Наличие RDF топлива оказывает заметное влияние на характеристики горения, эффективность сгорания уменьшается, когда RDF в смеси выше 10% [3].

Традиционный метод определения к.п.д. при сжигании топлива методом прямого баланса для установок для сжигания отходов обладает низкой точностью, так как биотопливо характеризуется большой вариацией физических и химических свойств [2, 4]. Так же часто установки работают в нестационарных режимах с периодической нагрузкой RDF-топлива. В этих случаях расчет теплового баланса и расчет к.п.д. с применением прямого метода характеризуется высокой погрешностью и необходимо использовать расчеты по обратному балансу. В эксплуатационных условиях метод обратного баланса при одинаковой точности замеров обеспечит большую точность при определении к.п.д. по сравнению с методом прямого баланса и требует меньшего количества измеряемых параметров.

1. Определение к.п.д. котлов по обратному балансу с использованием приведенных характеристик топлив

Для промышленных установок, работающих на специфических топливах, М.Б. Равичем разработана методика теплотехнических расчетов по приведенным характеристикам топлива, которая обладает возможностями для обобщения, упрощения и повышения точности расчетов [5]. К.п.д. в этом случае определяется через удельные потери теплоты, отнесенные к теплоте сгорания топлива:

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \%, \quad (1)$$

где q_2 – потери с отходящими газами; q_3 – потери от химической неполноты сгорания (химическим недожогом); q_4 – потери от механической неполноты сжигания топлива; q_5 – потери в окружающую среду через корпус печи; q_6 – потери с физической теплотой золы.

В работе предложена разработка метода расчета потерь теплоты и к.п.д. установок по сжиганию отходов методом обратного баланса на основе данных газового анализа. С учетом того, что на практике в составе отходящих газов определяется только содержание кислорода O_2 и монооксида углерода CO , разработан расчет потерь теплоты с отходящими газами q_5 с использованием значений только этих компонентов. Проанализированы потери теплоты для установок малой мощности, предложен метод расчета потерь теплоты q_5 для этих установок.

Рассмотрим расчет удельных потерь теплоты.

Потери с отходящими газами q_2

Коэффициент избытка воздуха α по составу отходящих газов может быть определен по формуле:

$$\alpha = 21 / (21 - O_2 - 0,5CO).$$

При сгорании топлива с избытком воздуха ($\alpha > 1$) удельные потери теплоты с отходящими газами q_2 определяются по выражению

$$q_2 = 100 \frac{t_{ог} - t_в}{t_{max}} = (c' + (h - 1) \cdot b \cdot k) = (t_{ог} - t_в) Z, \quad (2)$$

где $t_{ог}$ – температура отходящих газов, °С; $t_в$ – температура воздуха, подаваемого на горение, °С; t_{max} – жаропроизводительность топлива или максимальная температура, которая может быть получена при полном сгорании влажного топлива в теоретически необходимом объеме сухого воздуха при температуре 0°С и отсутствии потерь теплоты, определяемая расчетным путем, °С; Z – приведенный коэффициент, характеризующий потери в окружающей среде.

Коэффициенты, входящие в выражение (2), определяются следующим образом.

Коэффициент c' – отношение средней удельной объемной теплоемкости продуктов горения $c_{пг}$ и $c_{пг max}$ (определённых для теоретических условий при $\alpha = 1$) в интервале температур от 0°С до $t_{пг}$ и t_{max} соответственно:

$$c' = c_{пг} / c_{пг max}.$$

Коэффициент h – изменение объема сухих продуктов горения по сравнению с теоретическим вследствие разбавления их воздухом. При горении твердого топлива (без учета содержания CH_4 в продуктах недожога) он определяется по выражению

$$h = CO_2^{max} / (CO_2' + CO'),$$

где CO_2^{max} – содержание CO_2 в сухих продуктах сгорания в теоретических условиях (при $\alpha = 1$), %; CO_2' , CO' – содержание газов в сухих продуктах горения, %.

Содержание CO_2' в продуктах горения, как правило, не определяется. При недожоге часть объема CO_2 заменяется на равный ему объем CO , при этом в продуктах горения и отходящих газах увеличивается объем O_2 на величину, равную 0,5 от объема CO . Таким образом объем сухих продуктов горения $V'_{сух.пг}$ при недожоге может быть определён из объема сухих продуктов полного сгорания $V_{сух.пг}$ следующим образом:

$$V'_{сух.пг} = V_{сух.пг} + 0,5 \frac{CO'}{100} V'_{сух.пг} \quad \text{или} \quad V'_{сух.пг} = \frac{V_{сух.пг}}{1 - 0,005CO'}.$$

Содержание CO'_2 , %, в сухих продуктах горения при недожоге $V'_{\text{сух.пг}}$ может быть определено по содержанию углекислого газа при полном сгорании топлива по выражению:

$$\text{CO}'_2 = \frac{V_{\text{CO}_2} - 0,01\text{CO}'V'_{\text{сух.пг}}}{V'_{\text{сух.пг}}} = \text{CO}_{2\text{сух}}(1 - 0,005\text{CO}') - \text{CO}'$$

где CO_2 – расчетное процентное содержание углекислого газа в сухих продуктах полного сгорания при действительном расходе воздуха; CO' – содержание окиси углерода в отходящих газах, определенный по результатам газового анализа, %.

Таким образом

$$h = \text{CO}_2^{\text{max}} / (\text{CO}_{2\text{сух}}(1 - 0,005\text{CO}'))$$

При отсутствии данных по содержанию CO коэффициент h может быть определен по расчету горения топлива

$$h = \text{CO}_2^{\text{max}} / \text{CO}_2^{\text{расч}} = V_{\text{сух.пг теор}} / V_{\text{сух.пг теор}}$$

где $\text{CO}_2^{\text{расч}}$ – расчетное содержание CO_2 , %, в сухих продуктах сгорания при заданном α ; $V_{\text{сух.пг теор}}$ – объём сухих продуктов сгорания при $\alpha = 1$.

Коэффициент b – соотношение объемов сухих и влажных продуктов горения в теоретических условиях (при $\alpha = 1$):

$$b = (V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}) / (V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}})$$

где V_{CO_2} , V_{N_2} , $V_{\text{H}_2\text{O}}$ – объём в продуктах горения CO_2 , N_2 , H_2O , м^3 .

Коэффициент k – отношение средней удельной объемной теплоемкости воздуха $c_{\text{в пг}}$ в интервале температур от 0°C до $t_{\text{пг}}$ и продуктов горения $c_{\text{пг max}}$ (определённых при $\alpha = 1$) в интервале температур от 0° до t_{max}

$$k = c_{\text{в пг}} / c_{\text{пг max}}$$

Потери от химической неполноты сгорания q_3

Потери тепла от химической неполноты сгорания q_3 определялись по формуле:

$$q_3 = 100 Q_{\text{нед}} h / p$$

где $Q_{\text{нед}}$ – теплота сгорания продуктов недожога, содержащихся в продуктах горения, кДж/м³;

$$Q_{\text{нед}} = 126,4CO,$$

где CO – содержание газов в продуктах сгорания, %; p – низшая рабочая теплота сгорания топлива, отнесенная к 1 м³ сухих продуктов горения, образующихся при сжигании в теоретических условиях (при $\alpha = 1$).

Потери от механической неполноты сжигания топлива q_4

Потерями теплоты от механической неполноты сжигания топлива q_4 пренебрегаем, т.к. на практике состав и расход сжигаемых отходов определен с большой степенью неточности, и из-за больших размеров брикетов уноса частиц несгоревшего топлива из котла нет.

Потери через стенки котла q_5

В отличие от остальных составляющих общего к.п.д. η для расчета удельных потерь теплоты q_5 необходимо знать величину теплоты Q , кВт, поступающей в печь. Потери теплоты через стенки котла q_5 , %, имеют вид:

$$q_5 = Q_{\text{ст}}/Q \cdot 100\%,$$

где $Q_{\text{ст}}$ – потери теплоты через стенки, кВт.

Величина $Q_{\text{ст}}$ может быть определена по значению расхода топлива и его теплоте сгорания или по мощности и к.п.д. котла или печи:

$$q_5 = 0,01\eta \frac{Q_{\text{ст}}}{P} = \frac{Q_{\text{ст}}}{G_T Q_H^p} 100\%,$$

где G_T – расход топлива, кг/с; $Q_{\text{ст}}$ – потери теплоты через стенки, кВт; P – мощность, кВт.

Потери через стенки q_5 для печей или котлов малого объема будут значительные из-за большого значения отношения площади поверхности к внутреннему объему. В общем случае с учетом величины потерь $Q_{\text{ст}}$, кВт, можно записать в виде:

$$Q_{\text{ст}} = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \sum \frac{x_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}} \right)^{-1} F_{\text{ст}}(t_{\text{г}} - t_{\text{в}}), \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{вн}}$, $\alpha_{\text{нар ст}}$, $\alpha_{\text{нар св}}$ – коэффициенты теплоотдачи от газов к внутренней поверхности стенки печи (котла) и от наружных стенок и свода в окружающую среду, Вт/(м²·К); x_i , λ_i – толщина, м, и коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), слоев, составляющих конструкцию стен-

ки; $F_{ст}$, $F_{св}$ – площадь поверхности стенки и свода печи, m^2 ; t_T , t_B – средняя температура внутри печи (котла) и окружающей среды, $^{\circ}C$.

На основании анализа конструктивных параметров твердотопливных котлов для сжигания низкокалорийного топлива и отходов деревообработки, была получена зависимость удельной площади внешней поверхности котла $f_{ст}$, $m^2/kВт$, от мощности P (рис. 1):

$$f_{ст} = \frac{F_{ст}}{P} = 0,00656 + \frac{1,23}{P^{0,5}}. \quad (4)$$

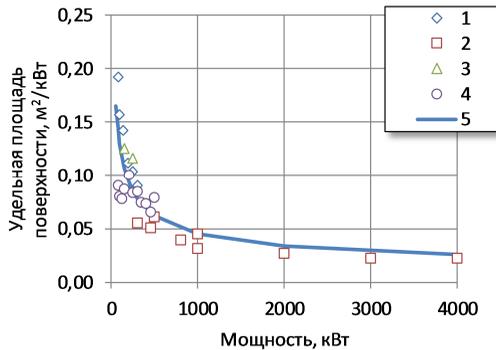


Рис. 1. Зависимость удельной поверхности твердотопливных котлов для сжигания низкокалорийного топлива от их мощности:

- 1 – Котлы АО «Мотор-Сич» (Украина); котлы НПП «Белкотломаш» (Беларусь);
- 2 – серия КВ-PM2;
- 3 – серия КВ-Срм (отходы деревообработки);
- 4 – промышленные котлы "ТЕПЛОВЪ Т" (ООО «ЗКО Теплов», Россия);
- 5 – аппроксимирующая кривая (4)

В уравнение (4) определение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{вн}$ от газов к внутренней стенке печи вызывает ряд трудностей, так как имеющиеся в нормативной литературе [6, 7] зависимости получены для котлов большой производительности при сжигании традиционного топлива, а расчетные формулы для инженерных расчетов процессов теплообмена, приведенные с справочнике [8] и аналогичных, получены для идеализированных условий, значительно отличающихся от рассматриваемых.

Можно принять допущение, что внутренняя температура стенки печи или котла равна средней температуре продуктов горения t_T .

По табличным данным, приведенным в работах [7, 9] получены уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи от наружной стенки котлов в окружающую среду, которые включают теплообмен конвекцией и излучением, Вт/(м²·К):

$$\alpha_{\text{нар}} = 5,7 + 0,14t_{\text{ст нар}} - 6,65 \cdot 10^{-4}t_{\text{ст нар}}^2 + 1,7 \cdot 10^{-6}t_{\text{ст нар}}^3 \quad (5)$$

для которой диапазон применения: $t_{\text{ст нар}} = 25 \dots 200^\circ\text{C}$; средняя ошибка аппроксимации 0,9%; максимальная ошибка аппроксимации 3,2%, или

$$\alpha_{\text{нар}} = 7 + 0,072t_{\text{ст нар}}, \text{ при } t_{\text{ст нар}} = 0 \dots 500^\circ\text{C}. \quad (6)$$

для которой диапазон применения: $t_{\text{ст нар}} = 25 \dots 500^\circ\text{C}$; средняя ошибка аппроксимации 4,2%; максимальная ошибка аппроксимации 7,9%.

Согласно «Правил устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов» наружная поверхность элементов водогрейных котлов должна быть не более 45°C при выработке горячей воды с температурой до 115°C и не более 55°C при выработке горячей воды с более высокой температурой.

На рис. 2 представлены полученные с использованием уравнений (3) и (4) зависимости для определения потерь q_5 по известной температуре наружной поверхности корпуса котла или печи, определённые по выражению

$$Q_{\text{ст}} = \alpha_{\text{нар}} F_{\text{ст}} (t_{\text{г}} - t_{\text{в}}) = (7 + 0,072t_{\text{ст нар}}) F_{\text{ст}} (t_{\text{г}} - t_{\text{в}}). \quad (7)$$

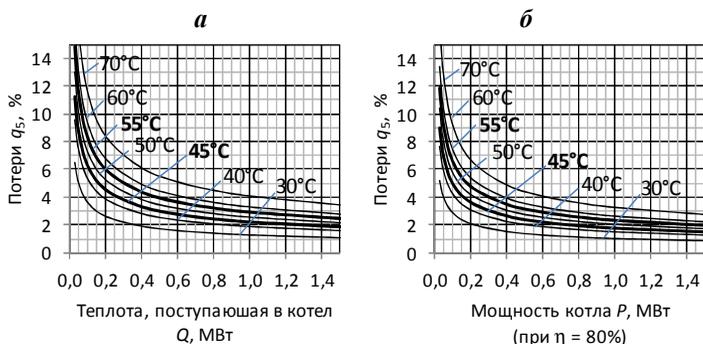


Рис. 2. Потери теплоты в окружающую среду при разной температуре наружной поверхности корпуса и температуре окружающей среды 0°C:

а – в зависимости от количества теплоты, поступившей в котел или печь;

б – в зависимости от мощности котла

Недостаток применения уравнения (7) заключается в большой погрешности, связанной с усреднением температур поверхности и влиянием на коэффициент теплоотдачи различных факторов. Для более точного расчета

Таким образом для расчета потерь теплоты в окружающую среду по известной температуре наружной поверхности стенки установки можно использовать упрощенное уравнение (3) с учетом уравнений (4) и (6):

$$Q_{\text{ст}} = \left(\sum \frac{x_i}{\lambda_i} + \frac{1}{7 + 0,072t_{\text{ст.нар}}} \right)^{-1} F_{\text{ст}}(t_{\text{г}} - t_{\text{в}}) \text{ или} \quad (8)$$

$$Q_{\text{ст}} = \left(\sum \frac{x_i}{\lambda_i} + \frac{1}{7 + 0,072t_{\text{ст.нар}}} \right)^{-1} (0,00656P + 1,23P^{0,5})(t_{\text{г}} - t_{\text{в}}).$$

Потери с физической теплотой золы q_6

При условии отсутствия уноса потери с теплотой удаляемой из котла золы:

$$q_6 = h_3 A^{\text{п}} / Q_{\text{н}}^{\text{п}},$$

где h_3 – теплосодержание золы, кДж/кг, которое может быть определено по выражению $h_3 = c_3 t_3$. Теплємкость золы приведена в работе [6], используя значение из этой работы было получено уравнение линейной регрессии $h_3 = 0,96 t_3$, с использованием которого потери с физической теплотой золы примут вид:

$$q_6 = 0,96 t_3 A^{\text{п}} / Q_{\text{н}}^{\text{п}}.$$

Расчет приведенных коэффициентов для RDF-топлива различного вида

Предложенная методика упрощенных теплотехнических расчетов применена для котла, в котором сжигались два вида RDF-топлив:

- пластик 30% древесина 70%;
- пластик 50% древесина 50%.

Был произведен расчет потерь в водогрейном твёрдотопливном котле со слоевой топкой конструктивной мощностью 200 кВт при сжигании брикетированных отходов. Каждая серия измерений соответствовала одной закладке топлива. Испытания проводились в течении трех дней, на рис. 3 и 4 представлены параметры работы котла и результаты определения потерь.

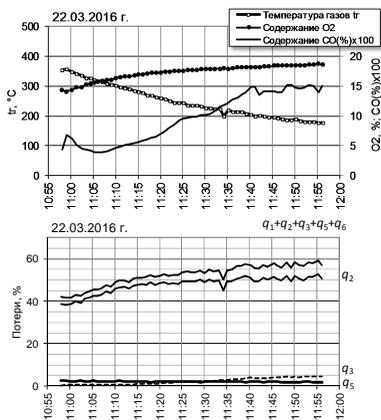


Рис. 3. Данные измерений и расчетные значения потерь теплоты при сжигании брикетов, состоящих из 70% древесины 30% пластика

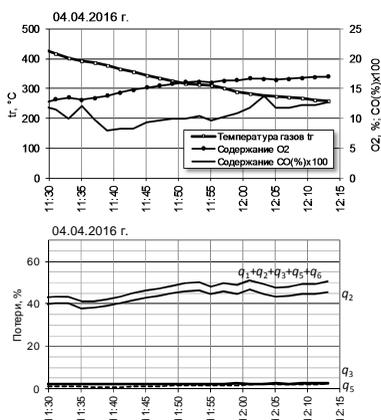


Рис. 4. Данные измерений и расчетные значения потерь теплоты при сжигании брикетов, состоящих из 50% древесины 50% пластика

При испытании котлы работали с периодической загрузкой, поэтому приведенные данные включают как период интенсивного горения, так и догорания остатков топлива. Это позволило применить предложенную методику для режима горения с разной эффективностью. Полученные значения потерь составляли:

- с отходящими газами q_2 : 38,0...53,0%;
- с химическим недожогом q_3 : 0,2...5,0%;
- в окружающую среду q_5 : 1,6...2,5%;
- общий к.п.д. котла: 40,0...60,0%;

Таким образом с использованием предложенной методики возможно производить расчет теплового баланса котлов и печей по упрощенной методике при сжигании отходов различного вида.

Выводы

1. Разработан метода расчета потерь теплоты и коэффициента полезного действия установок по сжиганию отходов методом обратного баланса на основе данных газового анализа. С учетом того, что на практике в составе отходящих газов определяется только содержание кислорода и монооксида углерода, разработан расчет потерь теплоты с отходящими газами с использованием значений только этих компонентов, без использования значения содержания в продуктах горения

углекислого газа. Расчетное процентное содержание углекислого газа и кислорода в сухих продуктах полного сгорания при действительном расходе воздуха определялось с учетом значения недожога.

2. Проанализированы потери теплоты для котлов и печей малой мощности, предложен метод расчета потерь теплоты q_5 для этих установок. На основании анализа конструктивных параметров твердотопливных котлов для сжигания низкокалорийного топлива и отходов деревообработки, была получена зависимость удельной площади внешней поверхности котла от мощности. Предложены графические зависимости определения удельной потери теплоты в окружающую среду при разной температуре наружной поверхности корпуса и температуре окружающей среды в зависимости от количества теплоты, поступившей в котел или печь и в зависимости от мощности котла.

3. С использованием предложенной методики был произведен расчет потерь в водогрейном твердотопливном котле со слоевой топкой конструктивной мощностью 200 кВт при сжигании брикетированных отходов.

Библиографический список

1. **Нупа М.** Interaction of fuels in co-firing in FBC // Fuel. 2005. No 84(10). P. 1312–1319.
2. Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach – identification of the controlling factors / Y.B. Yang, C. Ryu, A. Khor at al // Fuel. 2005. No 84(16). P. 2116–2130.
3. **Sever Akdağ A., Atımtay A., Sanin F. D.** Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples // Waste Management. 2016. No 47(B). P. 217–224.
4. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills / J. Faitlia, T. Magyara, A. Erdélyib, A. Murányic // Waste Management. 2015. No 36. P. 213–221.
5. **Равич М.Б.** Упрощенная методика теплотехнических расчётов. М.: Изд-во АН СССР, 1966. 407 с.
6. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Под ред. Н. В. Кузнецова и др. М.: Энергия, 1973. 296 с.
7. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
8. **Кутателадзе С.С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
9. **Кацевич Л.С.** Расчет и конструирование электрических печей. М.: Госэнергоиздат, 1959. 440 с.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПРИ СЖИГАНИИ БРИКЕТИРОВАННЫХ RDF-ТОПЛИВ

ст. преп. **Корнилова Н.В.**

д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**

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

***Аннотация.** Из обзора существующего положения сделан вывод, что сжигание твердых коммунальных отходов является эффективным способом утилизации, но в настоящее время промышленные технологии для сжигания отходов разработаны только для мощности свыше 100 тыс. т отходов в год. Целью работы являлось исследование сжигания в пирролизном водогрейном котле малой мощности брикетов по сравнению с цельнокусковой древесиной и исследование сжигания в водогрейном котле малой мощности со слоевой топкой брикетов различного состава. Установлено, что процесс горения в котлах малой мощности характеризуется низким тепловым к.п.д. (50...74%). Характеристики процесса горения RDF-топлива сопоставимы с характеристиками сжигания древесины и древесных брикетов. Сжигание топливных брикетов характеризовалось большей эффективностью, чем сжигание цельнокусковой древесины. Сделан вывод о целесообразности сжигания отходов в установках малой производительности, но для обеспечения полного сгорания и необходимых температур процессы горения и отбор теплоты необходимо конструктивно разделить.*

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Организация утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является одной из сложных технических проблем, которая включает материально-техническое обеспечение, вопросы экологии, энергетические и экономические аспекты [1]. В работе [2] отмечается, что утилизация ТКО не является чисто экономическим инвестиционным проектом, а является необходимым условием существования общества, от которой нельзя отказаться.

Полигон является основным методом утилизации ТКО в большинстве стран [3]. Экологические требования, в частности возмож-

ность загрязнения подземных вод, и утилизация выделяющегося свалочного газа приводит к увеличению стоимости захоронения [4]. Один из эффективных способов утилизации отходов является термическая переработка с выработкой энергии [4, 5], которое при получении тепловой энергии также позволяет снизить затраты на утилизацию отходов [6]. Дополнительным преимуществом рекуперации энергии из отходов путем сжигания является то, что для получения энергии могут быть использованы ТКО с широким диапазоном качества [7].

В работе [8] показано, что с экономической точки зрения в большинстве случаев тепловая обработка наиболее эффективна по сравнению с другими способами утилизации ТКО. Сравнение «жизненного цикла» отходов, включающее экономические и экологические аспекты, проведенное в работе [8] показало, что биологические способы переработки предпочтительны с экологической точки зрения, в то время как сжигание и газификация – с экономической.

В ряде работ [4, 9] предложены критерии, которые позволяют провести первоначальную оценку таких проектов. Решения для комбинированного производства электроэнергии и теплоты является эффективным в том случае, когда имеется крупный потребитель тепловой энергии [10]. В работе [11] произведен анализ сжигания RDF-топлива (альтернативного топлива, полученного измельчением и сушкой сортированных ТКО) на электростанции на основании второго закона термодинамики и сделан вывод, что эффективность системы в целом очень низкая и основные качественные потери энергии происходят при парогенерации. Такие же выводы сделаны в работе [12], где выполнен энергетический анализ парового котла, сжигающего отходы. Наивысший к.п.д. установок для сжигания отходов составляет не более 65-70% [6].

Использование альтернативного топлива по воздействию на окружающую среду сопоставимо с традиционными энергетическими установками на органическом топливе [5]. Но в настоящее время технологии сжигания разработаны для крупномасштабного производства с обработкой отходов массой более 100 тыс. т в год [13, 14]. Эффективность сжигания отходов небольших городов рассмотрена в ряде работ. В работе [15] на основе анализа городов с населением 100, 500 тыс. и 1 млн. человек показана увеличение эффективности выработки электроэнергии из отходов вместо из захоронения на полигоне при увеличении размера населенного пункта. В работе для среднего района [16] проанализированы показатели промышленных технологий сжи-

гания и газификации и сделан вывод, что наилучшие экономические показатели характерны для использования несортированных отходов.

Из обзора существующего положения можно сделать вывод, что сжигание является эффективным способом утилизации отходов при условии соблюдения теплотехнических и экологических требований. Но в настоящее время промышленные технологии для сжигания ТКО разработаны только для мощности свыше 100 тыс. т отходов в год (10 т/час).

Целью работ являлось: 1) исследование сжигания в пиролизном водогрейном котле малой мощности брикетов по сравнению с цельнокусковой древесиной, на которую рассчитана конструкция котла; 2) исследование сжигания в водогрейном котле малой мощности со слоевой топкой брикетов различного состава.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Установки и приборная база для исследования

В работе исследовались две установки, в которых производилось сжигания отходов:

1. Пиролизный водогрейный котел мощностью 100 кВт.

Котел представляет цельносварную конструкцию из стали, которая состоит из двух камер сгорания. Нижняя камера – камера газификации, в которой при ограниченном поступлении кислорода и высокой температуре топливо разлагается на твердую фракцию и летучую часть. Верхняя камера предназначена для дожигания выделившегося газа.

2. Водогрейный котел со слоевой топкой мощностью 200 кВт.

Котёл представляет цельносварную конструкцию. Топливо сжигается на колосниковой решетке, поддув воздуха может быть как естественный, так и дутьевым вентилятором. Стены котла теплоизолированы минеральной ватой Izovol СТ-40.

Котлы установлены на производственной площадке, расположенной в городе Белгороде (Россия) и предназначены для выработки горячей воды на нужды отопления двух административных зданий площадью 600 и 1900 м². Тепловая нагрузка по тепловому расчету здания составляет 32 и 86 кВт соответственно и превышает нормативную примерно в 2 раза (нормативные тепловые нагрузки для указанных зданий составляют 13 и 41 кВт).

При проведении испытаний использовались:

– газоанализатор Testo 330-1 LL (измерение температуры отходящих газов и содержания в них O₂ и CO);

– газанализатор ГАНК-4 (измерение массовой концентрации вредных веществ NO₂, NO, CO, CH₄, фенол, бензол, SO₂, формальдегиды, HCl, NH₃, R-SH, H₂S);

– ультразвуковой расходомер «PanametricsPT878» (измерение объемного расхода теплоносителя в трубах);

– инфракрасный пирометр Testo-845 (измерение температуры в топке, температуры поверхности труб).

Описание сжигаемых образцов

При проведении замеров использовались как цельно кусковые элементы древесины и шпал, так и цилиндрические брикеты, представляющие собой цилиндры диаметром 50 мм, длиной 100-200 мм, плотностью 800 кг/м³, получаемые прессованием измельчённой и дроблёной древесины. В ходе испытаний проводилось сжигание материалов, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика сжигаемых отходов

№ топлива (табл.)	Состав	Форма
Пиролизный котел		
2-а	Железнодорожные шпалы	Крупные неизмельченные фрагменты
2-б	Древесина (сосна)	
2-в	Отходы древесины (окна, двери, мебель)	
2-г	Древесные гранулы	Цилиндрические брикеты
3	RDF-топливо (сортированные твёрдые бытовые отходы)	
5	Смесь древесных гранул (50%) и RDF-топлива (50%)	
Котел со слоевым сжиганием		
6	Древесина 70%, пластик 30%	Цилиндрические брикеты
7	Древесина 50%, пластик 50%	

Для образцов 6 и 7 была измерена влажность методом высушивания навески в муфельной печи. Массовая влажность составила:

образец № 6 13,6%;

образец № 7 13,5%.

Методика испытаний котлов

Методика проведения испытаний включала:

1. Загрузка топлива и вывод котла на номинальный режим.

2. Измерение температуры воды в прямом и обратном трубопроводе и расхода воды в обратном трубопроводе с использованием ультразвукового расходомера Panametrics RT878 и пирометра/контактного термометра Testo-845 (интервал 3 мин).

3. Измерение температуры и состава уходящих газов (O_2 , CO) с использованием газоанализатора «Testo 330-1 LL» (интервал 1 мин).

4. Измерение выбросов в газоходе после котла с использованием переносного газоанализатора ГАНК-4.

5. Измерение температуры горения топлива в топке с использованием пирометра Testo-845 (интервал 15-20 мин).

В результате проведенных испытаний по измеренным данным рассчитывалось количество выработанной тепловой энергии, тепловые потери и к.п.д. котельного агрегата (методом обратного баланса по упрощённой методике теплотехнических расчетов).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Оценка эффективности сжигания отходов в пиролизном котле

При сжигании дров установлено, что процесс горения в котле стабильный и нарушается только при закладке дров (рис. 1). Закрытие шибера не приводит к нарушению режима горения (повышению содержания CO или O_2), но при этом заметно снижается температура отходящих газов за котлом. К.п.д. котла в устойчивом режиме работы составляет 64-74%, что ниже паспортных значений.

При сжигании брикетов проведены две серии испытаний, в одной из них оценивалась работа котла при закрытой дверце подачи воздуха, во втором – также при частично перекрытом окне подачи воздуха. Результаты испытания представлены на рис. 2. Загрузка брикетов осуществлялась в 13:42; 13:58 и 15:13.

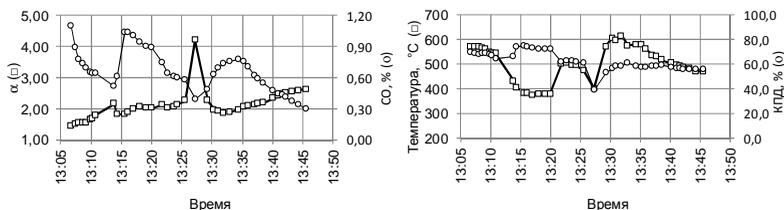


Рис. 1. Результаты измерений при сжигании древесины (топливо 2б), 03.12.2013 г.

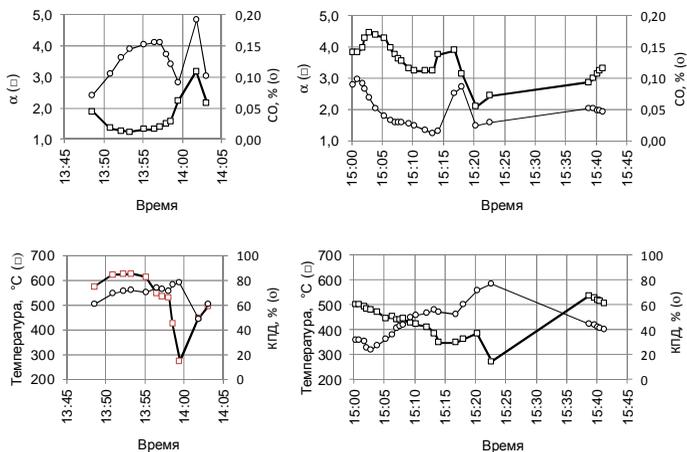


Рис. 2. Результаты измерений при сжигании древесных брикетов (топливо 2г), 04.12.2013 г.

Оценка тепловой мощности котла

Так как котел работает в нестационарном режиме, то мощность котла меняется во времени.

Для определения мощности использовались данные замеров расхода теплоносителя V , м³/с, нагреваемого в котле (измерения производились ультразвуковым накладным расходомером) и температуры прямой $t_{\text{пр}}$ и обратной $t_{\text{об}}$ воды, °С, определяемой по стационарным датчикам температур, вмонтированным в трубопроводы прямой и обратной воды.

Теплопроизводительность котла

$$Q = 4,186(t_{\text{пр}} - t_{\text{об}})V\rho, \text{ кВт},$$

где $t_{\text{пр}}$, $t_{\text{об}}$ – температура прямой и обратной воды, °С; V – объемный расход воды, м³/с; ρ – плотность воды, кг/м³.

Тепловыделение сжигаемого топлива:

$$Q_{\text{т}} = Q / \eta,$$

где η – к.п.д. котла, определенный по результатам газового анализа и по методике упрощенных теплотехнических расчетов, модифицированных для условий сжигания отходов.

Выводы по теплотехническим испытаниям котла при сжигании древесины и брикетов (топливо 2б и 2г):

1. Процесс горения в котле стабильный и нарушается только при закладке топлива.

2. Средняя часовая мощность котла при сжигании древесных брикетов составляет 95,6 кВт, что на 5,6% больше средней часовой мощности котла при сжигании дров.

3. Коэффициент полезного действия котла составляет не более 74%, средний к.п.д. при работе в устойчивом режиме – 60-74%, что меньше паспортных значений (84%). Топливо в котле сгорает полностью, о чем свидетельствует низкое содержание CO в отходящих газах.

Оценка эффективности сжигания брикетированных отходов в котле с колосниковой решеткой

В табл. 1 представлены усреднённые данные результатов измерений.

Таблица 2

Средние значения параметров для каждого режима сжигания топлива

Время замеров	Вид топлива	Температура отходящих газов $t_{ог}$, °C	Содержание CO, ппм	Коэффициент избытка воздуха α
22.03.16 10:48-11:56	RDF-топливо № 6	263	917	5,7
29.03.16 12:48-12:57		322	1012	4,3
29.03.16 13:03-13:13		291	1390	4,9
29.03.16 13:42-13:52		270	1823	5,4
29.03.16 14:53-15:03	RDF-топливо № 7	260	1668	4,9
29.03.16 15:31-15:43		279	1438	3,7
04.04.16 12:25-12:33		212	1832	10,6
04.04.16 12:37-12:47		235	1961	9,3
04.04.16 12:01-12:11		277	1305	5,1
04.04.16 11:41-11:51		283	1170	4,8

На рис. 3 представлены изменение параметров работы котла в процессе испытаний.

Анализ зависимостей между параметрами (рис. 4) показал, что зависимость имеется между температурой отходящих газов $t_{ог}$ и коэффициентом избытка воздуха α , коэффициент корреляции -0,75. Между температурой отходящих газов $t_{ог}$ и содержанием CO (коэффициент корреляции -0,39) и между содержанием CO и коэффициентом избытка воздуха α (коэффициент корреляции 0,29) зависимости нет. Это свидетельствует о том, что время горения недостаточно и отбор теплоты от газов снижает эффективность сжигания отходов.

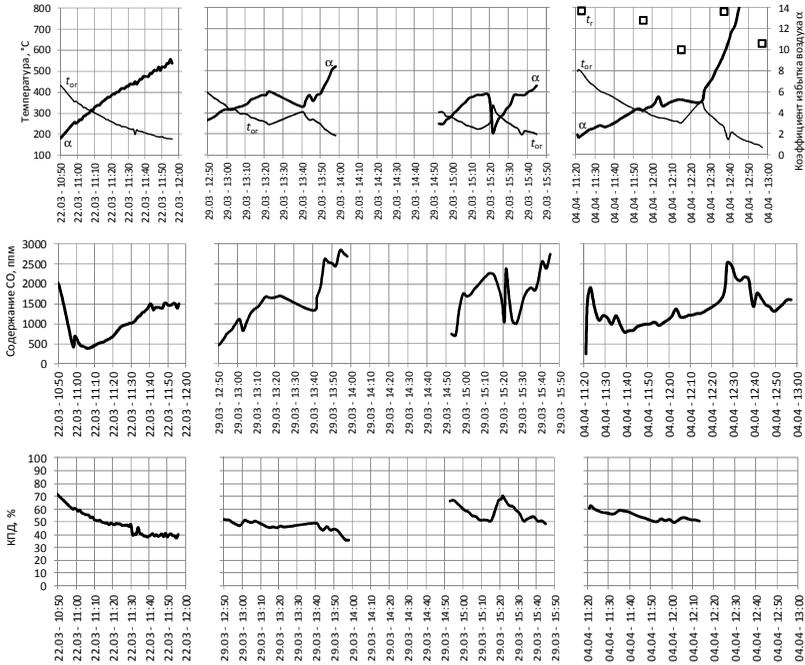


Рис. 3. Результаты замеров температуры отходящих газов $t_{ог}$, температуры горения $t_{г}$, коэффициента избытка воздуха α , содержания CO и тепловой к.п.д.

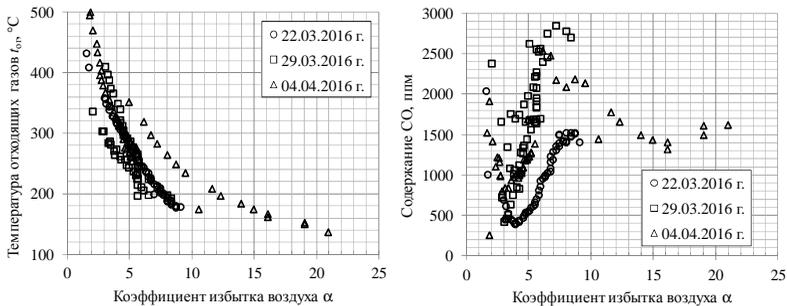


Рис. 4. Зависимость между параметрами горения

Температура горения, замеры которой производились в третий день испытаний, составляла 600...785°C, что ниже требований Директивы Европейского Парламента и Совета 2000/76/ЕС «О сжигании отходов», согласно которым экологическим требованиям удовлетворяют установки, в которых продукты горения находятся не менее 2 с при температуре не менее 850°C. Низкая температура горения была обусловлена высоким коэффициентом избытка воздуха и при оптимизации процесса горения экологические требования будут соблюдены.

Выводы по сжиганию RDF-брикетов на слоевой решетке

1. Процесс горения в котле стабильный и имеет прямую зависимость от времени выгорания топлива.

2. Средняя часовая мощность котла при сжигании древесных брикетов составляет 50...110 кВт, что сопоставимо с параметрами при сжигании дров и древесных брикетов.

3. Коэффициент полезного действия котла составляет не более 70%, средний к.п.д. при работе в устойчивом режиме – 50-60%, что меньше паспортных значений (84%). Высокое содержание CO, до 0,2%, в отходящих газах при высоких значениях коэффициента избытка воздуха свидетельствует о недостаточном времени горения.

4. ВЫВОДЫ

Процесс горения в котлах малой мощности характеризуется низким тепловым к.п.д., значение которого изменялось в пределах 60...74% для пиролизного котла и 50...70% при сжигании RDF-брикетов. Характеристики процесса горения RDF-топлива сопоставимы с характеристиками сжигания древесины и древесных брикетов. Процесс горения характеризовался стабильностью и теплотехнические параметры установок прямо зависели от степени выгорания топлива. Сжигание топливных брикетов характеризовалось большей эффективностью, чем сжигание цельнокусковой древесины.

В процессе испытаний проводилась оценка содержания опасных соединений в отходящих газах (результаты в данной работе не приведены), которое показало, что для всех видов исследуемых сжигаемых материалов расчётная приземная концентрация вредных веществ не превышают предельно допустимые концентрации, и в большинстве случаев значительно ниже их.

Можно сделать вывод о целесообразности сжигания отходов в установках малой производительности, но для обеспечения полного сгорания и необходимых температур процессы горения и отбор теплоты необходимо конструктивно разделить.

Библиографический список

1. Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities / J. Galvarino, C. Balcazar, R. A. Dias, J. A. P. Balestieri // *Energy*. 2013. No 55. P. 728–741.
2. **Miranda M. L., Hale B.** Waste not, want not: the private and social costs of waste-to-energy production // *Energy Policy*. 1997. No 25(6). P. 587–600.
3. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe / J. Malinauskaitea, H. Jouharab, D. Czajczynska et al // *Energy*. 2017. No 141. P. 2013–2044.
4. **Туров А.Н.** Перспективы энергетической утилизации ТБО // *Энергосвет*, 2014. № 4 (35). С. 31–35.
5. Waste to energy – An evaluation of the environmental impact / M. Pavlas, M. Touš, L. Bébar, P. Stehlík // *Applied Thermal Engineering*. 2010. No 30 (16). P. 2326–2332.
6. **Morcós V. H.** Energy recovery from municipal solid waste incineration – A review // *Heat Recovery Systems and CHP*. 1989. No 9 (2). P. 115–126.
7. Solid recovered fuel: An experiment on classification and potential applications // C. Bessi, L. Lombardi, R. Meoni // *Waste Management*. 2016. No 47 (B). P. 184–194.
8. **Panepinto D., Blengini G. A., Genon G.** Economic and environmental comparison between two scenarios of waste management: MBT vs thermal treatment // *Resources, Conservation and Recycling*. 2015. No 97. P. 16–23.
9. An industrial ecology approach to municipal solid waste management: I. Methodology / R. L. Smith, D. Sengupta, S. Takkellapati, C. C. Lee // *Resources, Conservation and Recycling*. 2015. No 104 (A). P. 311–316.
10. Caputo A.C., Palumbo M., Scacchia F. Perspectives of RDF use in decentralized areas: comparing power and co-generation solutions // *Applied Thermal Engineering*. 2004. No 24(14–15). P. 2171–2187.
11. **Shapiro H.N., Kuehn T.H.** Second law analysis of the Ames solid waste recovery system // *Energy*. 1980. No 5(8–9). P. 985–991.
12. Biomass boiler energy conversion system analysis with the aid of exergy-based methods / C. Li, C. Gillum, K. Toupin, B. Donaldson // *Energy Conversion and Management*. 2015. No 103. P. 665–673.
13. Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities / J.M. Fernández-González, A.L. Grindlay, F. Serrano-Bernardo // *Waste Management*. 2017. No 67. P. 360–374.
14. **Левин Б. И.** Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
15. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil / M.M.V. Leme, M.H. Rocha, E.E.S. Lora et al // *Resources, Conservation and Recycling*. 2014. No 87. P. 8–20.
16. **Giugliano M., Grosso M., Rigamonti L.** Energy recovery from municipal waste: A case study for a middle-sized Italian district // *Waste Management*. 2008. No 28(1). P. 39–50.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ
ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЖИДКИХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ПЕЛЛЕТ
ИЗ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ**

д-р техн. наук, проф. **Севостьянов В.С.**

магистрант **Белых М.М.**

студент **Севостьянова К.И.**

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

***Аннотация.** В данной статье рассмотрены проблемы использования активированного угля в технологии очистки загрязненных жидких сред. Проведены экспериментальные исследования по формированию гранул из отходов деревообрабатывающего производства с различными связующими, их термолиза для получения гранулированного угля с его последующей активацией указанным способом. Проведены экспериментальные исследования по очистке загрязненной жидкости от механических примесей. На основании полученных данных авторами предлагается использовать термообработанные методом термолиза гранулированные отходы деревообрабатывающих производств для очистки загрязненных жидких сред.*

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

Очистка загрязненных жидких сред с помощью активированного угля – это процесс очистки, который основан на способности активированного угля эффективно поглощать тяжелые металлы и многие другие вредные вещества, содержащиеся в питьевой или технической воде [1]. При этом не все виды угля эффективно очищают воду от различных примесей и вредных веществ. Только специально обработанный активированный уголь эффективно справляется с очисткой загрязненных жидких сред [1].

Использование гранулированного активированного угля позволяет очищать загрязненную жидкость от различных загрязнений только через фильтр с неподвижным слоем угля [2].

Размер сформованных в пеллеты термообработанных древесных отходов составлял в среднем $d \times l = (0,8-4) \times (5-10) \cdot 10^{-3}$ м.

Цель работы – изучение процесса очистки загрязненной жидкой среды, используя различные виды гранулированного активированного угля.

В экспериментальных исследованиях исходным сырьевым материалом являлись древесные отходы, размер которых составлял 0,5-2 мм. Они представлены на рис. 1.



Рис. 1. Древесные отходы

Для формирования гранул из древесных отходов использовались различные связующие: стеарин; жидкое стекло; суспензия картона; лигнин.

В исследованиях использовались также сформованные из опилок со связующим гранулы. Связующим являлся лигнин, выделяющийся из опилок при температуре $t = 170^\circ\text{C}$.

Фото связующих представлены на рис. 2.



Рис. 2. Связующие:

1 – стеарин; 2 – жидкое стекло; 3 – суспензия картона; 4 – лигнин

Для формирования гранул использовался пресс-валковый экструдер с плоской матрицей - ГПМ-120 [3]. К древесным опилкам добавлялось связующее в пропорции 1 к 4 [4]. Размер гранул варьировался $d \times l = 4 \times (3-8) \cdot 10^{-3}$ м. Гранулы, сформованные с различными связующими, представлены на рис. 3.

Следующим этапом была термолизная обработка гранул при температуре $250-350^\circ\text{C}$ в течение 15-20 минут [5].

Технологическая схема термолиза древесных гранул включает в себя следующие этапы:

- подготовка гранул;
- сушка;
- термолиз;
- охлаждение и стабилизация гранулированного угля (для предотвращения самовозгорания);
- полная конденсация паров летучих продуктов [5].

Для активации полученных гранул был использован метод взаимодействия угля с водяным паром [5]. Полученные гранулы активированного угля представлены на рис. 4.

После процесса подготовки гранул из активированного угля были собраны фильтрационные камеры для очистки загрязненной жидкости. В этих камерах фильтрующий слой, толщина которого варьировалась в пределах 40÷60 мм, состоял из металлической сетки, марли, песка и гранулированного угля [6]. Такая камера представлена на рис. 5.

Были проведены серии экспериментов по очистке загрязненной жидкости в фильтрационных камерах, где применялся полученный гранулированный уголь. В каждом эксперименте использовалось 500 мл жидкости, загрязненной на 20÷30% от общего объема. Загрязнения включали машинное масло, грунт, шлак и другие включения [7]. На рис. 6 представлено фото загрязненной жидкости.

Серии экспериментальных исследований по очистке загрязненной жидкости с помощью гранулированного угля (связующее - стеарин) показали, что время фильтрации составляет в среднем 14 минут. Жидкости после очистки остается в среднем около $Q = 490$ мл из 500 мл исходной жидкости, поданной в фильтрационную камеру. Загрязнений в жидкости после очистки остается менее 2%. После очистки жидкость приобретала желтоватый цвет, в виду использования связующего «стеарина».

Следующие экспериментальные исследования по очистке загрязненной жидкости осуществлялись с помощью гранулированного угля и связующего – суспензии картона. Эксперименты показали, что время фильтрации составляет в среднем 13,5 минут. Жидкости после очистки остается в среднем около $Q = 480$ мл от исходного объема жидкости, поданной в фильтрационную камеру. Загрязнений в жидкости после очистки остается в среднем 5÷7%.



Рис. 3. Гранулы, сформованные с использованием различных связующих: 1 – опилки и стеарин; 2 – опилки и жидкое стекло; 3 – опилки и суспензия картона; 4 – опилки и лигнин

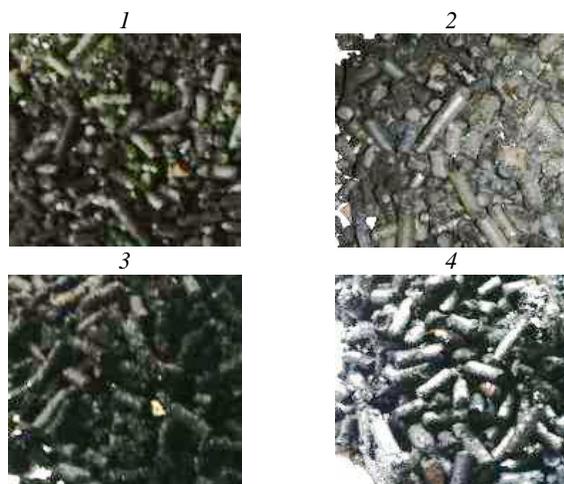


Рис. 4. Гранулы после термолитной обработки и активации: 1 – углеродные гранулы со стеарином; 2 – углеродные гранулы с жидким стеклом; 3 – углеродные гранулы с суспензией картона; 4 – углеродные гранулы с лигнином



Рис. 5. Фильтрационная камера



Рис. 6. Загрязненная жидкость

В экспериментальных исследованиях по очистке загрязненной жидкости с помощью гранулированного угля и связующего – жидкого стекла установлено, что время фильтрации составляет в среднем 15,5 минут. Жидкости после очистки остается в среднем около $Q = 465$ мл от исходной, поданной в фильтрационную камеру. Загрязнений в жидкости после очистки остается в среднем 3%. После очистки жидкость приобретает цвет охры, в виду связующего «жидкого стекла».

Исследования по очистке загрязненной жидкости с помощью гранулированного угля и связующего – лигнина показали, что время фильтрации составляет в среднем 11,5 минут. Жидкости после очистки остается в среднем около $Q = 475$ мл от исходной. Загрязнений в жидкости после очистки остается в среднем $\sim 1\div 2\%$. На представленном рис. 7 показана загрязненная жидкость после очистки.

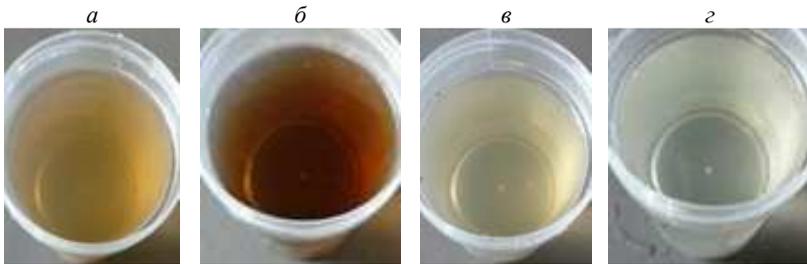


Рис. 7. Жидкости после очистки, с использованием в гранулах различных связующих: *а* – стеарина; *б* – суспензии картона; *в* – жидкого стекла; *г* – лигнина

На рис. 8 представлено количество загрязнений, оставшихся на сите 75 мкм до очистки и после нее.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что наилучшими показателями очистки обладает активированный уголь, сформованный из древесных отходов, связующим в которых является лигнин. Такой

гранулированный уголь очищает жидкость в среднем за 11,5 минут. Объем очищенной жидкости после фильтрации составляет 475 мл, а количество загрязнений не превышает 3%. Фильтрационные характеристики гранулированного угля обусловлены особенностями пористой структуры и характером поверхности адсорбента. Это позволяет использовать исходные древесные отходы для последующего их термолизного формования в гранулы и дальнейшего применения в качестве фильтрующих элементов для очистки загрязненных жидких сред.



Рис. 8. Остаток загрязнений на сите:
a – до очистки; *б* – после очистки

Библиографический список

1. Очистка воды с помощью активированного угля. [Электронный ресурс]. URL: http://golosinfo.com/news/ochistka_vody_s_pomoshhju_aktivirovanogo_uglja/2016-11-13-3418 (дата обращения: 08.10.2018).
2. Водоподготовка: Справочник / Под ред. С.Е. Беликова. М.: Аква-Терм, 2007. 240 с.
3. Аграрные технологии и машины: Грануляторы с плоской матрицей ГПМ [Электронный ресурс]. URL: <https://agrotm.org/products/gpm> (дата обращения: 09.10.2018).
4. **Цыгарова, М. В.** Комплексное использование древесины: метод. ук. Ухта: УГТУ, 2007. 55 с.
5. **Мухин В.М., Клушин В.Н.** Производство и применение углеродных адсорбентов. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2012. 307 с.
6. **Кожевников В.П., Токач Ю.Е.** 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.
7. **Свергузова С.В., Сакалова Г.В., Мальованый М.С.** Эффективность очистки сточных вод гальванического производства адсорбционным методом // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 153–156.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БИОГАЗОВОГО ТОПЛИВА

канд. техн. наук, доц. **Суслов Д.Ю.**,
аспирант **Рамазанов Р.С.**

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

Аннотация. Работа посвящена определению энергетических показателей альтернативного источника энергии – биогаза, получаемого из отходов сельскохозяйственных предприятий. Основными энергетическими показателями процесса горения биогазового топлива являются низшая теплота сгорания, число Воббе, пределы воспламенения, скорость распространения пламени, а также объем кислорода и воздуха, необходимого для полного сжигания биогаза. Определены энергетические показатели биогаза, получаемого из кукурузного силоса, технического жира, свиного навоза, навоза крупного рогатого скота и птичьего помета. Установлено, что наиболее высокими энергетическими показателями характеризуется биогаз, получаемый из технического жира и птичьего помета, а наименьшими биогаз из кукурузного силоса. Число Воббе биогаза более чем в 2 раза ниже значения природного газа. Наиболее высокая скорость распространения пламени у биогаза, производимого из технического жира – 23 см/с, что в 1,5 раза ниже скорости пламени природного газа. Биогаз имеет более широкие пределы воспламенения по сравнению с природным газом: нижний предел – 9 %, верхний – 23 %. Среднее значение теоретического объема воздуха, необходимого для полного сгорания биогаза составляет 5,8 м³, что в 1,7 раза меньше значения для природного газа.

Ключевые слова: биогаз, горение, горелка, температура, скорость распространения пламени, пределы воспламенения, горелка

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00351.

Введение. Во многих развитых странах мира большое внимание уделяется развитию систем альтернативной энергетики. Одним из перспективных направлений альтернативной энергетики является получение и использование биогаза [1, 2]. Биогаз образуется в процессе анаэробной ферментации органических веществ, являющихся, как правило, отходами различных производств [3, 4].

Наиболее эффективно применение биогазовых технологий на сельскохозяйственных предприятиях. Это объясняется близостью расположения источника энергии – органических отходов и потребителя биогаза – энергетических установок предприятий.

Биогаз представляет собой газообразное топливо, состоящее из метана (40-70%), углекислого газа (30-40%) и других газов (0-5%). Количество образуемого биогаза и метана зависит от состава органической части отходов, содержащей жиры, белки и углеводы [5].

В настоящее время получаемый биогаз в основном используется в когенерационных установках для выработки электрической и тепловой энергии [6]. Перспективным направлением использования биогаза является сжигание в горелочных устройствах котельных и печных агрегатов. Однако, учитывая в составе биогаза большое содержание углекислого газа, сжигание биогаза в традиционных горелках природного газа будет не эффективным. Поэтому актуальным является определение характеристик процесса горения биогазового топлива с высоким содержанием углекислого газа.

Методы. Большинство зарубежных и отечественных биогазовых станций в качестве исходного субстрата используют кукурузный силос, жиры, свиной навоз, навоз крупного рогатого скота (КРС) и птичий помет [3]. Объем и состав биогаза, получаемого из разных видов органических отходов были определены в результате экспериментальных исследований процесса анаэробной ферментации при температуре 42°C (см. табл. 1).

Таблица 1

Объем и состав биогаза, получаемого из разных видов отходов

Тип субстрата	Объем биогаза на тонну исходного субстрата	Объем биогаза на тонну сухого вещества	CH ₄ , %	CO ₂ , %	Прочие газы, %
Кукурузный силос	213,5	710,5	51,9	45,4	2,7
Жир технический	1500,7	1509,8	67,4	29,8	2,8
Свиной навоз	14,7	299,6	60,8	36,5	2,7
Навоз КРС	98,5	392,6	61	36,1	2,9
Птичий помет	106,2	719,5	64,4	32,7	2,9

Основными энергетическими показателями газообразного топлива являются низшая теплота сгорания, число Воббе, скорость распространения пламени, температура горения, нижний и верхний пределы воспламенения. Для определения энергетических показателей процесса горения биогаза использовались уравнения, основанные на химических реакциях горения метана.

Низшая теплота сгорания газа определяется в зависимости от компонентного состава газообразного топлива [7]. Учитывая состав биогаза и технологию очистки, при которой из газа удаляется сероводород, низшую теплоту сгоранию определяем по составу метана:

$$Q_n^p = 357,97CH_4, \quad (1)$$

где 357,97 – низшая теплота сгорания 1% сухой части метана; CH_4 – содержание метана, % (по объему).

Число Воббе определяется как отношение объемной низшей теплоты сгорания к корню квадратному из относительной плотности газообразного топлива [8]:

$$W = \frac{Q_n^p}{\sqrt{\rho_r / \rho_B}}, \quad (2)$$

где ρ_r – плотность биогаза, кг/м^3 ; ρ_B – плотность воздуха, кг/м^3 .

Нижний и верхний пределы воспламенения горючих газов определяется по следующим формулам [7]:

$$\varphi_H = \frac{100}{\frac{CH_4}{\varphi_{H1}}}; \quad (3)$$

$$\varphi_B = \frac{100}{\frac{CH_4}{\varphi_{B1}}}, \quad (4)$$

где φ_{H1} , φ_{B1} – соответственно нижние и верхние пределы воспламенения метана, %.

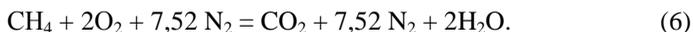
Скорость распространения фронта пламени для горючего газа определяется по формуле [9]:

$$U_H = \frac{CH_4 \cdot U_{H1}}{100}, \quad (5)$$

где U_{HI} – нормальные скорости распространения пламени соответствующих компонентов, см/с.

Основной задачей для эффективного и безопасного сжигания газообразного топлива является подача к месту горения объема кислорода, необходимого для полного сгорания 1 м^3 газа заданного состава. На практике работы газовых агрегатов в зону горения подается атмосферный воздух, состоящий из 79% азота и 21% кислорода. Если количество воздуха будет недостаточным для полного сжигания топлива, в продуктах сгорания образуется оксид углерода, являющийся высокотоксичным газом и опасным для здоровья людей. В противном случае, когда количество воздуха значительно превышает необходимый объем, то в продуктах сгорания остается большое количество избыточного воздуха, снижающее тепловую мощность горелки.

Расход кислорода и воздуха определим на основе реакции горения метана в воздухе:



В соответствии с уравнением горения метана, объем кислорода, необходимый для сгорания 1 м^3 биогаза, определяется по формуле:

$$V^0 = 0,01(2\text{CH}_4). \quad (7)$$

Объем воздуха, необходимый для полного сжигания газа, определим учитывая содержание кислорода:

$$V_B^0 = \frac{100}{21} V^0 = 4,76 \cdot V^0. \quad (8)$$

Результаты и обсуждение. Результаты расчета низшей теплоты сгорания и числа Воббе представлены на рис. 1.

Анализируя рис. 1 можно сделать вывод, что наиболее высокими показателями низшей теплоты сгорания и числа Воббе характеризуется биогаз, получаемый при переработке технического жира и птичьего помета, а наименьшими показателями – биогаз из кукурузного силоса. При этом видно, что значения числа Воббе биогаза более чем в 2 раза ниже значения природного газа.

Из рис. 2 видно, что нормальная скорость распространения пламени биогаза, получаемого из разных видов органических отходов, изменяется в диапазоне $17 \dots 23$ см/с. Наиболее высокая скорость пламени у биогаза, производимого из технического жира – 23 см/с, что в $1,5$ раза ниже скорости пламени природного газа (34 см/с).

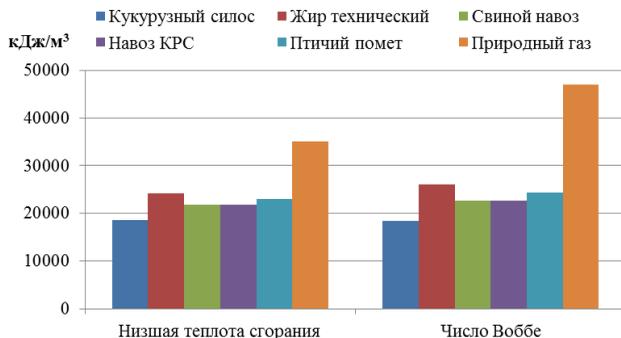


Рис. 1. Значения низшей теплоты сгорания и числа Воббе природного газа и биогаза разного состава

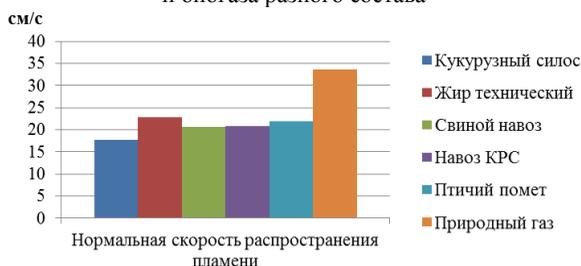


Рис. 2. Значения нормальной скорости распространения фронта пламени

Учитывая низкое содержание метана (рис. 3), биогаз имеет достаточно широкие пределы воспламенения по сравнению с природным газом. Наиболее широкими пределами воспламенения обладает биогаз из кукурузного силоса, а наиболее узкими – биогаз из технического жира. Так, у биогаза из кукурузного силоса нижний предел составляет 10%, а верхний предел – 27%. Из-за высокого значения нижнего предела воспламенения можно сделать вывод, что биогаз является менее взрывоопасным газом.

Полученное среднее значение теоретического объема воздуха, необходимого для полного сгорания биогаза составляет $5,8 \text{ м}^3$, что в 1,7 раза меньше значения для природного газа (рис. 4).

Из сравнения полученных энергетических параметров биогаза различного состава можно сделать вывод, что для эффективного сжигания биогаза переменного состава имеется необходимость доработки существующих и разработки новых газогорелочных устройств.

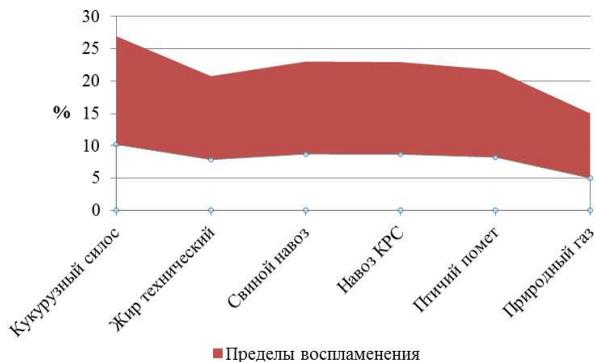


Рис. 3. Пределы воспламенения биогаза и природного газа

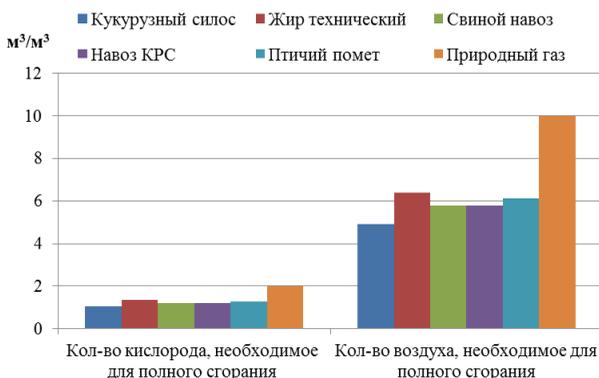


Рис. 4. Теоретическое количество кислорода и воздуха, необходимое для полного сгорания газа

При эксплуатации промышленных газовых агрегатов существует практика перевода горелок для работы на газе другого состава в связи с изменением теплоты сгорания и плотности газа. Для этого выполняется пересчет конструктивных параметров горелок.

Для сохранения тепловой мощности инжекционной газовой горелки низкого давления при переходе на газовое топливо другого состава необходимо изменить диаметр газового сопла, который определяется по формуле:

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{Q_n^p}{Q_n^{p'}}} \sqrt{\frac{p_1 \cdot \rho_2'}{p_2 \cdot \rho_2}}, \quad (9)$$

где d_1 – диаметр отверстия газового сопла при работе на газе первоначального состава, мм; Q_n^p и $Q_n^{p'}$ – расчётная и действительная теплота сгорания газа, МДж/м³; ρ_2 и ρ_2' – расчётная и действительная плотность газа, кг/м³; p_1 – расчётное давление газа, Па; p_2 – давление газа при работе на газе другого состава, Па.

При расчете параметров дутьевых горелок с улучшенным смешением необходимо пересчитать площадь выходных отверстий газа, однако скорости газа и воздуха должны быть неизменными. Площадь выходных отверстий определяется по формуле, м²:

$$F_1 = F \frac{Q_n}{Q_n'}, \quad (10)$$

где F – площадь выходных отверстий при сжигании газа первоначального состава, м².

Также для сохранения тепловой мощности горелки можно изменить давление газа перед горелкой при сохранении конструктивных размеров, Па:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{\rho_2'}{\rho_2} \right) \cdot \left(\frac{Q_n^p}{Q_n^{p'}} \right)^2. \quad (11)$$

Однако в этом случае необходимо произвести проверочный расчёт, чтобы диапазон устойчивой работы горелки не был меньше установленной величины.

Учитывая переменный состав биогаза, можно сделать вывод, что для эффективного сжигания биогаза, получаемого на разных сельскохозяйственных предприятиях, целесообразным будет использование горелки, оснащенной устройством для регулирования подачи воздуха в корпус горелки.

Заключение

В работе были определены энергетические показатели биогаза, получаемого из разных видов органических отходов: низшая теплота сгорания, число Воббе, пределы воспламенения, скорость распространения пламени, объем кислорода и воздуха, необходимого для полного сжигания биогаза. Установлено, что наиболее высокими энергетиче-

скими показателями характеризуется биогаз, получаемый из технического жира и птичьего помета, а наименьшими биогаз – из кукурузного силоса. При этом энергетические показатели биогаза в среднем ниже показателей природного газа в 1,5 раза. Биогаз по сравнению с природным газом имеет более широкие пределы воспламенения, однако высокое значение нижнего предела воспламенения делает биогаз менее взрывоопасным.

Библиографический список

1. **Wagner L.** Trends from the use of biogas technology in Germany // VIV Asia Biogas Conference on March 12th, 2015. p. 50.
2. **Linke B.** Country Report, Germany: IEA Bioenergy. Task 37, Berlin, Germany, October 29-30, 2015 [Электронный ресурс]. URL: http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html?file=files/daten-redaktion/download/publications/country-reports/2015/Germany_Country_Report_Berlin_10-2015.pdf.
3. Biogas is based on renewable raw materials. A comparative analysis of sixty-one biogas plants in Germany. Gülzow, Germany: FNR, 2010. 115 p.
4. **Эдер Б., Шульц Х.** Биогазовые установки: Практ. пос.; пер. с нем. под научн. ред. И. А. Реддих [Электронный ресурс]. 1996. 268 с. URL: http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf
5. **Суслов Д.Ю.** Получение биогаза в биореакторе с барботажным перемешиванием // дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Иваново: Иванов. гос. хим. тех. ун-т, 2013. 16 с.
6. Руководство по биогазу. От получения до использования / 5-е полностью перер. изд. Гюльцов, Германия: Агентство по возобновляемым ресурсам (FNR). 2010. 214 с.
7. Интенсификация процесса сжигания природного газа в системах газоснабжения ЖКХ / Л.А. Кушев, Д.Ю. Суслов, Р.С. Рамазанов, М.А. Швыдкая // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С.95–99.
8. **Гуськов Б.И., Кряжев Б.Г.** Газификация промышленных предприятий: Учебник для техникумов. М.: Стройиздат. 1982. 368 с.
9. **Брюханов О.Н., Жила В.А., Плужников А.И.** Газоснабжение: учеб. пособие для студ. вузов. М.: Изд. центр «Академия», 2008. 448 с.

5. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 666.942.82: 666.9.015.263 : 666.9.015.264

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕЛОГО ЦЕМЕНТА

канд. техн. наук, доц. **Мишин Д.А.**
ассистент **Ковалев С.В.**

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

***Аннотация.** Настоящая статья посвящена изучению новых способов отбеливания, позволяющих снизить энергозатраты при производстве белого цемента. В ходе исследований осуществлен отдельный ввод минерализаторов в высушенный сырьевой шлам ЗАО «Белгородский цементный завод». Установлено отбеливающее действие отдельного ввода минерализаторов с полным усвоением свободного оксида кальция при температуре 1250°С. Причиной отбеливающего эффекта является снижение количества и изменение состава алюмоферритной фазы.*

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

Цементная промышленность входит в число отраслей промышленности, в которых основную долю затрат на производство продукции занимают топливно-энергетические ресурсы. Наиболее энергоемким является процесс производства белого цемента, что обуславливает высокую себестоимость данного вида цемента по сравнению с другими видами. Основным фактором, определяющим высокую энергоемкость производства белого цемента, является особый состав сырьевой смеси. Для получения продукта сортовой белизны необходимо поддерживать низкое содержание (менее 0,5%) оксида железа в клинкере [1]. Оксид железа является одним из основных оксидов, определяющих количество и свойства расплава при жидкофазном спекании [2]. В результате снижения содержания Fe_2O_3 количество расплава уменьшается, что затрудняет процесс образования алита. Поэтому низкое содержание оксида железа компенсируют более высокой температурой

обжига. В это же время, из-за особых условий охлаждения, не представляется возможным рекуперировать тепло нагретого клинкера. Это существенно увеличивает удельный расход топлива по сравнению с производством обычного цемента. Таким образом, разработка энерго-сберегающих технологий при производстве белого цемента является весьма актуальной.

Одним из решений данной проблемы является применение техногенных отходов в производстве белого цемента [3]. Иной выход из сложившейся ситуации представляет снижение температуры обжига клинкера за счет рационального использования минерализующих веществ, либо за счет увеличения содержания оксида железа в сырьевой смеси. Однако, в условиях повышенного содержания оксида железа (более 1,5%) отбеливание в воде утрачивает свою эффективность [4]. Поэтому разработка новых способов отбеливания, позволяющих получить осветленный клинкер на базе сырья для производства серого портландцемента, является перспективным направлением.

Таким образом, целью данной работы является изучение возможности отбеливания клинкера из сырья с высоким содержанием оксида железа путем ввода минерализующих добавок для снижения энергозатрат при производстве белого портландцемента.

Методика и исходные материалы. В качестве сырьевой смеси с высоким содержанием Fe_2O_3 использовали высушенный шлам ЗАО «Белгородский цементный завод» (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика высушенного шлама
ЗАО «Белгородский цементный завод»

Химический состав, %									
ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Проч.
34,8	14,23	3,59	2,78	43,12	0,6	0,4	0,11	0,09	0,37
Модульные характеристики									
КН					n			p	
0,91					2,23			1,29	

В сырьевую смесь вводили минерализаторы Na_2CO_3 и $2C_2S \cdot CaF_2$ в пересчете на прокаленное вещество сверх 100%: Карбонат натрия вводили до суммарного содержания 3,5% R_2O в клинкере, синтезирован-

ное соединение $2C_2S \cdot CaF_2$ в количестве 8,11%, что составляет 1,5% в пересчете на CaF_2 .

В настоящее время традиционный способ ввода минерализаторов утратил свою эффективность вследствие накопления и циркуляции солей щелочных металлов в печной системе [5]. Ввод минерализаторов производили отдельным способом [6]. Моделирование отдельного ввода минерализаторов в условиях повышенного содержания солей щелочных металлов осуществляли следующим образом. В сырьевую смесь вводили Na_2CO_3 , усредняли и из полученной смеси формовали таблетки. Обжиг образцов проводили при температуре $1100^\circ C$. Обожженный материал измельчали и в него вводили минерализатор CaF_2 или $2C_2S \cdot CaF_2$. Из данной смеси вновь прессовали таблетки, которые возвращали в предварительно разогретую до $1100^\circ C$ печь и проводили дальнейший обжиг.

Масса таблеток составляла 15 г, давление прессования 30 МПа. Обжиг таблеток проводили в лабораторной печи с установленным экраном, для исключения неравномерности обжига таблетки вследствие излучения нагревателей. Время изотермической выдержки образцов составляло 30 мин. Скорость нагрева печи – $10^\circ C/мин$.

Для установления влияния минерализаторов на фазовый состав клинкера использовали: рентгенофазовый анализ с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA.

Завершение процессов клинкерообразования оценивали по содержанию свободного оксида кальция. Определение содержания $CaO_{св}$ в клинкере осуществляли этилово-глицератным методом [7].

Степень белизны (коэффициент яркости) клинкера определяли с помощью блескомера ФБ-2 по эталонной полированной пластине сульфата бария.

Результаты и их обсуждение

Использование отдельного ввода минерализаторов приводит к осветлению образцов интервале температур $1250-1300^\circ C$ (рис. 1а, 1б). При увеличении температуры обжига от 1250 до $1300^\circ C$ происходит постепенное возвращение цвета клинкера к обычному черному цвету (рис. 1а, 1б, 1в).

В интервале температур $1250-1300^\circ C$ наблюдается полное усвоение свободного оксида кальция, что указывает на завершение процессов клинкерообразования (табл. 2).



Рис. 1. Внешний вид образцов клинкера, полученных раздельным вводом при температуре обжига: а) 1250°C; б) 1275°C; в) 1300°C

Таблица 2

Характеристика образцов клинкера, полученных раздельным вводом минерализатора $2C_2S \cdot CaF_2$

Наименование	Температура обжига, °С				
	1250	1250	1275	1300	1400*
Способ охлаждения	(водн.)	(возд.)	(возд.)	(возд.)	(возд.)
Содержание СаО _{св} , %	0,55	0,5	0,3	0,31	0,1
Коэффициент яркости, %	46	41	37,5	30	30

* - образец без добавок

Согласно результатам анализа фазового состава у образцов, полученных при 1250°C (рис. 2, кривая 2), наблюдаются интенсивные рефлексы алита ($d, \text{Å}: 3,034; 2,971; 2,780; 2,748; 2,702; 2,611; 1,767$), рефлексы β -белита ($d, \text{Å}: 2,876; 2,783; 2,750; 2,613; 2,450$), алюминатной фазы ($d, \text{Å}: 2,702$), алюмоферритной фазы ($d, \text{Å}: 7,375; 2,656$). Интенсивность рефлексов свободного оксида кальция ($d, \text{Å}: 2,406; 1,699$) низкая, что согласуется с ранее полученными данными о содержании СаО_{св}. (табл. 2).

В сравнении с образцом без добавок (рис. 2, кривая 1) состав алюмоферритной фазы ($d, \text{Å}: 7,314; 2,679, 2,637$) смещается в область составов более богатых железом и приближается к составу C_6AF_2 ($d, \text{Å}: 7,375; 2,659$). Интенсивность отражений алюмоферритной фазы при этом снижается, что свидетельствует о снижении содержания алюмоферритной фазы в клинкере. Алюмоферритная фаза является наиболее окрашивающей фазой в составе клинкера [4]. Поэтому при снижении количества алюмоферритной фазы происходит увеличение коэффициента яркости клинкера.

Увеличение температуры обжига до 1300°C (рис. 2, кривая 3) приводит к увеличению интенсивности рефлексов аломоферритной фазы (d, Å: 7,375; 2,659). В результате коэффициент яркости клинкера уменьшается от 41 до 30%.

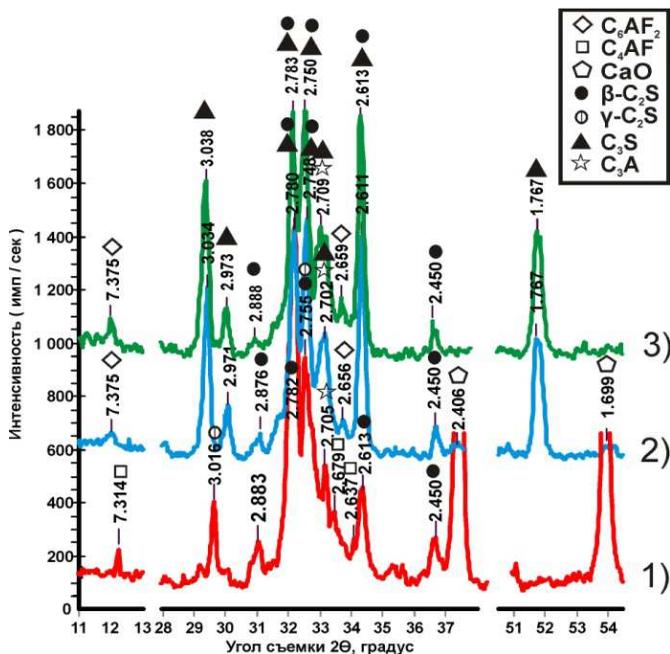


Рис. 2. Фазовый состав клинкера при температурах обжига: 1) без добавок при 1250°C; 2) отдельный ввод 3,5% Na_2O +8,11% $2C_2S \cdot CaF_2$ при 1250°C; 3) отдельный ввод 3,5% Na_2O +8,11% $2C_2S \cdot CaF_2$ при 1300°C

Таким образом с помощью отдельного ввода минерализатора при 1250°C можно получить осветленный клинкер. При этом использование минерализаторов позволяет уменьшить зону спекания со смещением ее в область более низких температур. Вследствие этого, становится возможным увеличить протяженность подготовительных зон вращающейся печи, что повлечет эквивалентное увеличение производительности и снижение удельного расхода топлива на обжиг.

Выводы

1. Раздельный ввод минерализатора проявляет отбеливающий эффект при температуре 1250°C. Причиной отбеливающего эффекта является изменение состава и количества алюмоферритной фазы.

2. Применение раздельного ввода минерализатора позволит расширить сырьевую базу производства белого цемента с вовлечением сырьевых компонентов с повышенным содержанием железа.

3. Раздельный ввод минерализатора позволяет добиться полного усвоения свободного оксида кальция при 1250°C.

4. Применение раздельного ввода минерализатора позволит увеличить длину подготовительных зон вращающейся печи с пропорциональным увеличением производительности. В результате удельный расход топлива на обжиг клинкера снизится.

Библиографический список

1. Технология белого портландцемента / А.Н. Грачян, П.П. Гайджуров, А.П. Зубехин, Н.В. Ротыч; Под ред. И.Ф. Пономарева. М.: Стройиздат, 1970. 72 с.

2. **Осокин А. П., Кривобородов Ю.Р., Потапова Е.Н.** Модифицированный портландцемент: монография. М.: Стройиздат, 1993. 323 с.

3. **Борисов И.Н., Поздеева К.Е., Кривоустов Д.Ю.** Возможные пути энерго- и ресурсосбережения в производстве белого цемента // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды: Сб. докл. междунар. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. С. 12–16.

4. **Зубехин А.П., Голованова С.П., Кирсанов П.В.** Белый портландцемент / Под ред. А.П. Зубехина. Ростов н/Д: Ред. журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. Регион», 2004. 264 с.

5. **Мишин Д.А., Ковалев С.В., Чекулаев В.Г.** Причина снижения эффективности действия минерализаторов обжига портландцементного клинкера // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 161–166.

6. Пат. 2633620 Рос. Федерация, МКИ 6 С 04 В 7/42, С 04 В 7/06. Способ интенсификации процесса обжига портландцементного клинкера минерализаторами / Д.А. Мишин, С.В. Ковалев, В.Г. Чекулаев; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». № 2016127078; заявл. 05.07.2016; опубл. 16.10.2017, Бюл. № 29. 8 с.

7. **Бутт Ю.М., Тимашев В.В.** Практикум по химической технологии вяжущих материалов: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1973. 504 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ С ВИБРО-ЦЕНТРОБЕЖНЫМ АГРЕГАТОМ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ПОМОЛА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

д-р. техн. наук, проф. **Севостьянов В.С.**

канд. техн. наук, проф. **Уральский В.И.**

канд. техн. наук, доцент **Бойчук И.П.**

аспирант **Ермилов Р.А.**

аспирант **Лукьянова Е.А.**

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

***Аннотация.** Активное использование материалов тонкого и сверхтонкого измельчения привело к созданию большого числа измельчителей разных видов. В каждом отдельном агрегате создаются определенные условия для измельчения, что позволяет их использовать для переработки материалов с различными физико-механическими характеристиками. В данной статье предложена математическая модель замкнутого цикла измельчения с воздушным сепаратором комбинированного действия. В рамках модели получены интегральные функции разделения воздушного сепаратора. Произведены сравнения расчётных и экспериментальных значений интегральных функций разделения в воздушном сепараторе.*

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

Одним из перспективных направлений совершенствования техники и технологии тонкого и сверхтонкого измельчения материалов является разработка энерго-ресурсосберегающих технологий комплексной переработки техногенного сырья с использованием помольных агрегатов селективного помола, работающих в замкнутом цикле [1-3].

В этой связи, для науки и практики важное значение имеет реализация постадийного измельчения материалов с обеспечением их микродефектной структуры на первой стадии, например в пресс-валковом измельчителе, а также последовательного избирательного помола (усиленного ударного, ударно-истирающего или истирающего воздействия) в помольных агрегатах вибрационно-центробежного типа. Последние работают в открытом или замкнутом цикле измельчения. Реализация указанного технологического процесса обеспечивает сниже-

ние энергозатрат до 20-30% и повышает качество измельченного продукта [5].

Целью работы является создание математической модели замкнутого цикла помола с применением воздушного сепаратора комбинированного действия и сравнение расчетных значений с экспериментальными.

Для получения высокодисперсных материалов на последней стадии нами выполнены научно-технические разработки и проведен ряд исследований по созданию специального технологического модуля. Разработаны патентозащищенные конструкции агрегатов: центробежные помольно-смесительные агрегаты (ЦПСА), реализующие в себе комплекс последовательных динамических нагружений, способствующие эффективному получению высокодисперсных порошков, с возможностью варьирования их величины или характера воздействия (от интенсивного ударного до истирающего) в зависимости от размолоспособности измельчаемого материала [4].

Также был разработан воздушный сепаратор-гранулятор комбинированного действия (заявка на патент № 2018102629), который был испытан в технологической линии производства высокодисперсных материалов [6].

Разработанные агрегаты используются в технологической системе измельчения (ТСИ) (рис. 1), состоящей из ЦПСА и воздушного сепаратора комбинированного действия.

На рис. 1 показана схема ТСИ замкнутого цикла. Измельчаемый материал из бункера 5, предварительно смешиваясь с потоком крупки из сепаратора 2, подается в ЦПСА. В ЦПСА материал измельчается. Измельченный материал пневмотранспортом подается в сепаратор 2, который разделяет его на тонкий продукт (готовый порошок) и грубый продукт (возврат). Готовый продукт выделяют из воздушного потока в системе пылеулавливания 3, а возврат поступает на вход в ЦПСА для доизмельчения. Гранулометрический состав $R_1(\delta)$ и массопоток B_1 продукта ЦПСА зависят от гранулометрического состава сырья $R_C(\delta)$ и его массопотока B_C , а также и от гранулометрического состава $R_2(\delta)$ и массопотока B_2 возврата.

Предположим, что в ТСИ процесс является установившимся и $Q = \text{const}$. Пусть также известны математические модели преобразования гранулометрического состава материала в основных агрегатах схемы.

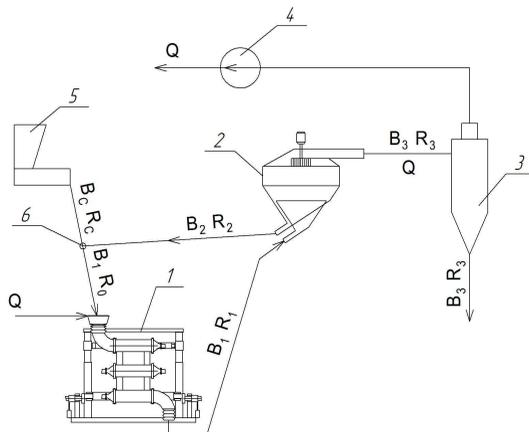


Рис. 1. Схема замкнутого цикла измельчения: 1- ЦПСА, 2- сепаратор, 3- система улавливания готового продукта, 4 – вентилятор, 5 – бункер, 6 – узел смешения

Тогда математическая модель замкнутого цикла измельчения состоит из следующей системы уравнений:

$$R_1(\delta) = F_M(R_0(\delta), B_1, Q, P_i); \quad (1)$$

$$\varphi_\delta = \varphi_\delta(\delta, B_1, Q, q_i); \quad (2)$$

$$\bar{\varphi} = \int_0^{R_1} \varphi_\delta(\delta) dR_1; \quad (3)$$

$$R_3(\delta) = \frac{1}{\bar{\varphi}} \int_0^{R_1} \varphi_\delta(\delta) dR_1; \quad (4)$$

$$R_2(\delta) = \frac{1}{1 - \bar{\varphi}} \int_0^{R_1} (1 - \varphi_\delta(\delta)) dR_1; \quad (5)$$

$$B_3 = B_1 \bar{\varphi}, \quad (6)$$

$$B_2 = B_1(1 - \bar{\varphi}); \quad (7)$$

$$R_0(\delta) = R_c(\delta)\bar{\varphi} + R_2(\delta)(1 - \bar{\varphi}); \quad (8)$$

$$B_1 = B_c + B_2; \quad (9)$$

$$B_c = B_3; \quad (10)$$

$$\Sigma \Delta p_i(B_i, Q) = H_B(Q); \quad (11)$$

где φ_δ - кривая разделения сепаратора; F_M - символическая запись какого-либо уравнения кинетики измельчения; P_i - вектор параметров, управляющих процессом измельчения; q_i - вектор параметров, управляющих процессом сепарации; Δp_i - потери давления на различных участках ТСИ; H_B - напор вентилятора. В данной системе уравнение (1) описывает преобразование гранулометрического состава материала в ЦПСА. Уравнения (2)–(7) описывают изменение гранулометрического состава материала при разделении в сепараторе. Изменение гранулометрического состава при смешении потоков сырья и возврата описывают уравнения (8)–(10). Уравнение (11) представляет процесс пневмотранспорта материала в ТСИ.

Для описания кривой разделения сепаратора воспользуемся однопараметрической зависимостью [7]:

$$\varphi_\delta \left(\frac{\delta}{\delta_{2p}} \right) = \left[1 + \exp \left\{ s \left(\left(\frac{\delta}{\delta_{2p}} \right)^2 - 1 \right) \right\} \right]^{-1}, \quad (12)$$

где s - свободный параметр.

Поскольку аналитического решения задачи (1)–(11) совместно с условием (12) получить невозможно, заданные уравнения решались методом последовательных приближений. При этом для сравнения с экспериментом выбирался гранулометрический состав грубого и тонкого продукта после сепаратора. На рис. 2 представлены интегральные функции разделения R_1 , R_2 , R_3 .

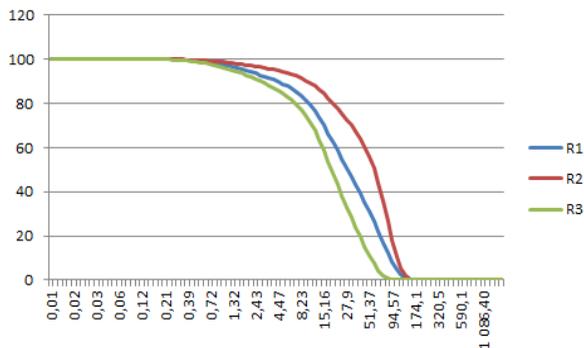


Рис. 2. Интегральные функции разделения R_1 , R_2 , R_3

Для проведения экспериментальных исследований нами были использованы хвосты обогащения железистый кварцитов (ХОЖК).

После проведения экспериментальных исследований технологического модуля отобранные пробы были подвергнуты гранулометрическому анализу, результаты которого представлены на рис. 3, 4.

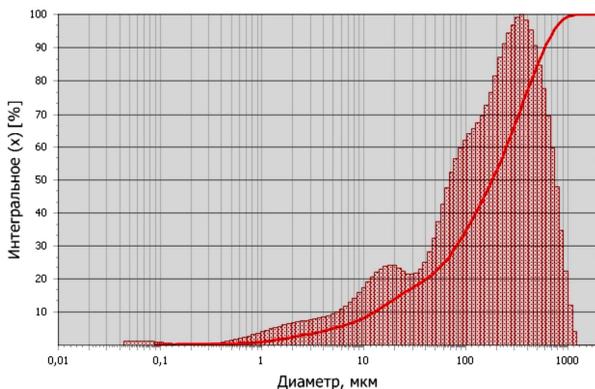


Рис. 3. Гранулометрический анализ крупки

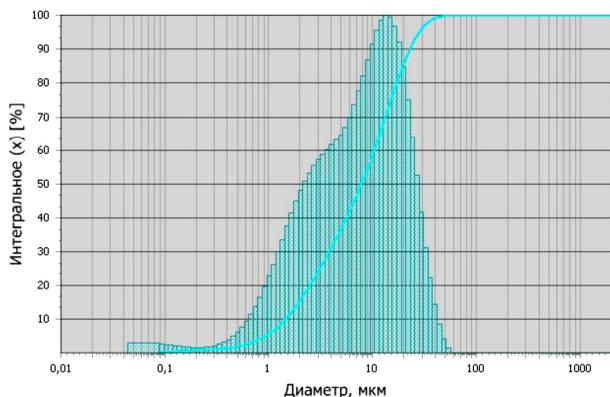


Рис. 4. Гранулометрический анализ готового продукта

Сравнение расчетного и экспериментального значения R_3 приведено на рис. 5.

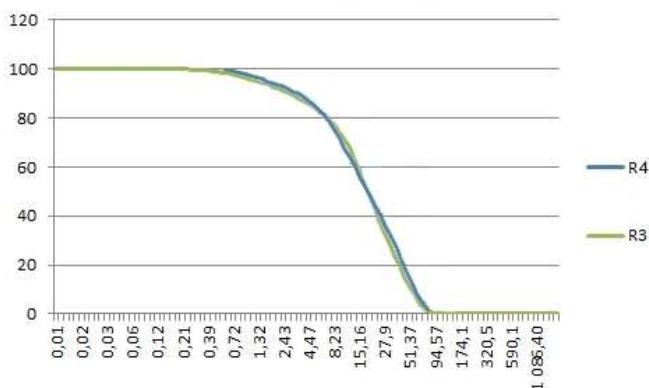


Рис. 5. Сравнение интегральных функций разделения сепаратора по готовому продукту: R_3 – расчетная, R_4 – экспериментальная

Расхождение экспериментальных и расчетных данных объясняется тем, что для вычислений выбиралась не реальная кривая разделения, а теоретическая зависимость № 12.

Проведенные конструкторско-технологические разработки патентозащищенных агрегатов и их испытания позволили разработать технологический комплекс для тонкого измельчения материалов с различными физико-механическими свойствами. Предложена математическая модель замкнутого цикла с воздушным сепаратором комбинированного действия. В рамках модели получены интегральные функции разделения воздушного сепаратора. Исследованы гранулометрические составы тонкодисперсных частиц, полученных с использованием разработанных агрегатов, объединенных в технологический комплекс для получения высокодисперсных материалов. Анализ сравнения расчётного и экспериментального значений интегральных функций разделения в воздушном сепараторе позволяет сделать вывод о достаточно высокой степени точности приближенного аналитического решения.

Библиографический список

1. **Мизонов В. Е., Ушаков С. Г.** Аэродинамическая классификация порошков. М.: Химия, 1989. 160 с.
2. Техника и технология предизмельчения материалов для производства нанокомпозигов / В.С. Севостьянов, В.В. Строкова, А.В. Уральский, Д.Н. Перельгин // Нанотехнологии производству: Сб. тр. межд. научно-практ. конф. Т. 1. Фрязино, 2007. С. 165–171.
3. Разработка и исследование энергосберегающего помольного оборудования для высокодисперсного измельчения материалов / С.В. Севостьянов, Д.Н. Перельгин, В.И. Уральский и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 76–80.
4. **Севостьянов В.С., Уральский В.И.** Центробежный помольно-смесительный агрегат // Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии: мат. межд. научно-практ. конф. № 11. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. С. 215–217.
5. **Севостьянов В.С.** Энергосберегающие помольные агрегаты. Белгород, 2006. 435 с.
6. 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.
7. **Molerus O.** Stochastisches Modell der Gleichgewichtsichtung // ChemieIng Technik. 1967. Bd. 39, No 13. S. 792–796.

ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНОГО БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОВАРНОЙ ПРОДУКЦИИ

д-р техн. наук, профессор **Севостьянов В.С.**

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

канд. техн. наук, доц. **Севостьянов М.В.**

аспирант **Горягин П.Ю.**

аспирант **Бабуков В.А.**

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

***Аннотация.** Представлены проблемы, цель и задачи переработки отходов вторичного базальтового волокна. Разработана конструкция виброцентриробежного агрегата комбинированного действия для реализации поэтапной дезагломерации, измельчения и микрогрануляции базальтовых отходов с целью получения фибронаполнителей. Разработан технологический комплекс для получения базальтовых фибронаполнителей. Рассмотрены варианты использования базальтовой фибры для производства базальтопластиковой арматуры, армирования бетонов и ее использования в композиционных смесях для 3D-технологий.*

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

В мире растет объем производства минеральных волокон из расплавов горных пород, в том числе теплоизоляционных изделий из базальтового сырья. Современные технологии позволяют рентабельно и крупнотоннажно перерабатывать базальты: плавить, отливать, переводить в дисперсную форму (порошки, нити). Многие базальтовые изделия превосходят аналогичные изделия, полученные из других материалов (металлов и пластмасс), по термической, химической и биологической стойкости [1].

В настоящее время одной из актуальных проблем является переработка отходов производства минераловатных утеплителей. Как известно, при промышленном производстве теплоизоляционных изделий остается большое количество отходов – таких как: обрезки и некондиционная продукция, получающаяся при различных сбоях технологического процесса. Как правило, это выясняется после лабораторных испытаний, когда продукция уже произведена. Минераловатная продук-

ция, не соответствующая требованиям нормативной документации, загромождает складские помещения и реализуется по сниженным ценам, что отрицательно сказывается на экономической эффективности производственного процесса. При производстве базальтового минерального утеплителя, среднестатистическое количество отходов оценивают в объеме 8–10% от всего объема переработанной ваты [2].

Ежегодно на полигонах складирования ТКО скапливается до 150 000 т отходов вторичного базальтового волокна. Из-за сравнительно невысокой насыпной плотности (средние параметры 200–220 кг/м³), территория «отчуждения» под складирование данного вида отходов, зачастую занимает большую долю площадей полигонов. Главной задачей переработки вторичного базальтового волокна, в насыпном или уплотненном состоянии, является значительное уменьшение его объема, придание ему сыпучести и использование в качестве фибронаполнителей композиционных смесей и различных архитектурно-строительных изделий [3]. Для этого целесообразно использовать поэтапный процесс комплексной переработки и получение различных видов продукции, включающий в себя следующие стадии:

- 1) дезагломерации;
- 2) тонкого измельчения для получения микрофибонаполнителей композиционных смесей различного технологического назначения, в т.ч. для 3D-технологий в строительстве;
- 3) получения высококонцентрированных микрофибонаполнителей в гранулированном состоянии и др.

Для реализации комплексной переработки различных техногенных волокнистых материалов (ТВМ), в т.ч. базальтовых отходов нами разработан вибро-центробежный агрегат комбинированного действия (ВЦА КД) (рис. 1).

Способ переработки ТВМ для получения фибронаполнителей включает предварительное и основное измельчение. Согласно первому варианту предварительное измельчение осуществляется в верхней камере с помощью цепных завес, а основное измельчение — в средней камере с помощью мелющих тел.

Согласно второму варианту предварительное измельчение осуществляется в верхней камере с помощью цепных завес, а основное измельчение — в средней камере с помощью мелющих тел и последующим микрогранулированием — окатыванием материала в нижней камере микрогранулирования. Для улучшения условий микрогранулирования возможно введение дополнительных материалов или связую-

щего в распыленном или паробразном состоянии через гофрированный патрубок в камеру микрогранулирования.

Переработка вторичного базальтового волокна характеризуется рядом особенностей:

1. Наличие развитой поверхностью волокон, на которые накладывается сложные движения цепных элементов с повышенной амплитудой и частотой колебаний.

2. Создание в среде обрабатываемого материала новых механизмов воздействия, в том числе кинематических и силовых.

При переработке базальтового волокна, целлюлозно-бумажных и других отходов в процессе измельчения следует учитывать их физико-механические характеристики и требования к конечному продукту.

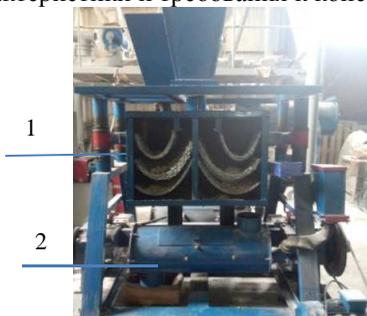


Рис. 1. Вибро-центробежный агрегат комбинированного действия для переработки волокнистых материалов: 1 – камера дезагломерации; 2 – камера механоактивации или микрогранулирования

Технологические возможности ВЦА КД обеспечиваются конструктивно-технологическими особенностями: активным движением материала в рабочем пространстве; высокой просеивающей способностью цепной завесы, обусловленной принудительной подачей частиц через зазоры между элементами цепей под действием инерционных сил; созданием сложно-пространственного сдвигового деформирования обрабатываемого материала; реализацией эффекта самоочистения; развитой рабочей поверхностью; способностью перерабатывать материалы с различными физико-механическими характеристиками (крупностью, влажностью, сыпучестью и др.), а также возможностью исключения посторонних включений из техногенной шихты. Данное техническое решение позволяет уменьшить объём базальтовых отходов в 7–8 раз, а вновь поступающие объёмы чистого базальтового во-

локна переработать в товарный продукт – фибронаполнители. На основе исследований процессов переработки техногенных волокнистых материалов был разработан технологически комплекс для получения фибр из отходов вторичного базальтового волокна (рис. 2).

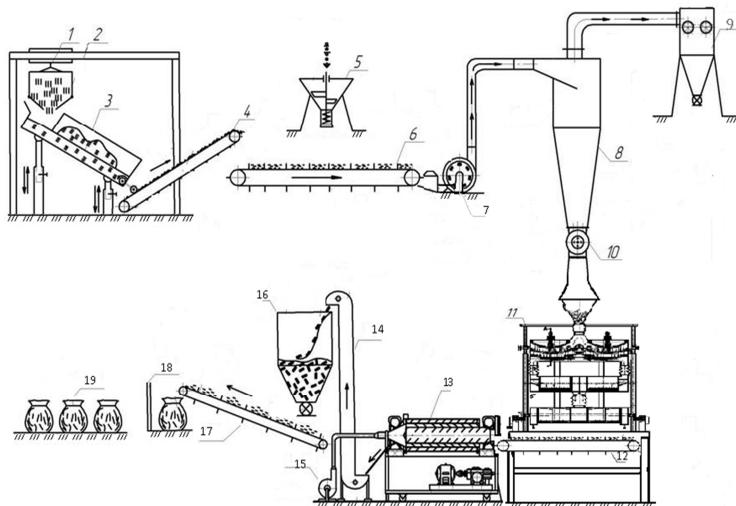


Рис. 2. Технологический комплекс по переработки вторичного базальтового волокна и получения базальтовой фибры различного технологического назначения:

1 - бункер подачи материала; 2 – тельфер; 3 – стол подачи материала, 4 – ленточный транспортер; 5 – дозатор добавок; 6 – пластинчатый питатель; 7 – молотковая дробилка; 8 – циклон-осадитель; 9 – рукавный фильтр; 10 – ячейковый питатель; 11 - вибро-центробежный агрегат комбинированного действия; 12 – ленточный транспортер; 13 – барабанно-винтовой сушильный агрегат (для сушки микрогранул); 14 – нория; 15 – вентилятор; 16 – бункер; 17 – пластинчатый транспортер; 18 – весовой дозатор; 19 – склад готовой продукции

Одним из видов получаемой товарной продукции после переработки вторичного базальтового волокна может являться базальтопластиковая арматура.

Арматура — обязательный атрибут современного строительства. Применяется при возведении фундаментов частных домов, строительстве мостов и дорог. Сегодня большой популярностью пользуется ба-

зальтопластиковая арматура (БПА). Материал обладает характеристиками (таб. 1), позволившими ему частично вытеснить классическую металлическую арматуру — проверенный и надежный материал.

Данный вид композитной арматуры, изготавливается из базальтовых волокон, которые пропитываются термореактивными или термопластичными связующими полимерами. Благодаря своему составу, волокна БПА обладают высокой стойкостью к агрессивным средам.

Таблица 1

Физико-механические характеристики базальтопластиковой арматуры

Характеристики	Показатель
Предел прочности при растяжении, МПа	≥ 800
Модуль упругости при растяжении, ГПа	≥ 50
Предел прочности при сжатии, МПа	≥ 300
Предел прочности при поперечном срезе, МПа	≥ 150
Предел прочности сцепления с бетоном, МПа	≥ 12
Снижение предела прочности при растяжении после выдержки в щелочной среде, %	≤ 25
Предел прочности сцепления с бетоном после выдержки в щелочной среде, МПа	≥ 10
Предельная температура эксплуатации, °С	≤ 160

Как показывает практика, применение этого материала оправдано при строительстве различных объектов. БПА применяют при возведении промышленных, общественных и жилых зданий, в коттеджном и малоэтажном строительстве. [4]

Одним из наиболее эффективных методов по улучшению прочностных характеристик бетонов, используемых в строительстве стеновых конструкций, поверхностей промышленных стяжек, кровель, а также различных штукатурных смесей является использование строительного волокна (фибры). Базальтовая фибра - это специальное строительное волокно, которое выполняет роль армирующего компонента на микроуровне [5]. Основное применение фиброволокон, ориентировано как добавочное средство для бетона, а также для различных строительных смесей. Базальтовые фиброволокна совмещают в себе высо-

кие технологические показатели базальта: механическая прочность, устойчивость к химически агрессивным средам (от кислот до щелочей), стойкость к перепадам температур и др. Небольшая добавка данного волокна значительно увеличивает сопротивление изгибающим нагрузкам. При этом повышается долговечность материала, снижается усадочная деформация, значительно возрастает трещиностойкость, ударная вязкость. Все это раскрывает перед дисперсно-армированными материалами новые области применения, а также позволяет значительно уменьшить общий вес строительных конструкций за счет уменьшения сечения при неизменных прочностных показателях. Это может явиться дополнительным аргументом в пользу дисперсного армирования цементов, бетонов, бетонных и железобетонных конструкций. Тем более, что попутно будут решаться проблемы строительства на слабых грунтах, а также вопросы экономии сырьевых, энергетических и трудовых ресурсов. Базальтовую фибру используют во всех типах гипсо - и цементносодержащих растворов, где необходимо или желательно микроармирование, а также предотвращение появления усадочных трещин, для устройства бетонных покрытий (как наружных, так и внутренних) [6].

Собственную технологию аддитивной печати циркониевым и базальтовым волокном предложила компания Grainis. Полученные композиты в 3 раза легче, в 5 раз прочнее и в 20 раз дешевле стали и могут быть сырьем для производства строительной арматуры, прутьев, труб, профилей, крепежных элементов, щитов, дорожного покрытия, рельс, корпусов и деталей транспортных средств, изоляции, технических тканей, канатов и др.

Однако, не смотря на внешнюю простоту технологических решений по использованию указанного вида техногенных волокнистых материалов в 3D-технологиях, а также перспективность использования базальтовых волокон в строительстве, существует ряд достаточно не простых научно-технических задач:

- предварительной очистки и дезагломерации некондиционных базальтовых отходов и разработки технических средств для реализации процессов дозирования, распушки, равномерного распределения волокон в объеме и др.;
- осуществления классификации фибронаполнителей по их размерам;
- обеспечения различной степени дисперсности фибронаполнителей и других компонентов (размеров волокон) при использовании их

для выпуска широкой гаммы инновационной продукции, в т.ч. для 3D-печати;

- разработки технических средств и механизма их использования для диспергирования базальтовых отходов различной гранулометрии, а также процесса получения гомогенных композиционных смесей многофункционального технологического назначения;
- разработки техники и технологии сухого и мокрого смешения гетерогенных композиционных смесей, в т.ч. бетонных;
- создания агрегатов для получения высококонцентрированных микрофибронеполнителей – микрогранулята с целью использования в инновационных технологиях (3D-печати, нанотехнологиях и др.);
- разработки специального оборудования и аппаратурного оформления для создания автоматизированных технологических стационарных и мобильных модулей и др.

Таким образом, переработка вторичного базальтового волокна является весьма перспективным направлением развития отечественной науки и промышленности. Кроме того, такая деятельность существенно снижает экологические риски, она способствует получению инновационной, востребованной продукции для сферы промышленности строительных материалов.

Библиографический список

1. **Орлецкая Л.В.** Ценные вторичные ресурсы // Рециклинг отходов. 2006. № 6. С. 3–4.
2. **Ханзек К.-Д.** Утилизация минеральной ваты – продуманное средство, сочетающее увеличение прибыли и охрану окружающей среды [Электронный ресурс]. URL: <http://www.basalttech.org/forum/forum73/topic481/messages>.
3. Научно-практические основы создания иглофрезерных измельчителей многоцелевого назначения / В.С. Севостьянов, Т.Л. Сиваченко, М.В. Севостьянов и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 3. С. 107–115.
4. Достоинства и недостатки, технические характеристики и применение базальтопластиковой арматуры (БПА) [Электронный ресурс] URL: <https://vseoarmature.ru/vidy/bazaltoplastikovaya-armatura>.
5. **Новицкий А.Г., Ефремов М. В.** Аспекты применения базальтовой фибры для армирования бетонов [Электронный ресурс] // Будівельні матеріали, виробі та санітарна техніка. 2010. Вип. 36. С. 22-26. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs_2010_36_5.
6. Фибра для бетона базальтовая [Электронный ресурс]. URL: <http://vest-beton.ru/stati/fibra-dlya-betona-bazaltovaya.html>.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

¹ директор Шенин Н.Т.

² д-р техн. наук, проф. Севостьянов В.С.

¹ начальник отдела новых технологий Оболонский В.В.

² канд. техн. наук, доц. Севостьянов М.В.

² аспирант Горягин П.Ю.

² аспирант Бабуков В.А.

¹ ООО «ТК «Экотранс», г. Белгород

² Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород

***Аннотация.** В настоящее время весьма актуальной экологической проблемой является увеличение масштабов образования промышленных и твёрдых коммунальных отходов (ПиТКО). Это ведёт к ухудшению экологической обстановки, а, следовательно, грозит жизни и здоровью человека, оказывает пагубное воздействие на биосферу в целом. Поэтому особое место в организации рационального использования природных ресурсов должна занимать комплексная система мер по переработке и утилизации различных техногенных материалов, являющихся продуктом производственной деятельности человека. Целью научно-исследовательских и опытно-промышленных разработок является создание ресурсоэнергосберегающей технологии, технологических комплексов и специального оборудования для комплексной переработки и утилизации различных техногенных материалов. Одним из условий реализации ресурсоэнергосберегающей технологии является использование внутренних энергетических и материальных ресурсов перерабатывающего предприятия.*

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

В настоящее время весьма актуальной проблемой является увеличение масштабов образования твёрдых коммунальных отходов (ТКО) и острая необходимость их комплексной переработки [1]. Частичная сортировка ТКО с последующим захоронением не утилизируемых остатков на полигонах является крайне неэффективным способом утилизации, а существующие технологии сжигания ТКО являются дополнительным источником глобального загрязнения диоксинами и фуранами [2]. Кроме того, любые усовершенствования технологий сжига-

ния не устраняют образования диоксинов и фуранов, что, в свою очередь, вызывает необходимость последующего захоронения значительных объемов вредных веществ после очистки дымовых газов. Существующие технологии экономически убыточные и реализуются лишь в условиях государственных дотаций.

В последние годы, в связи с неуклонно возрастающей экологической напряженностью в крупных городах-мегаполисах, на высшем государственном уровне всё больше внимания уделяется разработке ресурсоэнергосберегающих технологий комплексной переработки ТКО [3].

Каждое технологическое направление комплексной переработки ТКО существует как совокупность отдельных процессов и является экономически неэффективным по причине высокой себестоимости (из-за необходимости приобретения внешних энергетических и материальных ресурсов).

В связи с вышеуказанным, целью научно-исследовательских и опытно-промышленных разработок является создание и освоение технологии комплексной переработки ТКО.

Научно-производственными коллективами ООО «ТК «Экотранс» и БГТУ им. В.Г. Шухова осуществляются разработки ресурсоэнергосберегающей технологии и специального оборудования для комплексной переработки различных техногенных материалов: отходов деревообрабатывающей промышленности, отходов органических соединений (полимеры, пластмассы и др.), базальтовых отходов, стеклобоя и др.

В данной технологии комплексной переработки ТКО осуществляется реализация различных технологических направлений (потоков), связанных друг с другом и обеспечивающих использование внутренних энергетических и материальных ресурсов. При этом отсутствует необходимость в приобретении этих ресурсов извне. Объединение направлений комплексной переработки технологическими взаимосвязями позволяет получить новую технологию, обеспечивающую низкую себестоимость за счет использования внутренних энергетических и материальных ресурсов. Разнообразие получаемой продукции, которое может быть произведено с низкой себестоимостью при использовании принципа технологических взаимосвязей, достаточно велико и определяется конкретными условиями производства (номенклатура отходов, потребность в какой-либо продукции и др.). На рис. 1 представлена блок-схема технологических процессов для конкретных условий ООО «ТК Экотранс».

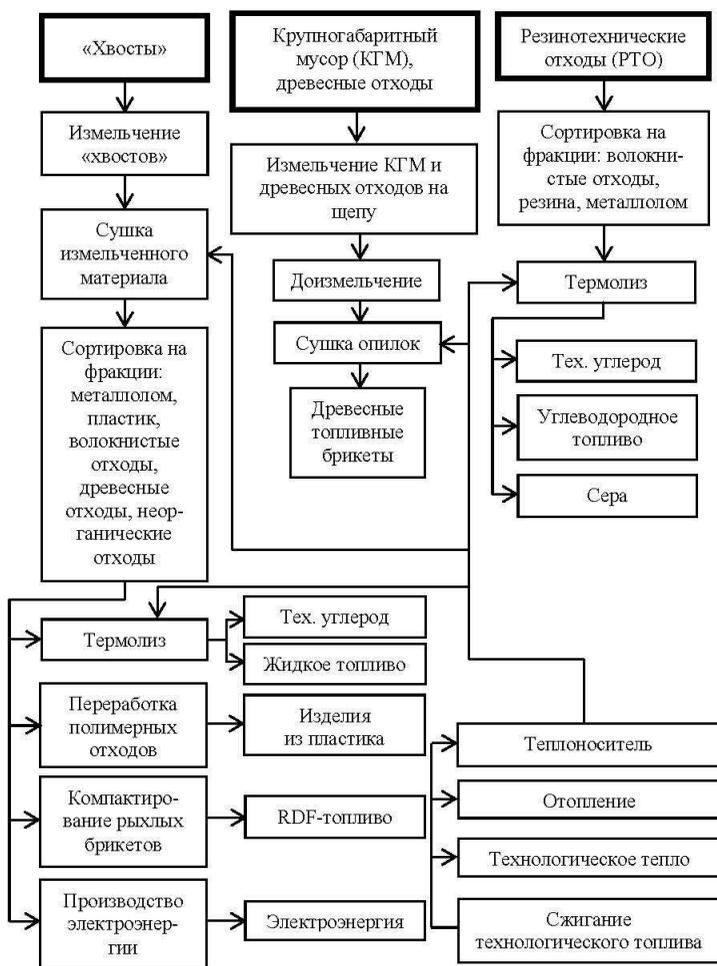


Рис. 1. Схема отдельных технологических потоков с внутренними технологическими связями

С учетом накопленного опыта и требований максимальной экономической эффективности для ООО «ТК «Экотранс» наиболее целесо-

образными являются следующие направления комплексной переработки ТКО:

I. Переработка ТКО для получения RDF-топлива.

II. Производство брикетированных изделий различного назначения из древесных отходов, с последующей их переработкой для получения тепловой или электрической энергии в теплоэлектростанциях.

III. Получение углеводородного топлива из сырья, получаемого в результате термолитиза. Данная технология переработки техногенных материалов реализована в ООО «НПП Термолиз».

IV. Переработка полимерных отходов из ТКО и производство из них кремнезем-полимерсодержащих изделий.

V. Комплексная переработка не утилизируемых отходов базальтового волокна многофункционального назначения с целью производства сухих строительных смесей с фибро наполнителями.

Основной целью предлагаемой технологии комплексной переработки ТКО является обеспечение минимального объема вывоза отходов на полигон для захоронения. Это является возможным при очень тщательном разделении массы отходов на составляющие и полном использовании органической части ТКО. Данное требование реализуется при предварительной подготовке сырья к последующей переработке. При отсутствии сбыта/потребления производимой продукции любого из направлений подготовленное сырье реализуется в других ресурсоэнергосберегающих технологиях.

Технологические операции подготовки ТКО к дальнейшей переработке включают в себя: сортировку отходов, измельчение их до требуемых размеров и сушку до 8-10% влажности. Подготовленное сырье в дальнейшем подвергается переработке в соответствии с предъявляемыми к конечной продукции требованиями.

Каждая из технологических операций данной технологии имеет технико-экономическую и экологическую направленность и может быть использована в реальном производстве. Однако для реализации вышеуказанных технологий необходимо специализированное оборудование, учитывающее различные физико-механические характеристики техногенных материалов: различные плотности, геометрические размеры и формы, малую сыпучесть, повышенную влажность и др.

В разработанной технологии реализованы инновационные для области комплексной переработки ТКО процессы, такие как высокоскоростное измельчение влажного сырья в потоке, контактная сушка измельченного сырья, термолитиз и др.

Одним из перспективных направлений в области ресурсосбережения является переработка техногенных полимерных материалов (ТПМ) и производство из них широкой номенклатуры изделий различного назначения.

Для производства методом экструдирования компактированных полимерных изделий на основе техногенных полимерных материалов был разработан технологический комплекс (рис. 2).

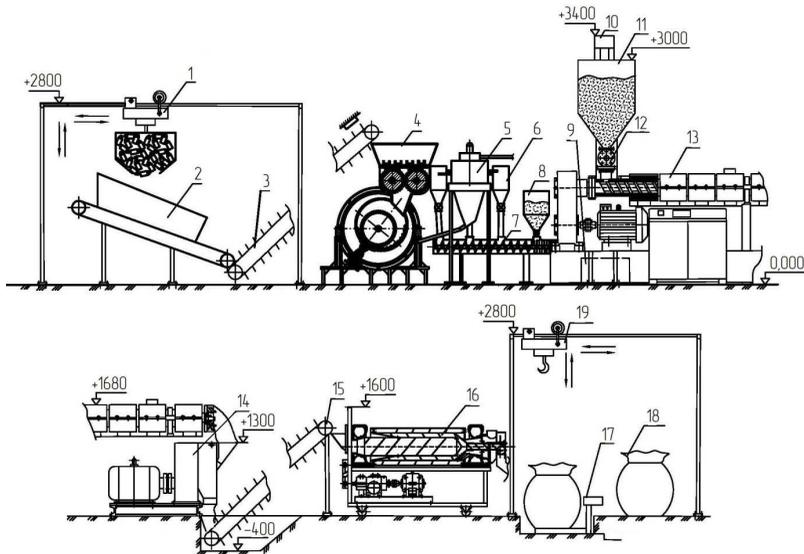


Рис. 2. Технологический комплекс для производства экструдированных изделий из техногенных полимерных материалов:

1,19 - тельфер, 2 - приёмный лоток, 3,15 - пластинчатый конвейер, 4 - роторно-центробежный агрегат комбинированного действия, 5- сепаратор, 6- циклон, 7- шнековый смеситель, 8- бункер дополнительный компонентов, 9- приемная воронка, 10 - элеватор, 11 - приемный бункер,12- ячейковый питатель, 13- шнековый термонагреватель, 14 - экструдер с кольцевой матрицей, 16- баранно-винтовой агрегат,17 - весы, 18 - биг-бэг

Технологический комплекс работает следующим образом. Исходный материал с помощью тельфера 1 подается на приемный лоток 2, в нижней части которого установлен ленточный конвейер 3. Затем с помощью пластинчатого конвейера сырье поступает в роторно-центробежный агрегат комбинированного действия (РЦА КД) 4. В

камере грубого помола материал измельчается дисковыми фрезами и, под действием воздушного потока, перемещается в камеру тонкого помола, где измельчается иглофрезерными рабочими органами до порошкообразного состояния. После РЦА КД сырье попадает в сепаратор 5 и разделяется на фракции, крупные из которых возвращаются на домол. Измельченный до необходимого размера материал поступает в циклон 6. Осаждаясь, дозировано поступает в шнековый смеситель 7, где смешивается с добавками, подаваемыми из бункера 8. Композиционная смесь попадает в приемную воронку 9 элеватора 10, который поднимает смесь в приемный бункер 11. С помощью ячейкового питателя 12 определенной дозировкой материал поступает в шнековый термонагреватель 13, где под воздействием высокой температуры превращается в однородную массу. Затем она попадает в экструдер с кольцевой матрицей 14. Экструдированная смесь по пластинчатому конвейеру 15 поступает в барабанно-винтовой агрегат 16, где происходит охлаждение материала. Охлажденные гранулы взвешивают на весах 17, упаковывают в биг-бэги 18 и с помощью тельфера 19 отгружают на склад.

При переработке техногенных материалов одной из энергоемких стадий является процесс измельчения [4]. В связи с этим, проводимые нами исследования направлены на разработку и конструктивно-технологическое совершенствование многофункционального измельчительного оборудования. При разработке энергоэффективного оборудования нами уделялось особое внимание физико-механическим характеристикам ТПМ, таким как: упругость, пластичность, температура плавления и др.

Разработанный нами РЦА КД (рис. 3) [5, 6] учитывает различные технологические условия переработки ТПМ, их физико-механические характеристики: исходное состояние материалов (форму, размеры, сыпучесть и др.) и их прочностные характеристики. Конструкция агрегата позволяет реализовать возможность варьирования разрывающего и истирающего силового воздействия, степени термонагрева материала и его охлаждения. В РЦА КД обеспечивается высокая долговечность наиболее изнашиваемых узлов и деталей агрегата, возможность введения в агрегат дополнительных компонентов для получения композиционных смесей, постадийность процесса измельчения ТПМ, повышенная энергонапряженность второй стадии и использование рабочих органов с развитой рабочей поверхностью – иглофрез и др.

РЦА КД [7] содержит корпус, состоящий из двух горизонтально размещенных друг за другом камер дробления 1 и тонкого помола 2.

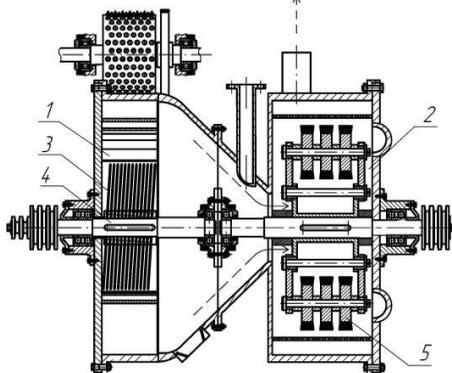


Рис. 3. Роторно-центробежный агрегат комбинированного действия:
1 – камера дробления, 2 – камера тонкого помола; 3 – вал камеры дробления;
4 – ротор камеры дробления; 5 – иглофрезерные рабочие органы

Внутри камеры дробления 1 расположен эксцентрично установленный относительно оси цилиндрического корпуса бандаж, который футерован съемными элементами (профильными пластинами). На валу 3 расположен ротор камеры дробления 4 с режущими элементами в виде дисковых фрез.

Во второй камере (камере тонкого помола) 2 установлены иглофрезерные рабочие органы 5, которые выполнены из набора стержневых элементов, собранных в пакеты, и жестко закреплены на держателе.

В РЦА КД реализован принцип постадийного измельчения с реализацией комбинированного воздействия на перерабатываемый материал. Это обеспечивает снижение энергозатрат на процесс измельчения, а также расширяет технологические возможности агрегата.

В результате проведенных научных исследований творческим коллективом сотрудников БГТУ им. В.Г. Шухова и ООО «ТК «Экотранс»:

- 1) разработана инновационная ресурсоэнергосберегающая технология и специальное оборудование для комплексной переработки ТКО;
- 2) определены перспективные направления разработанной технологии;
- 3) изучена специфика переработки базальтовых отходов и техногенных полимерных материалов;

4) разработаны технологические комплексы для переработки техногенных волокнистых материалов и производства широкой номенклатуры экструдированных изделий из техногенных полимерных материалов;

5) разработано специальное оборудование, учитывающее специфику переработки анизотропных и сложных по составу техногенных материалов.

Библиографический список

1. Малотоннажные технологические комплексы и оборудование (основы научных исследований – практическое руководство): учебное пособие / В.С. Севостьянов, В.И. Уральский, М.В. Севостьянов и др. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. 450 с.

2. 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.

3. **Севостьянов М.В.** Ресурсо-сберегающее оборудование для комплексной переработки техногенных материалов. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 140–145.

4. **Горягин П.Ю., Ермилов Р.А.** Техника и технологии для переработки техногенных полимерных материалов // Молодежь и научно-технический прогресс: Сб. докл. X межд. научно-практ. конф. студ., асп. и мол. уч.. В 4 т. Т. 3. Губкин: ООО «Ассистент плюс», 2017. С. 83–86.

5. **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.

6. Научно-практические основы создания иглофрезерных измельчителей многоцелевого назначения / В.С. Севостьянов, Т.Л. Сиваченко, М.В. Севостьянов и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 3. С. 107–116.

7. Пат. 2540549 Рос. Федерация, МПК В02С 18/00. Установка для измельчения волокнистых материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, М.В. Севостьянов, и др.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». № 2013141378/13; заявл. 09.09.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4. 11 с.

СЕКЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

УДК 628.972

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

аспирант **Воронкова А.Ю.**
научный руководитель канд. физ.-мат. наук, доц. **Зуев С.В.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г.Шухова, г. Белгород*

***Аннотация.** Рассмотрены различные подходы к проектированию систем освещения с использованием современных светильников. Проведено конфигурирование объекта освещения. Представлен базовый алгоритм проектирования оптимизированной системы освещения с использованием различных светильников. Определены условия, при которых система освещения будет экономически эффективна и оптимальна.*

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

Введение. Экономия энергетических ресурсов является в настоящее время актуальной проблемой, поэтому применение энергоэффективных, обеспечивающих минимальный расход электроэнергии, источников света является важнейшей задачей [1, 3, 4].

Требования, которые учитываются при проектировании систем освещения: величина освещенности заданной поверхности, равномерность освещенности и экономическая эффективность системы освещения, которая включает в себя стоимость системы и ее установки, потребление энергии, долговечность и стоимость эксплуатации. Существуют различные подходы к проектированию систем освещения с использованием современных источников света. Однако, чаще всего, они охватывают лишь часть указанных требований. Приведем примеры имеющихся подходов.

Метод коэффициента использования светового потока является одной из базовых технологий в проектной практике. Обычно этот метод применяют для расчета средней освещенности расчетной поверх-

ности в помещениях [2]. Метод не затрагивает экономическую часть и очень приблизительно описывает равномерность освещенности.

Равномерность распределения освещенности по расчетной поверхности, в соответствии с требованиями СП 52.13330.2016, учитывают, используя коэффициент неравномерности, равный отношению максимальной освещенности на площадке к средней.

Наряду с этим, для оценки равномерности освещения предлагается использовать критериальную оценку и коэффициент вариации [2].

Критериальная оценка определяется как отношение числа расчетных точек N_c , удовлетворяющих данному критерию, к общему числу рассматриваемых точек N . Так, например, при нормировании средней освещенности $E_{\text{норм}}$, соответствующий критерий IL определяется как:

$$IL = N_c / N,$$

где с N_c – число расчетных точек, для каждой из которых выполняется условие $E_i \geq E_{\text{норм}}$.

Более совершенным является коэффициент вариации (CV), статистически учитывающий разброс значений $\{E_i\}$:

$$CV = \sigma(E)/E_{\text{ср}},$$

где $E_{\text{ср}}$ – среднее значение освещенности рабочей поверхности; $\sigma(E)$ – среднеквадратичное отклонение значений $\{E_i\}$ относительно $E_{\text{ср}}$:

$$\sigma(E) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (E_i - E_{\text{ср}})^2}.$$

Существенным фактором для проектирования систем освещения является вид светильника(ов). Применение специальных конструкций светильников может приводить к дополнительным трудностям в оценке эффективности осветительной системы и, чаще всего, в этих случаях грубая оценка по коэффициенту неравномерности не может быть применена [1]. Поэтому для общего подхода к расчёту и оптимизации освещения необходимо использовать критериальную оценку равномерности освещения, используемую в работах [1, 2].

В последнее время при проектировании часто требуется соблюдение принципа наилучших доступных технологий. В соответствии с директивами Евросоюза по ВАТ (Best Available Techniques – Наилуч-

шие доступные технологии) и справочником по наилучшим доступным технологиям в области энергоэффективности [4], применение светодиодных источников освещения обеспечивает наилучшую на данное время энергоэффективность в системах освещения. Однако, это заключение верно в среднем и сделано для стран Европы. В России зачастую проектирование систем освещения требует учета местных особенностей и не всегда применение светодиодных или каких-либо других источников света является очевидно целесообразным. Поэтому требуется рассмотрение множества доступных источников света и внесение признаков светильника в параметры задачи оптимизации.

В данной работе будут рассмотрены следующие виды светильников: точечный (центрально-симметричный) и протяженный, линейный (осе-симметричный) без указания конкретного вида источника света. Учет источника света будет произведен в алгоритме заданием кривой силы света.

Источник света – это прибор, непосредственно испускающий свет. Светильник – это устройство, состоящее из источника света, которое позволяет распределять световой поток заданным образом.

Световые, электрические и эксплуатационные свойства электрических источников света характеризуются рядом параметров. Производными параметрами являются характеристики светильников, использующих данный тип источников света. Сравнение параметров нескольких светильников для их использования в конкретном проекте должно быть сделано в совокупности с учетом параметров освещаемого помещения и требованиями к освещению.

Таким образом, выяснить, какую систему освещения установить лучше, можно только сравнивая все параметры, применительно к конкретному проекту.

Для оптимизации системы освещения выбраны следующие параметры светильников: потребляемая мощность (Вт), угол рассеивания потока (градусы, рад.), стоимость (руб.), протяженность (м), световой поток (лм), равномерность (%), срок службы (тыс. часов).

Ключевые требования к системе освещения, на основе которых будет проводиться оптимизация, выбраны следующими:

- освещенность (лк) в каждом помещении (или части разбиения помещения);
- равномерность освещенности (max %);
- экономическая эффективность системы.

Цель и задачи работы. Создание базового алгоритма проектирования оптимизированной системы освещения с использованием различных светильников, на разных источниках света.

Задачи работы: требуется произвести расчёт координат (x_{ji}, y_{ji}) точек подвеса j -го светильника в i -м прямоугольнике с типом светильника T_j . То есть, найти такие наборы координат точек вида (x_{ji}, y_{ji}, T_j) , для которых будут выполнены следующие условия:

– освещенность и равномерность соответствуют заданным требованиям;

– система освещения экономически эффективна и оптимальна.

Система освещения будет экономически эффективна и оптимальна для срока эксплуатации в D дней, если:

1) выполнены требования освещенности и равномерности в течении D дней;

2) срок службы системы превышает D дней;

3) величина $A + P \cdot d \cdot D \cdot t$, где A – стоимость осветительного прибора; P – потребляемая мощность; d – продолжительность дневного горения; t – тариф за электроэнергию, минимальна по всем возможным вариантам выбора параметров (i, j) с учетом выполнения п.1 и п.2.

Конфигурирование объекта освещения.

Пусть дана следующая конфигурация объекта: разбиение на прямоугольники с размерами $a_i \times b_i$ и высотой h_i , где i – номер части разбиения (рис. 1) и заданы требования к освещенности и равномерности. Конфигурация и требования к объекту представлены в табл. 1.

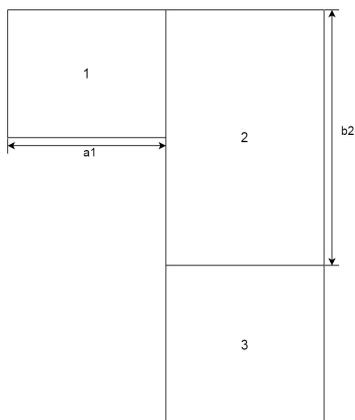


Рис. 1. Схематичное изображение освещаемого объекта

Таблица 1

Конфигурация объекта освещения

Номер помещения, i	Размер $a_i \times b_i$, м	Высота h_i , м	Минимальная освещенность l_i , лк	Минимальная равномерность ρ_i , %
1	5x4	2,5	300	20
2	4x8	2,5	200	30
3	5x5	4	150	15

Правила расположения источников света различных типов

Рассмотрим пример. Пусть в помещении $i = 1$ (таблица 1) устанавливается точечный светильник, кривая силы света которого имеет вид, моделируемый кривой Гаусса:

$$l(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где μ – математическое ожидание (среднее значение), σ – среднеквадратичное отклонение (дисперсия). Равномерность такого точечного светильника можно определить формулой:

$$\rho_{\text{свет}} = \sigma / \mu.$$

Пусть, например, светильник освещает площадку a (рис. 2) с равномерностью $\rho_{\text{свет}} = 30\%$. По требованиям освещенности помещения 1 (табл. 1) необходимо чтобы равномерность освещаемого помещения была $\rho_1 = 20\%$. Значит, в зоне освещения светильника требования выполнены. Но необходимо чтобы требования были выполнены для всего помещения и поэтому требуется либо изменение кривой силы света (установка линз, рефлекторов – площадки b и c на рис. 2), либо просто установка нескольких светильников.

Если при требуемом значении равномерности, расчетная освещенность меньше требуемой для данного помещения, то нужно большее число таких точечных светильников.

Световые пятна от нескольких точечных светильников должны покрывать все помещение (рис. 3).

В случае протяженного светильника, его световое пятно будет представлять собой эллипс, представленный на рис. 4.

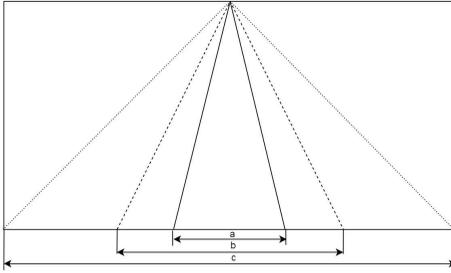


Рис. 2. Схема изменения светового потока точечного светильника при установке линз: *a* – исходное состояние; *b, c* – установка линз

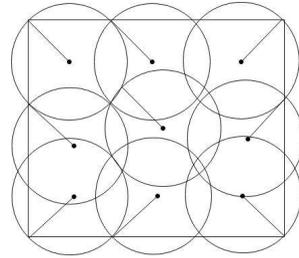


Рис. 3. Схема светового потока нескольких точечных светильников

Для широкого интервала значений равномерности перекрытие световых пятен не будет приводить к нарушению требований по равномерности освещенности.

Результирующая равномерность освещения в *i*-м помещении определяется, по формуле, указанной выше:

$$\rho_i = \frac{\sigma(E_i)}{E_{i\text{cp}}} \cdot 100\%,$$

где $\sigma(E_i)$ – дисперсия освещенности, лм; $E_{i\text{cp}}$ – средняя освещенность в помещении по всем светильникам.

Результирующая равномерность ρ_i будет меньше равномерности ρ_{ij} :

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma(E_{ij})}{E_{ij\text{cp}}}, \quad \rho_i = \frac{\sigma(E_i)}{E_{i\text{cp}}} = \frac{\sigma(\sum_j E_{ij})}{E_{i\text{cp}}} < \frac{\sigma(E_{ij})}{E_{ij\text{cp}}}.$$

Так как $E_{i\text{cp}}$ очевидно больше $E_{ij\text{cp}}$ (из-за наличия перекрытий световых пятен), а $\sigma(\sum_j E_{ij}) < \sigma(E_{ij})$ по свойству дисперсии. Таким образом, для предварительного расчета равномерности, можно опираться на значения равномерностей отдельных светильников.

Критерии оптимизации и оптимизируемая функция

Для точечных светильников, световые пятна от которых покрывают все помещение, образуется потерянная площадь засветки (рис. 5), расчет которой производится следующим образом.

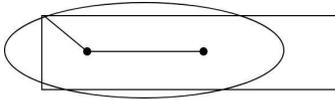


Рис. 4. Схема светового потока протяженного светильника

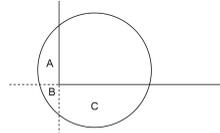


Рис. 5. Потерянные площади засветки

Пусть имеется прямоугольное помещение, которое располагается в углу координатной плоскости и несколько окружностей с координатами (a_i, b_i) с радиусом r_i . Для каждой окружности будет рассчитана своя потерянная площадь ΔS_i , которая будет зависеть от её радиуса и расположения её центра. Потерянная площадь определяется как площадь, которая выходит за пределы прямоугольника:

$$\Delta S_i = A_i + B_i + C_i.$$

Суммарная потерянная площадь по всем помещениям должна быть минимизирована:

$$S = \sum_i \Delta S_i \rightarrow \min$$

Параметрами оптимизации являются расположение центров и радиусов окружностей

Алгоритм оптимизации

В общем виде алгоритм выбора оптимальной осветительной установки при заданном D (количество дней) приведен на рис. 6.

Величина ρ_j – функция зависимости равномерности освещения

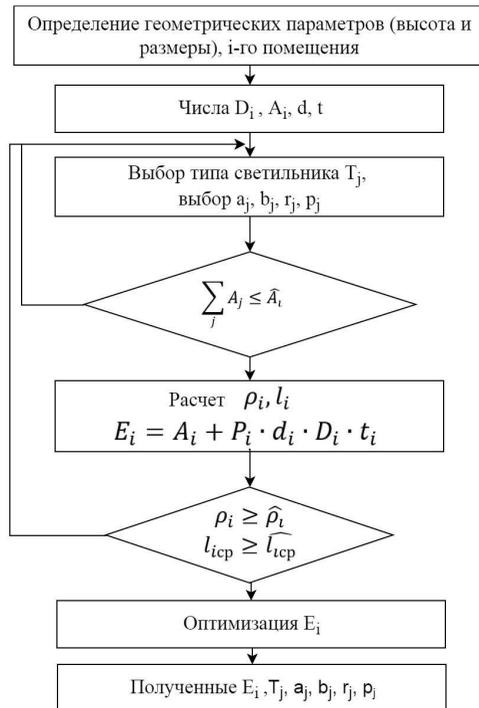


Рис. 6. Алгоритм выбора оптимальной системы освещения

помещения от типа светильника: $\rho_j = \rho_j(T_j)$.

Величина A_j – функция зависимости стоимости осветительного прибора от типа светильника: $A_j = A_j(T_j)$.

Равномерность освещения i -го помещения определяется формулой, указанной выше:

$$\rho_i = \frac{\sigma(\sum_j E_{ij})}{E_{icp}}$$

Вывод и заключение

Разработанный алгоритм позволяет получить оптимальное размещение источников света оптимально выбранного вида (видов) по помещению проектируемого объекта в соответствии с требованиями, предъявляемыми к освещенности помещений.

Однако, в расчеты входит неопределенный параметр D – продолжительность эксплуатации системы. Если этот параметр задан проектной документацией, то предложенный алгоритм полностью решает задачу проектирования. Но чаще всего продолжительность эксплуатации системы освещения сама является параметром, зависящим от свойств системы и в проекте, жестко не задается.

Поэтому дальше требуется решить задачу оптимального управления, параметром времени в которой будет продолжительность эксплуатации системы, а управляющей функцией – затраты на эксплуатацию системы. Этот вопрос будет рассматриваться в последующих работах.

Библиографический список

1. **Зуев С.В., Диденко А.А.**, Система освещения длинноволнового фронта // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова 2016. № 9. С. 154–158.

2. **Кравченко А.И., Савкова Т.Н.**, Оптимизация проектирования современных систем освещения промышленных предприятий // Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого. 2013. № 1. С.55–59.

3. **Мишин Д.В.**, Оценка и сравнение экономической эффективности внедрения современных видов освещения в быту // Транспортное дело России. 2011. № 12. С. 9–11.

4. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. 2009. 398 p. [Электронный ресурс]. URL: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE_Adopted_02-2009.pdf

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭКСКАВАТОРА ЭКГ-5А

студент **Ионов А.Е.**

научный руководитель д-р техн. наук, проф. **Авербух М.А.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

***Аннотация.** Наиболее популярной машиной, используемой для добычи полезных ископаемых в карьерах, сейчас является экскаватор. Это землеройные машины, предназначенные для перемещения грунта и копания, которые являются основным типом землеройных погрузочно-разгрузочных машин. Самый широко используемый (примерно 15 000 машин во всем мире) экскаватор ЭКГ-5А – типовая модель малого размера, выпускаемая на Уралмаше с 1980 года. На нем эксплуатируется устаревшая система генератор-двигатель (Г-Д) и в данной статье будет рассмотрена актуальность ее замены на более современную и экономичную систему преобразователь частоты-асинхронный двигатель (ПЧ-АД).*

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

Достоинства и недостатки системы Г-Д и ПЧ-АД:

Система Г-Д постоянного тока технически устарела, но все равно продолжает эксплуатироваться в установках большой мощности, таких как в электропривод экскаватора. Схема силовых цепей системы Г-Д приведена на рис. 1.

В системе Г-Д двигатель М питается по цепи обмотки якоря от отдельного генератора G, который вращается асинхронным М1 или синхронным двигателем. На экскаваторах модели ЭКГ-5А используется асинхронный двигатель, а на более крупных машинах синхронный двигатель. Основной принцип работы системы заключается в изменении приложенного к якорю двигателя напряжения при постоянном напряжении цепи возбуждения.

Как указывалось ранее первичный двигатель М1, вращающий якорь генератора G, представляет собой асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Основным требованием к первичному двигателю, является жесткость его механической характеристики. По-

этому первичный двигатель вращается с постоянной скоростью $n = \text{const}$ и не реверсируется.

Регулировка исполнительного двигателя выполняется с помощью изменения значения и направления тока в обмотках возбуждения генератора (LG) и двигателя (LM).

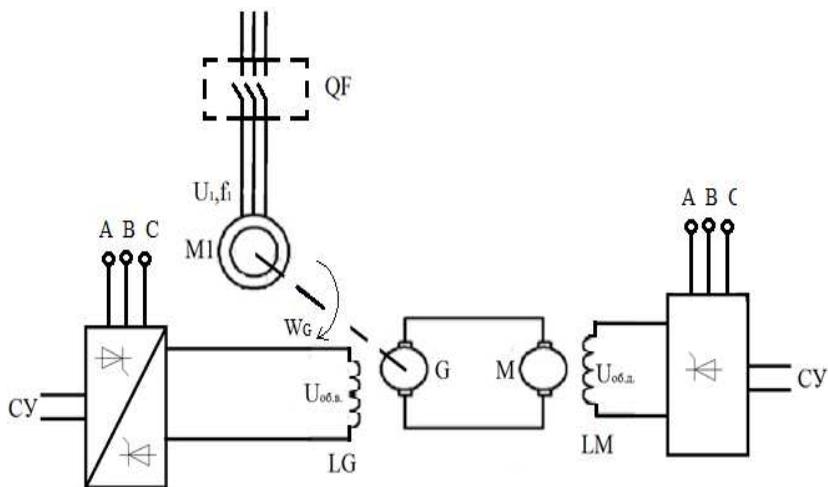


Рис. 1. Схема силовых цепей системы генератор-двигатель

Достоинством системы генератор – двигатель является то, что в случае применения синхронного двигателя в качестве приводного двигателя он, работает с опережающим $\cos\varphi$, что позволяет компенсировать реактивную мощность экскаватора. Так же к преимуществам можно отнести возможность плавного регулирования частоты вращения в большом диапазоне до 16:1, быстрый разгон исполнительного двигателя без применения пускового реостата, то есть с минимальными потерями энергии, а также легкий пуск первичного двигателя, вращающего невозбужденный генератор.

Основным недостатком системы Г-Д являются пять вращающихся агрегатов (асинхронный двигатель, генератор подъема, вращения, напора и собственных нужд) в преобразователе, а так же низкий к.п.д. всей системы, из за многократного преобразования энергии, большая масса, стоимость и габаритные размеры, инерционность и общая мощ-

ность электрических машин превышающая в три раза мощность исполнительного двигателя [1].

Далее рассмотрим систему ПЧ-АД. В систему ПЧ-АД входит следующее оборудование: асинхронного двигателя АД с короткозамкнутым ротором и преобразователя частоты ПЧ. В экскаваторной технике в качестве выпрямителя применяется выпрямитель с активным передним фронтом (управляемый) – АФЕ. Это позволяет проводить рекуперацию энергии в сеть при торможении двигателя, а не рассеивать ее на тормозных тиристорах.

Преимущества частотного регулирования в сравнении с системой Г-Д в экскаваторе заключается в следующем:

а) простота обслуживания и меньшие затраты, так как ПЧ-АД отсутствуют подвижные части (щетки в системе Г-Д);

б) более высокие динамические показатели, такие как например быстрдействие;

в) увеличение к.п.д. = 86 % за счет уменьшения элементов в цепи, в то время как у системы Г-Д он равен 78-81% в зависимости от вращающего двигателя;

г) уменьшение затрат энергии на каждый кубометр добываемых ресурсов.

Схема ПЧ с активным передним фронтом приведена на рис. 2.

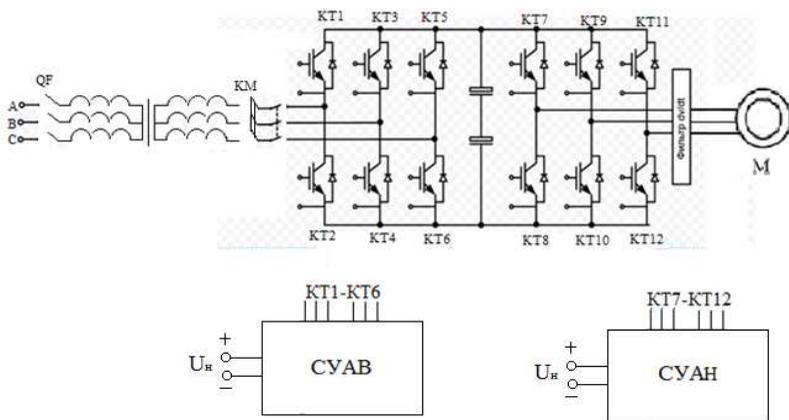


Рис. 2. Схема силовых цепей системы ПЧ-АД с активным передним фронтом

К недостаткам можно отнести большую сложность в управлении, меньшую надежность чем у системы Г-Д и то, что ПЧ является генератором высших гармоник, что негативно сказывается на сети, но в экскаваторах будет использован преобразователь с активным передним фронтом, что полностью уберёт этот недостаток [2].

На основании выше перечисленных причин можно утверждать, что замена системы управления Г-Д на систему ПЧ-АД на данный момент является актуальной.

Для экскаватора ЭКГ-5А было выбрано следующее оборудование для системы ПЧ-АД из технического каталога: асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором “Электромашина”.

На основании расчета эквивалентной мощности, оборотов двигателя, а так же по условию проверки двигателя по перегрузочной способности и перегреву были выбраны следующие двигатели из каталога [5]: асинхронный двигатель вращения АДЧР200L4, асинхронный двигатель напора АДЧР250M4, асинхронный двигатель подъема АДЧР355MLB8. По суммарной мощности, входному и выходному напряжению выбран трансформатор ТСЗ 250-6-0,4. На экскаваторной технике, что бы избежать протекания масла при тряске используется только сухой трансформатор. По среднему току выбран сетевой воздушный дроссель. Исходя из суммарной мощности и тока выбран преобразователь постоянного напряжения Instart FCI-G630-4F. Для каждого двигателя по мощности и среднему току были выбраны автономный инвертор вращения VW3A7252, автономный инвертор напора VW3A7252, автономный инвертор подъема VW3A7258, моторный дроссель подъема ДТМ - 0,10/160 У2, моторный дроссель напора ДТМ - 0,25/66 У2, моторный дроссель вращения ДТМ - 0,10/160 У2 и абсолютный энкодер E50 S [3]. Для повышения продолжительности эксплуатации оборудования его следует изолировать от пыли и металлической стружки.

Далее было выбрано векторное управление и составлена модель электропривода подъема с преобразователем частоты без рекуперации энергии в сеть [4]. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Структурная схема электропривода экскаватора системы ПЧ-АД представлена на рис. 3.

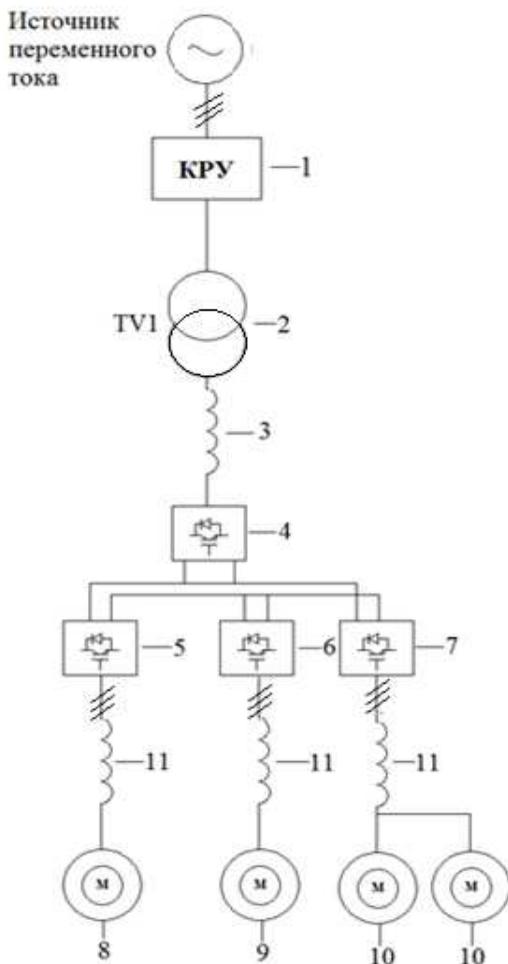


Рис. 3. Структурная схема электропривода экскаватора системы ПЧ-АД:

1 – комплексное распределительное устройство; 2 – силовой трансформатор 6/0,4 кв; 3 – сетевой дроссель; 4 – выпрямитель с активным передним фронтом (AFE); 5 – инвертор электропривода подъема; 6 – инвертор электропривода вращения напора; 7 – инвертор электропривода вращения; 8 – асинхронный электродвигатель подъема; 9 – асинхронный электродвигатель напора; 10 – асинхронный электродвигатель вращения; 11 – моторный дроссель

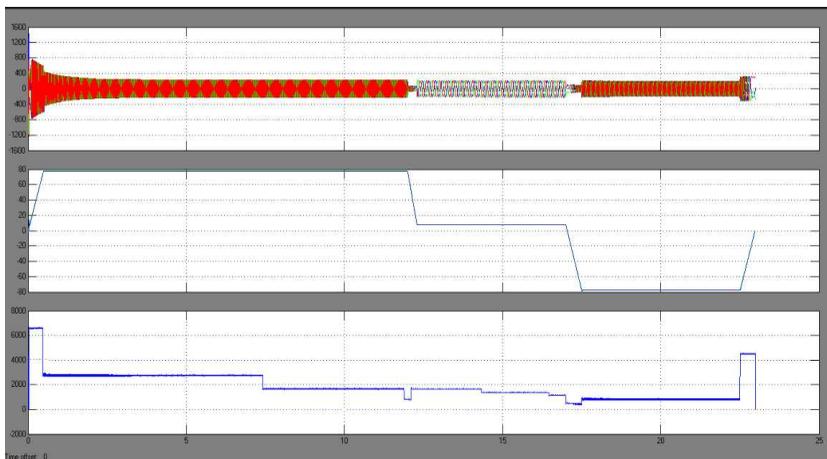


Рис. 4. Результат моделирования с полной нагрузкой

Сравним полученные результаты с тахограммой (рис. 5) и нагрузочной диаграммой (рис. 6) электропривода подъема системы Г-Д.

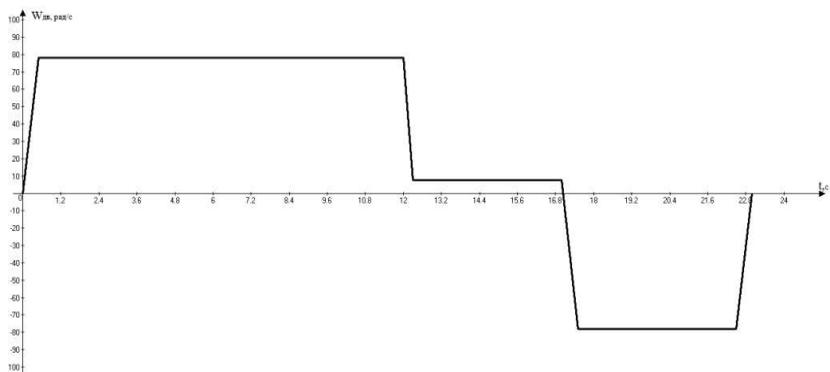


Рис. 5. Тахограмма механизма подъема

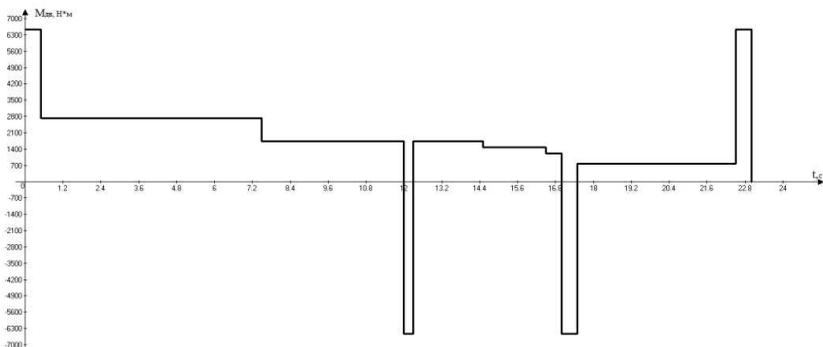


Рис. 6. Нагрузочная диаграмма механизма подъема

На основании выше представленных диаграмм системы Г-Д и моделирования можно сделать вывод, что оборудование подобранно правильно, выдерживает заданные параметры по скорости и моменту двигателя.

В заключении можно отметить, что система ПЧ-АД помогает решить множество выше перечисленных проблем системы Г-Д, а векторный закон управления позволяет реализовать нагрузочные диаграммы и обеспечить необходимый диапазон регулирования и перегрузочную способность двигателя. Поэтому на экскаваторах модели ЭКГ-5А рекомендуется устанавливать систему преобразователь частоты – двигатель с векторным управлением.

Библиографический список

1. Разработки и исследования экскаваторных электроприводов / В.И. Юпочев, Л.М. Миронов, А.М. Резниковский, С.А. Фомин // Электротехника. 2000. № 2. С. 20–25.
2. Кудрявцев А.В., Ладыгин А.Н. Современные преобразователи частоты в электроприводе // Приводная техника. 1998. № 3. С. 21–28.
3. Авербух М.А., Семернин А.Н. Проектирование частотно-регулируемого электропривода динамических нагнетателей: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 98 с.
4. Павленко С.В. Экскаваторы с разными системами управления главных электроприводов для горнорудных предприятий. Статистический анализ надёжности // Привод и управление. 2001. № 1. С. 6–10.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ СЦЕНАРИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НА ОСНОВЕ ДУАЛЬНЫХ МАТРИЧНЫХ МЕТОДОВ

студент **Кулыгин А.С.**
научный руководитель канд. техн. наук, доц. **Шмелёв В.Е.**
*Владимирский государственный университет
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир*

***Аннотация.** Доклад посвящен разработке вычислительного сценария MATLAB, который автоматически учитывает наличие особых ветвей в анализируемой линейной электрической цепи, выбирает наиболее экономичный из дуальных методов анализа и выполняет расчёт электрического состояния. Сценарий применяется при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники».*

Кафедра «Электротехника и электроэнергетика» проводит подготовку бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение»). При проведении занятий по ряду электротехнических дисциплин применяется математическое ПО: система инженерных и научных расчётов MATLAB и пакет MathCad. Данное ПО поддерживает матричные вычислительные операции, что позволяет быстро проводить анализ состояния разветвлённых линейных электрических цепей практически неограниченной сложности. Ранее разработанные вычислительные сценарии, например, [1], требовали ручного преобразования схем, содержащих особые ветви (с нулевым и бесконечно большим сопротивлением).

Цель работы – разработка вычислительного сценария, который автоматизирует эти эквивалентные преобразования с помощью матричных топологических соотношений и автоматически выбирает метод анализа, требующий меньшего числа совместно решаемых уравнений.

Наиболее экономичные автоматизируемые методы анализа разветвлённых электрических цепей базируются на матричных уравнениях. Наиболее часто применяются: метод узловых потенциалов [2] и метод контурных токов [3]. В некоторых случаях вместо метода узловых потенциалов применяют метод напряжений ветвей дерева [4]. По-

следний полностью дуален методу контурных токов [5]. Экономичность этих методов определяется числом совместно решаемых уравнений (числом строк и столбцов в матрице коэффициентов матричного уравнения состояния цепи). Матричная форма уравнений с напряжениями ветвей дерева имеет вид:

$$\left[Y^{(c)} \right] \left[U^{(n)} \right] = \left[J^{(c)} \right], \quad (1)$$

где $\left[Y^{(c)} \right] = \left[Q \right] \left[Y^{(b)} \right] \left[Q \right]^T$ – матрица проводимостей главных сечений; $\left[Q \right]$ – матрица главных сечений, однозначно соответствующая схеме или графу цепи; $\left[Y^{(b)} \right]$ – диагональная матрица проводимостей ветвей; $\left[J^{(c)} \right] = \left[Q \right] \cdot \left(\left[J^{(b)} \right] - \left[Y^{(b)} \right] \left[E^{(b)} \right] \right)$ – столбец источников тока главных сечений; $\left[U^{(n)} \right]$ – столбец напряжений ветвей дерева; $\left[J^{(b)} \right]$ – столбец источников тока ветвей; $\left[E^{(b)} \right]$ – столбец источников ЭДС ветвей.

Матричная форма контурных уравнений имеет вид:

$$\left[Z^{(k)} \right] \left[I^{(k)} \right] = \left[E^{(k)} \right], \quad (2)$$

где $\left[Z^{(k)} \right] = \left[B \right] \left[Z^{(b)} \right] \left[B \right]^T$ – матрица контурных сопротивлений; $\left[B \right]$ – матрица главных контуров, однозначно соответствующая схеме или графу цепи; $\left[Z^{(b)} \right]$ – диагональная матрица сопротивлений ветвей; $\left[E^{(k)} \right] = \left[B \right] \cdot \left(\left[E^{(b)} \right] - \left[Z^{(b)} \right] \left[J^{(b)} \right] \right)$ – столбец контурных ЭДС; $\left[I^{(k)} \right]$ – столбец контурных токов.

Матричное уравнение (1) может корректно формироваться и решаться, если в цепи нет ветвей с нулевыми сопротивлениями. Если такие ветви есть, то нужно эквивалентно преобразовать граф и схему таким образом, чтобы эти ветви были исключены из анализа. Если в таких особых ветвях есть источники ЭДС, то они переносятся во все ветви сечения, которому принадлежит соответствующая особая ветвь, после чего ветвь выводится из анализа, а это сечение исключается из анализа. Такое преобразование выполняется наиболее корректно, если

ветви с нулевым сопротивлением являются ветвями дерева, а источники ЭДС переносятся в ветви связи соответствующих главных сечений.

Матричное уравнение (2) может корректно формироваться и решаться, если в цепи нет ветвей с бесконечными сопротивлениями. Если такие ветви есть, то нужно эквивалентно преобразовать граф и схему таким образом, чтобы эти ветви были исключены из анализа. Если в таких особых ветвях есть источники тока, то они распространяются на ряд ветвей любого контура, которому принадлежит особая ветвь, после чего последняя вместе с контуром выводится из анализа. Такое преобразование выполняется наиболее корректно, если ветви с бесконечным сопротивлением являются ветвями связи, а источники тока распространяются на ветви дерева соответствующих главных контуров.

Весь алгоритм условно можно разбить на блоки:

1. Блок ввода исходных данных и их отображения в командном окне.

2. Анализ топологии цепи.

3. Учёт особых ветвей и уточнение числа совместно решаемых уравнений.

4. Ветвь алгоритма, соответствующая выбранному методу напряжений ветвей дерева.

5. Ветвь алгоритма, соответствующая выбранному методу контурных токов.

6. Расчёт потенциалов узлов по известным напряжениям ветвей дерева, а также расчёт мощностей и подведение их баланса.

Исходными данными разработанного сценария являются следующие переменные:

G_{ra} – граф цепи в виде пар номеров узлов, между которыми фактически расположены ветви;

$сп_0$ – номер общего узла в графе;

E_v – столбец ЭДС ветвей;

J_v – столбец источников тока ветвей;

Z_v – квадратная матрица сопротивлений ветвей;

$пс$ – столько значащих цифр показывать в выходных сообщениях в матрицах.

Ориентированный граф цепи (переменная G_{ra}) представляется двухстрочной матрицей, каждому столбцу которой соответствует ветвь. Первый элемент столбца – номер (числовое обозначение) начального узла ветви, второй элемент – номер конечного узла ветви.

В этом массиве каждому узлу соответствует своё действительное число (не обязательно целое положительное), т.е. нумерация узлов не сквозная.

Ввод входных переменных осуществляется диалоговым окном, разворачиваемым встроенной функцией `inputdlg`. Перед вызовом этой функции проверяется существование входных переменных в рабочей области MATLAB [6]. В зависимости от этого формируются строки символов, которые будут содержаться в строках редактирования диалогового окна. Каждой вводимой переменной соответствует своя строка редактирования. При развёртывании окна содержимое строк редактирования по умолчанию соответствует уже существующим значениям входных переменных. Для несуществующих переменных предусмотрены начальные умолчания. Ввод пустых строк приводит к принятию существующих текущих значений входных переменных.

Если окно закрывается нажатием кнопки 'OK', то введённые строки принимаются, значения введённых переменных отображаются в командном окне, и сценарий выполняется. Если окно закрывается нажатием кнопки 'Cancel', то введённые строки не принимаются, и сценарий завершается без вычислений.

Такая технология ввода исходных данных позволяет многократно проводить анализ линейных цепей при изменении их параметров или топологии. Так обеспечивается удобство вычислительного экспериментирования.

Анализ топологии цепи начинается с построения списка всех номеров (числовых обозначений) узлов графа, формируется граф цепи со сквозной натуральной нумерацией узлов. Узлы подсчитываются, формируется список сквозных номеров узлов без и с исключением общего узла. Подсчитываются ветви графа. Формируется неопределённая матрица узловых соединений.

Число линейно-независимых узлов определяется как ранг неопределённой матрицы узловых соединений. Граф проверяется на связность. Число односвязных подмножеств графа равно числу узлов минус число линейно-независимых узлов. Если граф несвязный (односвязных подмножеств больше одного), то выполнение сценария прекращается без анализа цепи.

Если граф связный, то дерево существует, и число ветвей дерева равно числу линейно-независимых узлов. Число ветвей связи определяется вычитанием из общего количества ветвей числа ветвей дерева.

Учёт особых ветвей и уточнение числа совместно решаемых уравнений начинается с построения списка номеров ветвей с бесконечными сопротивлениями и списка номеров ветвей с нулевыми сопротивлениями. Эти особые ветви по отдельности подсчитываются. Уточнённое число узловых уравнений равно числу ветвей дерева минус число ветвей с нулевыми сопротивлениями. Уточнённое число контурных уравнений равно числу ветвей связи минус число ветвей с бесконечными сопротивлениями.

Определённая матрица узловых соединений формируется путём вычёркивания из неопределённой матрицы строки, соответствующей общему узлу. Если число контурных уравнений не больше числа уравнений с напряжениями ветвей дерева, то выбирается метод контурных токов, иначе выбирается метод напряжений ветвей дерева.

Если выбран метод напряжений ветвей дерева, то производится слияние узлов ветвей с нулевыми сопротивлениями, а сами эти ветви исключаются из копии матрицы узловых соединений. Номера оставленных в анализе ветвей записываются в массив. По преобразованной таким образом матрице узловых соединений формируются списки ветвей дерева и ветвей связи. В список ветвей дерева добавляются ветви с нулевым сопротивлением. Из матрицы узловых соединений формируется матрица главных сечений исходной цепи. Источники ЭДС переносятся из особых ветвей дерева в ветви связи соответствующих главных сечений. Матрица $[Q]$ преобразованной цепи получается из соответствующей матрицы исходной цепи путём вычёркивания из неё особых ветвей и их главных сечений. Строится и решается матричное уравнение относительно напряжений ветвей дерева преобразованной цепи (1). Столбец напряжений ветвей дерева исходной цепи дополняется значениями ЭДС исключённых из анализа ветвей. Стандартными методами рассчитываются напряжения и токи ветвей, а также их пассивных участков.

Если выбран метод контурных токов, то ветви с бесконечными сопротивлениями исключаются из копии матрицы узловых соединений. Номера оставленных в анализе ветвей записываются в массив. По преобразованной таким образом матрице узловых соединений формируются списки ветвей дерева и ветвей связи. В список ветвей связи добавляются ветви с бесконечным сопротивлением. Из матрицы узловых соединений формируется матрица главных контуров исходной цепи. Источники тока особых ветвей связи распространяются на ряд ветвей дерева соответствующих главных контуров. Матрица $[B]$ пре-

образованной цепи получается из соответствующей матрицы исходной цепи путём вычёркивания из неё особых ветвей и их главных контуров. Строится и решается матричное уравнение относительно контурных токов преобразованной цепи (2). Столбец токов ветвей связи исходной цепи дополняется значениями токов источников исключённых из анализа ветвей. Стандартными методами рассчитываются токи и напряжения ветвей, а также их пассивных участков.

В конце анализа цепи потенциалы узлов вычисляются левым матричным делением транспонированного блока матрицы узловых соединений, соответствующего ветвям дерева, и столбца напряжений ветвей дерева. Расчёт мощностей и подведение их баланса осуществляется на основе стандартных соотношений теории цепей и операций почленных произведений массивов.

Представленный алгоритм и соответствующий вычислительный сценарий проверены многочисленными вычислительными экспериментами на линейных сложно-разветвлённых электрических цепях: постоянного тока с числом ветвей 9 – 10 и числом узлов 5 – 6, содержащих особые ветви (не менее, чем по одной каждого типа); синусоидального тока на фиксированной частоте, в том числе, несимметричных трёхфазных, с применением метода комплексных действующих значений. Разработанный сценарий опробован также при решении задач анализа переходных процессов в линейных сложно-разветвлённых стационарных электрических цепях «классическим» методом, когда до коммутации имел место установившийся режим, состоящий из нескольких подрежимов (постоянный и синусоидальные на разных частотах). Мгновенная коммутация в этих вычислительных экспериментах была связана с изменением параметров и характера действия источников, короткими замыканиями узлов, размыканиями ветвей. Для расчёта составляющих процессов данный сценарий приходилось запускать многократно без формального изменения топологии, но с изменением параметров ветвей (действительных и комплексных с конечных до конечных значений, с нулевых до конечных значений и наоборот, с конечных до бесконечных значений и наоборот, с нулевых до бесконечных значений и наоборот). Все моделируемые подрежимы и начальные состояния в момент коммутации (+0) отличались составом особых ветвей, поэтому автоматически выбирались разные методы анализа (контурных токов или напряжений ветвей дерева).

В ходе многочисленных вычислительных экспериментов результаты работы сценария сравнивались с результатами расчётов по стан-

дартным методикам с ручными преобразованиями участков цепей с особыми ветвями. Относительные расхождения не превышали ошибок машинного округления арифметики с плавающей точкой (10^{-15} для типа данных double).

Выводы. Применён собственный алгоритм построения дерева цепи и его дополнения по матрице узловых соединений от общего узла с применением операций над множествами.

Применён собственный блочно-матричный алгоритм формирования матрицы главных сечений и главных контуров цепи по матрице узловых соединений с известными списками ветвей дерева и связи.

Выведены и применены блочно-матричные соотношения переноса источников ЭДС из особых ветвей дерева в ветви связи того же сечения, а также распространения источников тока в ветви связи на ветви дерева того же контура. Трассировка ветвей нигде не применялась.

Разработанный сценарий полезен для изучения студентами теории линейных электрических цепей в части многократного вычислительного экспериментирования.

Библиографический список

1. **Шмелёв В.Е.** Вычислительный сценарий анализа разветвлённых линейных электрических цепей произвольной сложности с сосредоточенными параметрами в системе MATLAB // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. № 4. С. 64–69.
2. **Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В.** Теоретические основы электротехники. Том 1. СПб.: Питер, 2009. 512 с.
3. **Евсеев М.Е.** Теоретические основы электротехники: учебное пособие. СПб.: Политехника, 2015. 380 с.
4. Теоретические основы электротехники. Т. 1. Основы теории линейных цепей / Под ред. П.А. Ионкина. М.: Высш. школа, 1976. 544 с.
5. **Малинин Л.И., Нейман В.Ю.** Теория цепей современной электротехники. Новосибирск: НГТУ, 2013, 348 с.
6. **Дьяконов В.П.** MATLAB 7.* / R2006 / R2007: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. 768 с.

УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

студент **Мильто О.А.**

студент **Калмыков К.С.**

научный руководитель канд. техн. наук, доц. **Амосов Н.Т.**

Санкт-Петербургский политехнический университет

Петра Великого, г. Санкт-Петербург

***Аннотация.** В целях повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов предлагается утилизация теплоты уходящих газов с дальнейшим её применением в цикле паротурбинной установки. Рассматривается возможность установки конденсационного теплоутилизатора поверхностного типа и использование потенциала уходящих газов для подогрева конденсата в первом по ходу воды подогревателе низкого давления.*

На сегодняшний день вопрос рационального использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) является одним из наиболее важных при оценке эффективности работы промышленного производства. Одним из основных путей экономии ТЭР в энергетике является повышение эффективности их использования путём утилизации теплоты уходящих газов. При этом большое практическое значение приобретают вопросы полезного использования их энергетического потенциала.

Разработка предложений по использованию теплоты уходящих газов в цикле паротурбинной установки (ПТУ) и анализ влияния использования потенциала дымовых газов на коэффициент полезного действия (к.п.д.) энергоустановки и расход топлива в котлоагрегате.

Для глубокого охлаждения газов на практике используют теплообменные аппараты контактного или поверхностного типа, которые называют конденсационными теплоутилизаторами (КТ). Применение теплоутилизаторов делает возможным максимально допустимую утилизацию теплоты с получением большого количества горячей воды или пара на технологические нужды и одновременное обеспечение нормальной эксплуатации газодымового тракта вследствие понижения температуры отходящих газов.

Одним из вариантов использования низкопотенциальной теплоты может быть её применение в цикле ПТУ. В качестве примера рассмотрена тепловая схема энергоустановки на базе турбины К-300-170-1 и трёх котлов БКЗ-320-140ГМ (рис. 1).

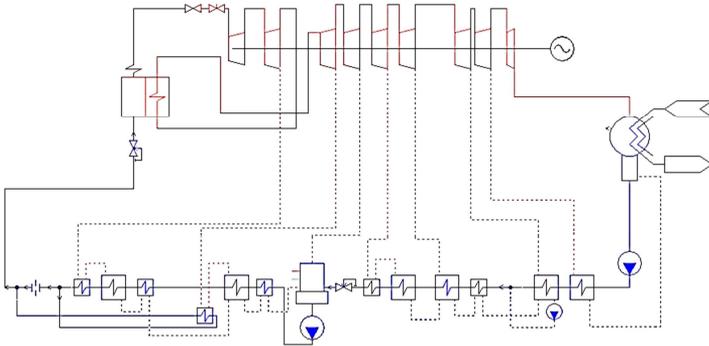


Рис. 1. Тепловая схема энергоблока [1]

С целью оценки эффективности использования потенциала дымовых газов в цикле внесены следующие конструктивные изменения: в один из котлоагрегатов встроен поверхностный теплоутилизатор, который связан с первым подогревателем низкого давления (ПНД-1) промежуточным водяным контуром. Подвод теплоты в ПНД-1 осуществляется не от отборного пара турбины, а от воды, подогреваемой в теплоутилизаторе котла уходящими газами (рис. 2).

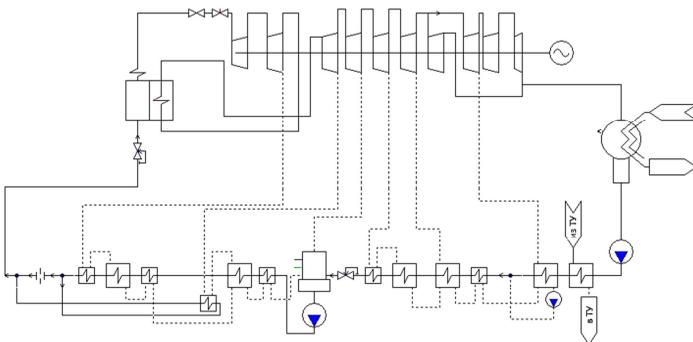


Рис. 2. Тепловая схема энергоблока с учётом внесенных изменений

Произведён расчёт параметров нового участка тепловой схемы (рис. 3).

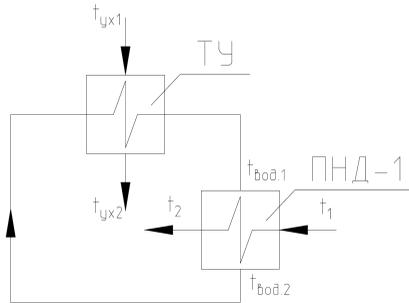


Рис. 3. Расчётная схема

Расчёт температуры воды промежуточного контура на входе в ПНД-1 из баланса подогревателя:

$$G_{\text{к}} \cdot c_{\text{рвод}} \cdot (t_2 - t_1) = G_{\text{вод}} \cdot c_{\text{рвод}} \cdot (t_{\text{вод.1}} - t_{\text{вод.2}}), \quad (1)$$

где $G_{\text{к}}$ – расход воды через ПНД-1 в цикле ПТУ; $c_{\text{рвод}}$ – удельная теплоёмкость воды; t_1, t_2 – температуры воды на входе и выходе ПНД-1 соответственно; $G_{\text{вод}}$ – расход воды промежуточного контура; $t_{\text{вод.1}}, t_{\text{вод.2}}$ – температуры воды промежуточного контура на входе и выходе ПНД-1 соответственно.

$$t_{\text{вод.1}} = \frac{G_{\text{к}} \cdot c_{\text{рвод}} \cdot (t_2 - t_1)}{G_{\text{вод}} \cdot c_{\text{рвод}}} + t_{\text{вод.2}}. \quad (2)$$

Расчёт площади поверхности теплоутилизатора из баланса ТУ:

$$G_{\text{вод}} \cdot c_{\text{рвод}} \cdot (t_{\text{вод.1}} - t_{\text{вод.2}}) = k_{\text{ТУ}} \cdot F_{\text{ТУ}} \cdot \overline{\Delta t_{\text{ТУ}}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{ТУ}}$ – коэффициент теплоотдачи; $F_{\text{ТУ}}$ – площадь поверхности теплообмена; $\overline{\Delta t_{\text{ТУ}}}$ – среднелогарифмическая разность температур.

Минимальная температура уходящих газов выбирается по температуре точки росы [2].

Необходимая площадь поверхности теплообмена:

$$F_{\text{ТУ}} = \frac{G_{\text{вод}} \cdot c_{p\text{вод}} \cdot (t_{\text{вод.1}} - t_{\text{вод.2}})}{k_{\text{ТУ}} \cdot \Delta t_{\text{ТУ}}}. \quad (4)$$

В связи с отключением отбора пара из турбины на ПНД-1 при условии сохранения количества вырабатываемой мощности снижается расход пара в голову турбины, что приводит к снижению расхода топлива на выработку перегретого пара в котельном агрегате.

Расход топлива, подаваемого в топку [2]:

$$B = \frac{D_{\text{пе}} \cdot (i_{\text{п.п}} - i_{\text{п.в}}) + D_{\text{пр}} \cdot (i_{\text{кип}} - i_{\text{п.в}}) + D_{\text{пе}} \cdot (i''_{\text{вТ}} - i'_{\text{вТ}})}{Q_{\text{р}}^{\text{п}} \cdot \eta_{\text{ка}}}. \quad (5)$$

Экономия топлива складывается из двух составляющих - эффекта от внедрения теплоутилизатора в котельную установку и, следовательно, снижения потерь теплоты с уходящими газами [4], и эффекта от снижения расхода производимого перегретого пара в связи с отключением отбора в турбине.

Совершенство работы энергоблока тепловой станции оценивается коэффициентом полезного действия $\eta_{\text{ЭБ}}$ [3]:

$$\eta_{\text{ЭБ}} = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{\text{ка}} \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{ЭГ}} \cdot \eta_{\text{тр}}, \quad (6)$$

где η_t – термический к.п.д. цикла; η_{oi} – внутренний относительный к.п.д. паровой турбины; $\eta_{\text{ка}}$ – к.п.д. котлоагрегата; $\eta_{\text{м}}$ – механический к.п.д. турбины; $\eta_{\text{ЭГ}}$ – к.п.д. электрогенератора; $\eta_{\text{тр}}$ – к.п.д. транспорта теплоты.

Принимаются $\eta_{\text{м}} = 0,99$, $\eta_{\text{ЭГ}} = 0,985$, $\eta_{\text{тр}} = 0,99$ [3]. к.п.д. котла брутто $\eta_{\text{к}}^{\text{бр}}$ рассчитывается согласно [4].

Термический к.п.д. рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(h_0 - h'_k) - (h_{\text{пв}} - h'_k)}{h_0 - h_{\text{пв}}}, \quad (7)$$

Внутренний относительный к.п.д. турбины представляет собой отношение использованного теплоперепада к располагаемому:

$$\eta_{oi} = \frac{H_i}{H_0}. \quad (8)$$

Результаты расчёта приведены в табл. 1.

Таблица 1
Влияние внесённых в цикл изменений на эффективность работы энергоустановки

Оцениваемый параметр	До модернизации	После модернизации
$D_{\text{пе}}, \text{т/ч}$	891,0	870,4
$\eta_{\text{ЭБ}}, \%$	41,292	42,100
$\Delta B_{\text{топл}}, \text{млн. м}^3/\text{год}$ (при 6000 ч работы в год)	7,34	

Выводы

1. Увеличение к.п.д. энергоблока в связи с введением теплоутилизатора и использованием теплоты уходящих газов в цикле ПТУ составило 0,808%;

2. Годовая экономия топлива, рассчитанная из условия 6000 часов работы установки в год, составила 7,34 млн. м³/год.

Библиографический список

1. СТО 70238424.27.040.006-2009 Турбина паровая К-300-170 ЛМЗ. Технические условия на капитальный ремонт. Нормы и требования.

2. **Ковалев А.П.** Парогенераторы: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 376 с.

3. **Рыжкин В.Я.** Тепловые электрические станции: Учебник для теплоэнерг. спец. вузов. М.-Л.: Энергия, 1967. 400 с.

4. **Амосов Н.Т., Мильто О.А, Калмыков К.С.** Повышение эффективности работы котельных агрегатов за счёт утилизации низкопотенциальной теплоты // Неделя науки СПбПУ. Материалы конференции с международным участием. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2018. С. 44–47.

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИЖС

аспирант **Прокопишин Д.И.**
научный руководитель д-р техн. наук, проф. **Авербух М.А.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

***Аннотация.** В статье рассматривается экспериментальный способ получения частотных характеристик участка сети на примере провода ВВГ 2х1,5 длиной 100 м. В результате эксперимента была получена зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты. Установлено что на исследуемом участке сети могут возникать резонансные явления, которые необходимо учитывать при установке фильтрокомпенсирующих устройств*

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

Как известно, сегодня значительную часть бытовых электроприёмников составляют однофазные устройства с нелинейной вольтамперной характеристикой. Данные электроприёмники являются источниками высших гармоник тока и напряжения в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства (ИЖС)[1-3]. Для компенсации высших гармоник используются различные фильтрокомпенсирующие устройства, такие как пассивные[4] и активные фильтры[5-8]. Однако особенностью линии электропередачи системы электроснабжения ИЖС является их значительная протяженность, это приводит к тому, что необходимо учитывать частотные характеристики линии.

Целью работы является получение частотных характеристик участка сети на примере провода ВВГ 2х1,5 длиной 100 м.

Получение частотных характеристик возможно двумя способами: аналитический [9-11], который реализуется на основании схемы замещения исследуемого участка цепи и экспериментальные методы [12].

В работе получение частотных характеристик производилось экспериментальным способом. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Исследуемый провод подключался к источнику синусоидального сигнала регулируемой частоты в точках 1 и 2.

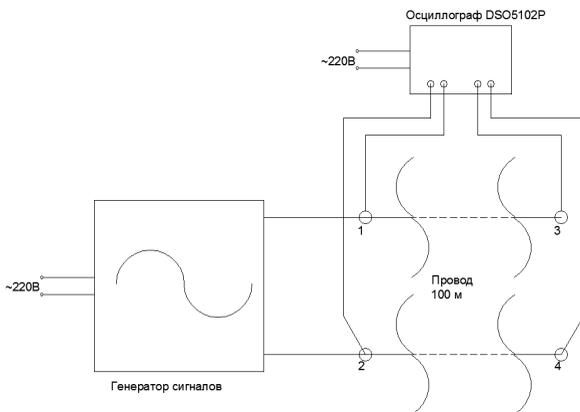


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения зависимости коэффициента усиления напряжения от частоты

К этим же точка подключался первый канна цифрового осциллографа DSO5202P. Основные технические характеристики осциллографа DSO5202P приведены в табл. 1.

Таблица 1
Основные технические характеристики осциллографа DSO5202

Параметр	Значение
Аналоговая полоса пропускания	100 МГц
Входной импеданс	1МОм
Частота дискретизации	0,5ГГц в 2-х канальном режиме
Входная чувствительность	От 2мВ/деление до 5В/деление
Вертикальное разрешение	8 бит

К точкам 3 и 4 подключался второй канал осциллографа. В опыте производилось измерение действующего значения входного (точки 1 и 2) и выходного (точки 3 и 4) напряжения. На основании полученных значений была построена частотная характеристика (рис. 2), которая представляет собой зависимость отношения выходного напряжения к входному (коэффициент усиления по напряжению) в зависимости от частоты.

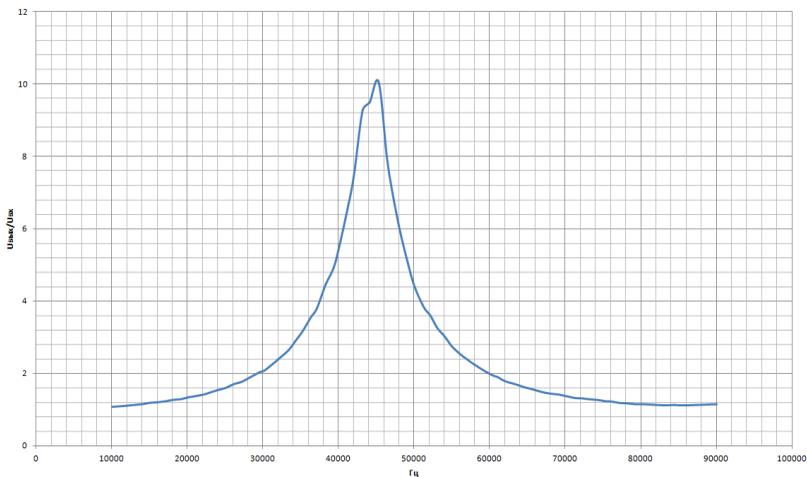


Рис. 2. Экспериментальная зависимость коэффициента усиления по напряжению от частоты для участка провода 2х1,5 длиной 100 м

На полученной зависимости можно выделить максимум на частоте 45кГц, при которой коэффициент усиления по напряжению равен 10, данный максимум свидетельствует о наличии резонансных явлений в исследуемом проводе.

В результате проведённых экспериментов было установлено, что на участке провода длиной 100м могут возникать резонансные явления. Эти явления необходимо учитывать при установке фильтрокомпенсирующих устройств, т.к. ветви фильтра и сеть могут создавать колебательные контуры, которые приведут к возможному усилению гармоник тока и напряжения на высоких частотах.

Библиографический список

1. **Авербух, М. А., Жилин Е.В.** О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Энергетик. 2016. № 6. С. 54–57.
2. **Авербух, М. А., Жилин Е.В.** Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов // Промышленная энергетика. 2017. № 12 С. 40–45.

3. **Боярская Н. П., Довгун В. П.** Гармонический анализ процессов в электрических сетях с нелинейными нагрузками // Вестник КрасГАУ. 2010. № 2. С. 135–141.
4. **Довгун В. П., Боярская Н. П., Новиков В. В.** Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 9–10. С. 31–39.
5. **Лоскутов, А. Б.** Имитационная модель активного фильтра для четырёхпроводной сети // Промышленная энергетика. 2013. № 10. С. 40–44.
6. **Скурятин Ю. В., Белоусов А. В.** Повышение эффективности активной фильтрации. Прямое управление потребляемой мощностью // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 1. С. 71–77.
7. **Мещеряков В. Н., Хабибуллин М. М.** Компенсация гармонических искажений и реактивной мощности в однофазных электрических сетях посредством параллельного активного фильтра электроэнергии на базе релейного регулятора тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. Новочеркасск. 2013. № 4. С. 54–57.
8. **Жилин Е.В.** Активный силовой фильтр для трёхфазной четырёхпроводной сети // Международная научно-техническая конференция молодых учёных БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, 2017. С. 4909–4913.
9. **Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Абдуллазянов Р.Э.** Частотные характеристики электропередачи распределительной электрической сети // Проблемы энергетики. 2011, № 9–10. С.177–182.
10. **Арриалага Дж., Брэдли Д., Боджер П.** Гармоники в электрических сетях; Пер. с англ. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
11. **Харлов Н.Н.** Резонансные режимы многопроводных линий электропередачи // Электричество. 2009. № 12. С. 9–13.
12. **Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Афанасьев М.Ю.** Исследование резонансных явлений в распределительных электрических сетях среднего напряжения систем внутривзаводского электроснабжения промышленных предприятий // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2017. Том 5, № 4. С. 51–62.

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ РПН В СРЕДЕ MATLAB С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

магистрант **Харламов К.Д.**
научный руководитель д-р техн. наук, проф. **Авербух М.А.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

***Аннотация.** В данной работе проводится исследование перспектив применения алгоритмов нечеткой логики для решения прикладных задач электроэнергетики, а также проводится моделирование алгоритма управления устройствами РПН в среде MATLAB с использованием нечеткой логики.*

***Ключевые слова:** Электроэнергетика, показатели качества электроэнергии, нечеткая логика, регулирование под напряжением, алгоритм.*

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

Установившееся отклонение напряжения является одним из главных параметров качества электрической энергии [1]. Проблема управления напряжением стоит особенно остро в сетях 0,4 кВ, это связано с развитием коттеджного строительства, что приводит иногда к значительному повышению установленной нагрузки, которая носит распределенный характер. Такие условия работы могут привести как к недопустимому снижению напряжения у потребителей, так и к повреждению элементов линии. Рассмотрим в качестве примера расположенную в Белгородской области воздушную линию напряжением 0,4 кВ, которая питается от однострансформаторной подстанции КТП-301, которая в свою очередь питается от ПС Нечаевка 35 кВ. От КТП-301 отходят две линии 0,4 кВ (рис. 1, 2).

Одним из способов осуществления регулирования напряжения на отходящих линиях является использование трансформаторов, оснащенных устройствами РПН [2].

В основе алгоритма управления положениями отпайки РПН используется теория нечетких (fuzzy) множеств [3].

Для реализации алгоритма на основе нечеткой логики используется система математического моделирования MATLAB со встроенным

пакетом Fuzzy Logic Design. С её помощью можно создать набор правил, предназначенных для управления контроллером. Также данный комплекс позволяет построить поверхности по результатам моделирования и проверить работоспособность алгоритма при задании различных входных данных [4].

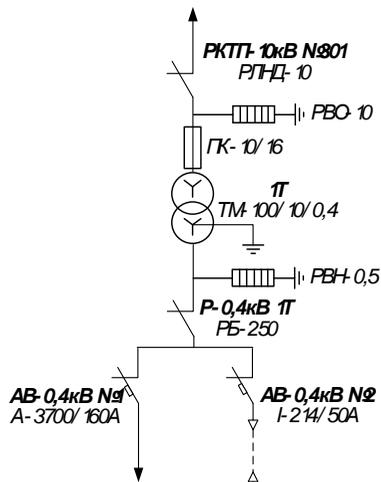


Рис. 1. Схема подстанции с питающей и отходящими линиями

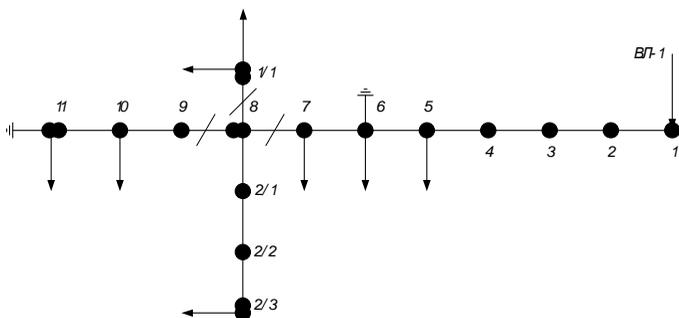


Рис. 2. Схема отходящей линии ВЛ-1 0,4 кВ

Создание и редактирование системы нечеткого вывода в графическом режиме возможно с помощью специального редактора. Для от-

крытия редактора необходимо ввести функция «fuzzy» в окне команд. Данная функция дает возможность создавать и редактировать различные параметры системы нечеткого вывода [5].

В качестве нечеткого алгоритма был выбран алгоритм Мамдани, так как он является часто используемым в программировании и при этом позволяет наглядно представить все используемые величины.

Входными переменными являются положение отпайки РПН трансформатора и напряжение. В качестве выходных данных будет получено решение об изменении положения отпайки РПН.

В качестве входных данных будут использованы нечеткие функции принадлежности напряжения и положения отпайки РПН (рис. 3). Треугольные функции выбраны потому, что в реальности регулирование носит ступенчатый характер, то есть изменение положения отпайки РПН, вызывающее изменение коэффициента трансформации, происходит на определенное целое число.

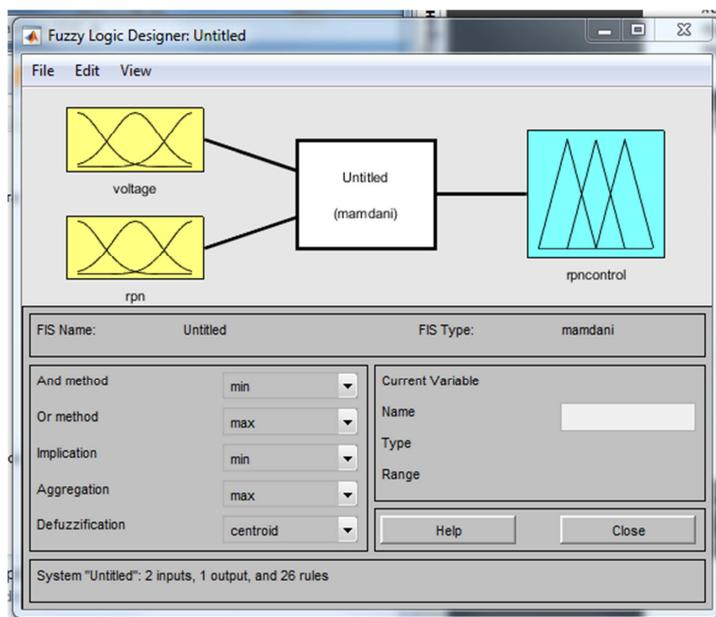


Рис. 3. Готовая модель с двумя входными функциями

После выбора нечетких функций создается база из правил (рис. 4), которые определяют взаимоотношения этих функций.

Правила создавались по следующим принципам:

- если напряжение на шинах потребителя очень низкое или низкое, то положение отпайки РПН должно перемещаться вниз;
- если напряжение на шинах потребителя очень высокое или высокое, то положение отпайки РПН должно перемещаться вверх.

После создание базы правил можно проверить работу модели на конкретных примерах а также построить поверхность, которая позволяет визуализировать полученный результат.

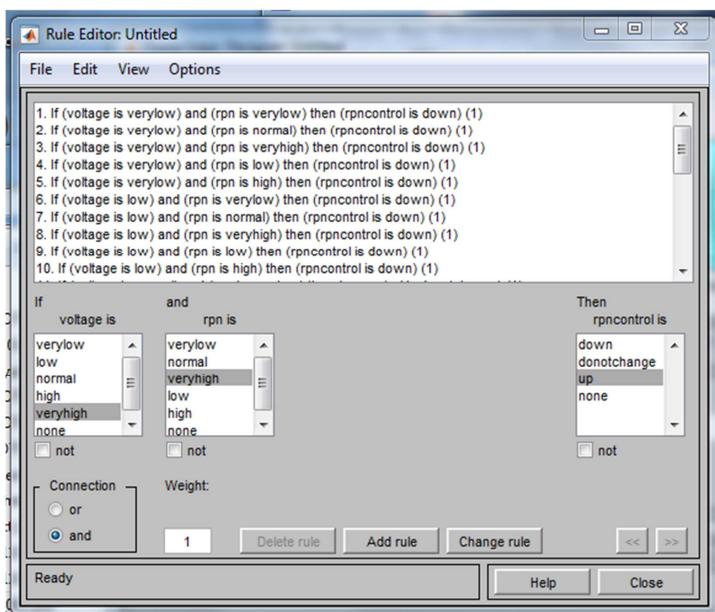


Рис. 4. Редактор правил

Рассмотрим пример работы системы (рис. 5). Отпайка РПН занимает положение 7, при этом напряжение у потребителя снизилось до недопустимого значения (180 В). В качестве результата получим новое положение отпайки РПН, программа рекомендует переключить отпайку на номер 2. Действительно, при таком переключении напряжение у потребителя повысится.

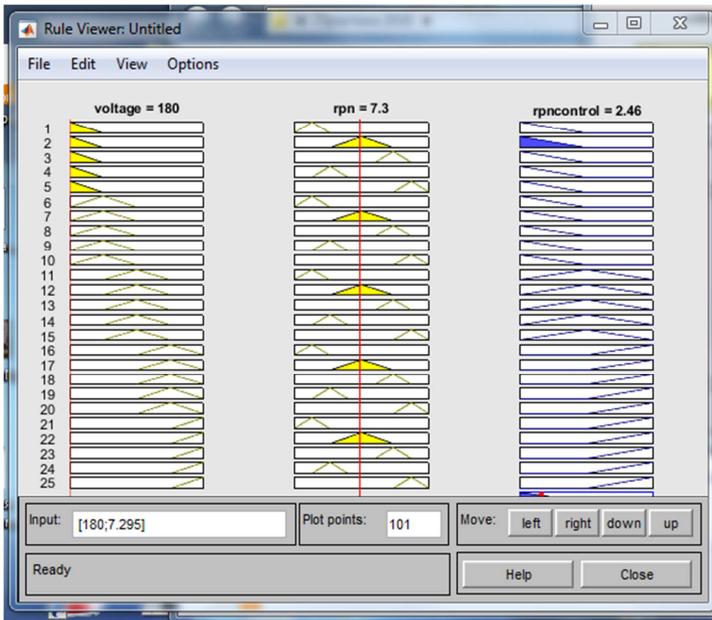


Рис. 5. Пример работы модели

Как показано на рис. 6, при снижении напряжения ниже допустимого система предлагает произвести переключение на более низкую отпайку, что повысит напряжение у потребителя. При значительном повышении напряжения переключение должно производиться на более высокую отпайку, что снижает напряжение у потребителя.

Данная модель, созданная на основе прикладного пакета FUZZY-Logic, позволяет автоматически регулировать и поддерживать напряжение в сельских и районных распределительных сетях, при этом обладая достаточно адекватной точностью, что является актуальной задачей в настоящее время. Проведенное моделирование показывает возможность применения алгоритмов нечеткой логики для решения инженерных задач.

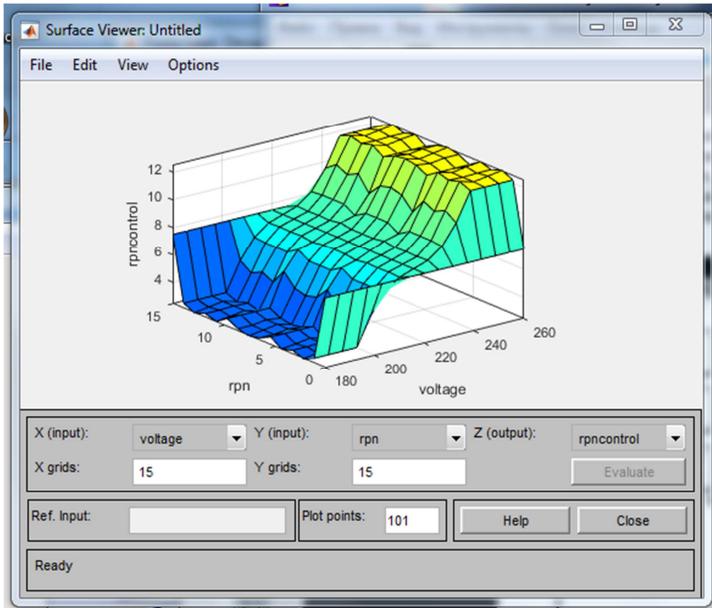


Рис. 6. Построенная по результатам моделирования поверхность

Библиографический список

1. ГОСТ 32144-13 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: Стандартинформ, 2014. 16 с.
2. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SymPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
3. **Герман-Галкин С.Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
4. **Леоненков А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 725 с.
5. **Жмак Е.И., Манусов В.З.** Обоснование принципа нечеткого регулирования напряжения с помощью РПН трансформаторов // Электроэнергетика: Сб. науч. тр. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. С. 32–42.

АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ КОНФЕРЕНЦИИ ICES-2018

В разделе приводятся аннотации англоязычных докладов конференции «Энергетические системы» (ICES-2018). Полный текст докладов размещен в издательстве IOP Science (Великобритания) в отдельном выпуске электронного журнала «Journal of Physics: Conference Series (JPCS)», как материалы конференции ICES-2018. Ссылка на выпуск электронного журнала размещена на сайте конференции (<http://es.bstu.ru/archive/2018>).

Section 1. HEAT AND POWER ENGINEERING

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF SPHERE COOLING USING AIR/WATER MIST TWO PHASE FLOW*

A.H. Abed^{1,2}, S.E. Shcheklein¹ and V.M. Pakhaluev¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg

²University of Technology, Baghdad

Abstract. To improve the cooling performance for the future generation of gas-cooled equipment, experimental studies on air/water mist heat transfer of single sphere inside a cylindrical channel have been carried out with an aim to investigate the heat transfer enhancement by suspending tiny water mist into air flow. The effect of the different key factors such the inlet Reynolds number, surface heat flux and water flux density on friction flow and heat transfer characteristics are examined. Experiments were performed in five cases using air as well as air/water mist two phase flow as working coolant for range of water flux density ($j = 23.39 - 111.68 \text{ kg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$). The results obtained from the related experimental work revealed that the presence of water mist leads to a significant increase in heat transfer over the use of air coolant alone. The Nusselt numbers are respectively 1%, 19.7%, 90.2% and 134% higher than those in single phase - cooling for all cases of water flux density respectively. It was also found that the water flux density has little influence on friction factor. When the surface heat flux is fixed, the heat transfer enhancement factor increases with the increasing of water flux density.

* Русскоязычная версия доклада приведена на с. 52 сборника

JET-FILM CONTACT DEVICES FOR HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN HEAT POWER ENGINEERING

A.V. Dmitriev¹, A.I. Khafizova² and O.S. Dmitrieva²

¹*Kazan State Power Engineering University, Kazan*

²*Kazan National Research Technological University, Kazan*

Abstract. One of the main production processes for many branches of industry is cooling of recycled\circulating water, which takes place in the cooling towers. The most important parameter to determine the cooling efficiency of water in the cooling tower is the contact surface of air and water. The existing designs of contact devices are highly effective in cooling the liquid, but they are complex to manufacture and expensive. In this regard, a new design of the jet-film contact device was developed, which allows creating a highly developed contact surface of liquid and gas phases. Mathematical model of the element of jet-film contact device was built by means of specialized software package and numerical calculations were carried out. Paper includes the study of behaviour of liquid and gas phases in the device element, and the mathematical dependences were obtained. Dependency of the liquid entrainment from device when changing the water flow rate was studied. Also, the comparison of designs with different location of holes within the wall elements was also carried out. Modernization of the studied jet-film contact device was carried out in order to identify the direction which to follow for improvement of design properties. This paper proposes an engineering method for calculating the jet-film contact device.

MATHEMATICAL MODEL OF FUEL HEAT IGNITION CONSIDERING SPACE - TIME NONLOCALITY

A.V. Eremin, V.A. Kudinov, I.V. Kudinov, V.V. Zhukov and K.V. Trubitsyn

Samara State Technical University, Samara

Abstract. Using the formula of the Fourier law, which takes into account the relaxation of the heat flux and the temperature gradient, a mathematical model of thermal ignition for systems with an exothermic internal source of heat was developed, taking into account the space-time nonlocality of the heat exchange process. Studies of boundary conditions of the first and third kind showed that taking into account the local nonequilibrium leads to an increase in the delay time of thermal ignition, irrespective of the conditions of heat exchange with the environment. It is shown that if the relaxation properties of materials are taken into account, the boundary conditions (of the first, second, or third kind) cannot be taken instantly, but only in a certain range of initial time. Consequently, the amount of heat supplied to the system has a certain limit, depending on its relaxation properties. Therefore, it is possible to conclude that there is also a limit on the value of heat transfer coefficients, which cannot be exceeded under any conditions of heat exchange with the environment.

CONSTRUCTION AND VARIANTS OF THE MODERNIZATION OF THE CONDENSING HOT WATER BOILER *

A.V. Gubarev and N.M. Lozovoi

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. In this article are considered the main problems facing mankind, which are related with production, transformation and use of energy and fuel resources. For purposes of fuel saving and improve environmental safety of the heat supply systems of various consumers the use of decentralized heat supply systems with the installation of a condensing hot water boilers in heat source, is proposed. The substantiation of application of these heat supply systems is made. There are considered appointment, relevance of use, design features and principle of action of the fuel-saving condensing hot water boiler, developed by the employees of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, proposed for installation as a heat generator in the heat sources of autonomous heating systems. There are considered the variants of construction of various units of the proposed boiler and the conditions of use of a particular design variant. Also, the advantages and disadvantages of various versions of the boiler design and its main components were critically evaluated, the comparison was made and the advantages of these or other design variants in front of others for different conditions were indicated. **Keywords:** decentralized heat supply systems, condensing hot water boiler, radiation part, contact-recuperative part.

COMPUTER MODELLING OF HYDRAULIC PROCESSES IN HEAT NETWORKS

V.A. Kudinov, A.V. Eremin, K.V. Trubitsyn, A.S. Doronin and T.E. Gavrilova

Samara State Technical University, Samara

Abstract. Theoretical assumptions connected with computer modeling of complex pipe-line systems have been considered. The mathematical theory is based on the electrohydraulic analogy of the processes of current propagation in conductors and liquid in pipelines. Computer modeling is based on Kirchhoff's first and second laws used for electrical networks calculations. To maximize the model's approximation to a real hydraulic network, a method of automatic identification of the model has been developed. This method of an iterative selection of the hydraulic resistance coefficients of pipelines is applied in such a way that the pressures determined on the model coincide with the results of experimental studies within a specified accuracy. The accuracy of identification depending on the number of points with known experimental data is 3–7%.

* Русскоязычная версия доклада приведена на с. 23 сборника

CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN THE NEAR-WALL TURBULENT GAS STRATUM*

V.A. Kuznetsov and P.A. Trubaev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. In order to diminish the computational cost of heat transfer simulations, some wall functions had been often introduced in numerical algorithms. More universal and robust dimensionless velocity functions that can be employed both in buffer and equilibrium parts of the near-wall turbulent gas stratum are offered here for consideration. They have been obtained on the basis of Prandtl's semiempirical hypothesis of turbulence. A mode, how to determine the one-sided derivatives of the gas velocity and temperature at the wall surface on a coarse grid, has been substantiated. That allows applying the boundary conditions of Neumann and Robin type for differential equations of the convective heat transfer to the confining walls from the turbulent gas flow. A semiempirical formula for the eddy viscosity in the wall proximity has been deduced, and a valid boundary value has been determined also for the rate of turbulence-energy dissipation. It is demonstrated that the simulation results coincide sufficiently with experimental data. **Keywords:** numerical simulation, coarse-mesh grid, convective heat transfer, turbulent boundary layer, boundary conditions, eddy viscosity.

PARAMETRIC MODEL FOR PREDICTING THE RELIABILITY OF HEAT POWER EQUIPMENT OF TPP

M.M. Sultanov, V.M. Truhanov and Yu.A. Gorban

Volzhsky Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Volzhsky

Abstract. Forecasting and ensuring the required high reliability level of heat power plants (thermal power plants) at a stage of their creation and operation is an important problem of economic value. For the solution of this problem in the present article the task is to develop such mathematical models of forecasting of reliability at all stages of life cycle of a thermal power plant from designing before removal from operation. It would be possible to reduce costs of realization of concrete actions. Parametrical mathematical models of growth of reliability have been developed for the solution of an objective. In particular two-parametrical, three-parametrical and multiple parameter models of growth of reliability have been developed and presented. For calculation of estimates of parameters of distribution standard programs are offered. All developed mathematical models of forecasting of reliability level are based on use of the statistical data obtained in the course of tests or operation of products analogs. Change of reliability level on five stages of life cycle of the power

* Русскоязычная версия доклада приведена на с. 31 сборника

equipment of a thermal power plant is graphically shown in the article. **Keywords:** heat power equipment, reliability level, methods, parametrical mathematical models, laws of distribution.

RESEARCH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SIGNALS FOR CALCULATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS AND INCREASE IN POWER EFFICIENCY OF THE EQUIPMENT OF THERMAL POWER PLANT

M.M. Sultanov, I.A. Boldyrev and Yu.A. Gorban

Volzhsy Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Volzhsky

Abstract. The article is devoted to questions of effective management of the power equipment of a thermal power plant in the conditions of quickly changing operating modes of power systems. The results of a research of dynamic characteristics of the signals used for calculation of technical and economic indicators of the generating sources are given. The analysis is carried out and an assessment of a possibility of increase in efficiency of updating of the current values of technical and economic indicators on the example of package boilers of block and not block thermal power plants is given. The practical recommendations of use of a new approach of measurement of dynamic characteristics of signals for calculation of efficiency of the boiler and change of parameters of operation of the power equipment are formulated.

EFFICIENCY OF APPLICATION OF VARIOUS LAYOUT ARRANGEMENTS OF OIL-GAS BURNERS IN THERMAL POWER PLANT BOILERS

M.A. Taymarov, R.V. Akhmetova and E.A. Akhmetov

Kazan state power engineering university, Kazan

Abstract. The necessary intensity of burning and completeness of fuel burning out in furnace volume are reached by the correct supply organization and the subsequent mixture of fuel with secondary air that is provided with burner devices. Experimental research of fuel oil and gas combustion efficiency in boiler furnaces of thermal power plant has shown that, the peripheral axial twist executed in the form of two channels with axial scapular air rotator is preferable. The combined gas supply is perspective: tubular peripheral and pilot central. For fuel oil combustion at large expenses the most effective burning is reached due to application of steam-mechanical nozzles which main lack is the considerable length of a torch. The two-tiered arrangement of burners in boiler at combustion of gas and fuel oil is more effective, in comparison with single-tier, both at the counter direction, and at unilateral frontal. For increasing the efficiency of combustion of fuel at some burners

types in a boiler furnace the ascending vertical rotation of a torch can be created by the asymmetrical counter arrangement of burners of the first and second tiers. Use of the smoke exhauster of gases recirculation for reduction of harmful emissions of nitrogen oxides with boilers flue gases gives bigger effect in comparison with optimization of the choice of a layout arrangement of burners and parameter of a twist.

Keywords: boiler efficiency, fuel oil, burner, flame temperature, air swing, burning, natural gas, torch, tier, radiation.

APPROXIMATE ANALYTICAL SOLUTION TO THE STATIONARY TWO-DIMENSIONAL HEAT CONDUCTION PROBLEM ON INFINITE BAR WITH THE SOURCE OF HEAT

V.K. Tkachev

Samara State Technical University, Samara

Abstract. An approximate analytical solution to the boundary- value heat conduction problem for an infinite bar with a heat source was obtained with the use of the integral method of heat balance, by introducing a complementary required function and complementary boundary conditions. The boundary - value problem for a partial differential equation is reduced to an ordinary differential equation with respect to this function due to the complementary required function that characterizes the change in temperature along the axis of symmetry in the cross-section of the bar. The complementary boundary conditions determined by the initial differential equation and the given boundary conditions are found so that their satisfaction is equivalent to the solution of the initial equation of the boundary value problem at the boundary points. The fulfilment of the equation at the boundary points as well as the heat balance integral results in the fulfilment of the initial equation inside the domain. The approximate analytical solution obtained can be used to identify the amount of internal heat generated by various production processes (vibration and deformation loads, electromagnetic fields effects, etc.) in thermal and nuclear power plants, in the rocket and space industry and other industrial facilities.

Section 2. ELECTRIC POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING

PROBLEMS OF ENERGY SUPPLY OF THE MAIN CONSUMERS OF DISTRIBUTIVE NETWORKS OF IRAQ

M.A. Averbukh¹, E.V. Zhilin¹ and M.W. Abdulwahhab²

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod

²Daiyla University, Baquba

Abstract. The main purpose in this paper to study the main features of the distribution network for Iraq, which showed that the distribution network is physically and morally obsolete. Analyzing of electrical distribution networks is considered of highest priority at the present time in Iraq. This paper presents efficient practical methods for calculating the main parameters of the distribution network based on scientific and practical fundamentals. In this work the analysis is based on the advanced RasterWin3 software as a tool for the calculation of a basic parameters for distribution network performing the required analysis. RasterWin3 software is practical and efficient analysis software used by many electrical companies worldwide. The distribution network calculation was implemented (11/33) kV. The calculation results showed that the voltage deviation exceeds the maximum permissible value and is 12% in normal mode and 40% in emergency mode. Power losses in the branches of the power system of Iraq reach 20% of the consumed electricity. This is justified by the low quality of electricity and overload of the power supply system.

THE DEVICE FOR MONITORING THE LED DISPLAY HIGH- VOLTAGE INSULATORS STATE*

R.N. Balobanov, D.K. Zaripov and A.A. Akhmadeev

Kazan State Power Engineering University, Kazan

Abstract. The article discusses the possibility of using devices for monitoring the state of high-voltage insulators with LED indication, mounted on insulating structures of high-voltage lines and substations. The scheme of the device is given and its principle of operation is described. The feasibility of indicating the early stage of the an insulation defect development in a laboratory and full-scale experiments on real power system facilities using devices with LED indication are shown. A new method of insulation control using the developed device will allow, when visually inspecting an overhead line, to additionally provide information about the change in the electric field and the appearance of discharges in the insulation. In addition to the early warning of the birth of a defect, this information will be useful for routine maintenance (cleaning) of

* Русскоязычная версия доклада приведена на с. 73 сборника

insulators. **Keywords:** polymer insulator, indicator, defects, LEDs, power line, insulation condition, assessment, outdoor switchgear, contactless method, dynistor.

COMPOSITE STRUCTURAL ELEMENTS OF OVERHEAD LINES AS A MEANS OF INCREASING TECHNICAL EFFICIENCY

F. Byk, V. Kityshin, L. Myshkina and E. Kaminskaya

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Abstract. Innovations in engineering and technologies depend not so much on emergence of new properties of the equipment, production process, system of management of the enterprise, but to a greater extent on their occurrence in the necessary set of combination. Technical and economic indicators reflecting technical and economic efficiency are usually used as characteristics. The degree of technical efficiency is determined by a combination of three properties – safety, reliability and productivity. These basic properties determine the economic effect of an innovative product performing certain functions, enabling to estimate their usefulness and significance. One of the means of increasing the overhead lines technical efficiency in the electric grid is the introduction of composite structural elements. The overhead line model is proposed for assessing the impact of elements on reliability as a component of technical efficiency. Changes in the reliability of the line when introducing innovative elements are calculated and priorities are defined.

ON THE FORECASTING OF TRENDS OF SPECIFIC MIXED LOADS OF ELECTRIC CONSUMERS OF MICRODISTRICTS AND CITIES CHANGE IN THE CONDITIONS OF INADEQUATE DATA*

E.G. Gasho, S.V. Guzhov and A.A. Krolin

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow

Abstract. The paper gives a brief analysis of modern methods of analysis, confirmation and prediction of specific mixed loads of electric consumers in housing estates and cities and formulates the main problems afflicting the reorganization of the industry, taking into account the requirements of digitalization of the economy. In order to identify the advantages and disadvantages of various solutions for optimizing the compilation of energy balances, a mathematical model is constructed, which allows analyzing the needs of microdistricts and cities in electrical energy and realizes the forecast of the development of urban energy systems in different socio-economic and climatic conditions. **Keywords:** forecasting, approximation, mixed electric loads, predicting FEB, quality life of the population, autoregressive model, correlation, microdistrict.

* Русскоязычная версия доклада приведена на с. 87 сборника

THREE-PHASE CURRENT SENSOR FOR MOTOR PROTECTION AGAINST TURN-TO-TURN AND PHASE-TO-PHASE SHORT CIRCUITS

I.K. Ishmukhamedov

State Petroleum Technological University, Ufa

Abstract. The main causes of electric motor failures are transients at power supply interruption and short circuit in stator windings. Most of the failures are due to short circuits. Phase-to-phase short circuits refer to the most severe damage of electrical installations, which are also dangerous for other intact electric consumers. Therefore, electrical plants require a high-speed protection against phase-to-phase short circuits in the stator windings and connections with the commutator. The most difficult to detect are turn-to-turn (or inter-turn) faults in stator windings, especially when a small number of winding turns is shorted. Currently, there is no standard way to detect turn-to-turn short circuits in stator windings. It is difficult to detect turn-to-turn fault in magnitude of phase currents, so it is complicated to provide sufficient protection sensitivity. Thus, the development of new protection devices for detect turn-to-turn short circuit is considered relevant. The article presents a three-phase current sensor based on measuring the magnetic field from the three phases simultaneously. This method will identify turn-to-turn and phase-to-phase short circuits by magnetic-field pattern. The presented method increases the protection sensitivity and speed of protection response. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by mathematical modeling. **Keywords:** electric motor, turn-to-turn short circuit, phase-to-phase short circuit, short-circuit protection, three-phase current sensor, magnetic field, magnetosensitive element, magnetic-field pattern, finite element method, simulation.

MATHEMATICAL AND VISUAL MODELS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINES ENERGY FIELDS

S.P. Kurillin, V.N. Denisov and M.I. Dli

Smolensk Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Smolensk

Abstract. The research considers the development of topological theory of asynchronous electric machines (AEM). The results of the development of energy aspects of the topological theory are presented in the article. The facts proving the actuality of the research are also given. The central notion giving the topological theory the characteristic of being systematic is the vector space notion. The definition of AEM vector space, its dimension, canonical basis, power and energy field of AEM are presented. Mathematical and visual models of AEM energy fields are analyzed. Energy fields of electric losses and magnetic field dissipation having the spherical symmetry are analyzed in particular. Energy and visual models of the main magnetic field are analyzed using AEM with a short circuited rotor and linear AEM

as examples. It is established that this field obtains cylindrical or elliptical symmetry. In general the main magnetic field and the main matrix of winding make AEM vector space fully or partially heterogeneous. Energy efficiency is analyzed and its differences for vector space currents are revealed. The areas of vector spaces with high and low energy currents efficiency are defined. According to this indicator longitudinal and transvers subsets of current having, correspondingly, high and zero energy efficiency are distinguished in the vector space. The description of practical application spheres of AEM topological theory is given. **Keywords:** asynchronous electric machine, topological theory, vector space, basis, the canonical basis, energy field, mathematical models, visual models, energy efficiency, a subset of currents.

MATHEMATICAL MODEL OF MANAGING OF THE GENERATING COMPANY ON THE CRITERION OF THE PROFIT MAXIMIZATION

B.N. Moshkin¹, T.V. Myatezh¹, Y.A. Sekretarev¹ and M.A. Averbukh²

¹ *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk*

² *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod*

Abstract. The urgency of the work is conditioned by the electric power industry reforming, which implies a gradual transition to a competitive market model. So each producer will be interested in maximizing his own profit and independently determine the volumes of electric and heat energy production. On the basis of the developed criterion of maximizing profits, the following problems are considered in the article: the most advantageous distribution of electric energy of thermal power plants at given values of the rate for electricity; distribution of thermal energy between the plant's units, taking into account the forced heating mode of operation of the stations; finding the optimal modes of operation of the stations for the combined method of producing electric and thermal energy; appointment of the most favorable operating modes of the generating company; substantiation of tariff rates for the products sold, depending on the optimal production volumes at thermal power plants that are part of the generating company, determining the optimal operating conditions of SIBEKO JSC (Novosibirsk, Russia). The results: methodology of optimization of CHPP for electric and heat energy has been developed in the work. And also a new criterion has been proposed for maximizing profits for managing the functioning of a generating company. **Keywords:** mathematical model, optimization of operating modes of CHP, characteristics of relative increments of fuel consumption, criterion of profit maximization.

ADAPTIVE CORRECTION OF CURRENT LONGITUDINAL DIFFERENTIAL PROTECTION OF POWER EQUIPMENT*

M.G. Popov

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Abstract. The report reflects the long-term solutions for the modernization of main means of emergency control and protection of integrated power systems in the implementation of adaptive control algorithms. The substantiation of new structures and algorithms for the formation of corrective signals using non-stationary filters of the displacement current of overhead power lines is performed. Calculated, using the bias currents of the phases are used for dynamic correction of the working and brake signals of the longitudinal differential protection. The basis of adaptive means of differential protection of power equipment of power systems is developed. They are based on the use of adaptive correction of operating and brake protection signals. A mathematical description of the optimization problem of determining the response parameters of sensitive longitudinal current differential protection with adaptive correction of operating and braking signals is performed. **Keywords:** power equipment, power pools, adaptive means, current differential protection, measuring elements, sensitivity enhancement, dynamic correction, Hilbert transform.

Section 3. ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY, POWER ECOLOGY

METHODOLOGY OF GHG EMISSIONS ASSESSMENT CAUSED AT THE CONSTRUCTION OF ENERGY FACILITIES. CASE STUDY: HYDROPOWER

I.P. Avilova, A.E. Naumov and M.O. Krutilova

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. As energy is the main ‘fuel’ for social and economic development, and since energy-related activities have significant environmental impacts, it is important to lower emissions and stabilize atmospheric CO₂ levels to avoid the worst predicted effects of climate change. Reducing energy consumption and costs is becoming central to planning, construction, and use of energy construction facilities from an environmental and economic point of view. Each energy source has advantages and disadvantages referred to: operating costs, environmental impact, and other factors. Each generation method produces some greenhouse gases (GHG) in varying quantities through construction, operation, and decommissioning. Some generation methods like coal fired plants release the majority of GHGs during opera-

* *Русскоязычная версия доклада приведена на с. 106 сборника*

tion. Others, such as wind power and hydro power release the majority of emissions during construction and decommissioning. Normalizing the lifecycle emissions with electrical generation allows a fair comparison of different generation methods on a per gigawatt-hour basis. **Keywords:** GHG emissions, hydropower plant construction, eco-oriented assessment of the estimated cost, sustainability, green building.

EVALUATION OF ENERGY-SAVING EFFECT DURING THE INSTALLING PROCESS OF AUTOMATED HEATING STATIONS IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS*

S.A. Bychikhin, M.V. Svirin and P.A. Trubaev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. The aim of the work is to assess the energy-saving effect after the installation of automated individual heat points that carry out weather regulation of the heating load. The analysis was carried out for 18 educational institutions of the Belgorod region, in which energy service contracts were implemented in 2016. The data of the actual monthly consumption of heat energy during the basic heating season before the implementation of energy-saving measures and data of daily accounting of heat consumption during the two heating seasons after the installation of automated individual heat points were used. The average unit savings for all institutions was 14 per cent. It is established that the greatest value of economy, 20-30%, provides decrease in temperature in buildings to optimum level. Elimination of " overflows " in the autumn-spring period allows to save 5-10% of thermal energy. The decrease in temperature on non-working days is characterized by a small amount of savings, not more than 3%, or its absence. **Keywords:** heating, energy saving, individual heating station, educational institutions.

USING DEA MODELS TO MEASURE THE EFFICIENCY OF ENERGY SAVING PROJECTS**

M.Yu. Derevyanov¹, Yu.E. Pleshivtseva¹, L.S. Kordyukova² and A.V. Rapoport³

¹ Samara State Technical University, Samara

² VakuummashElectro Ltd., Izhevsk; ³ EvroGaz Ltd., Moscow

Abstract. The paper discusses the approach for multi-criteria estimation of the efficiency of energy saving projects by the Data Envelopment Analysis (DEA) method. The measurement of efficiency of considered projects and the identification of sources of their inefficiency is a very important condition to put the projects into

* Русскоязычная версия доклада приведена на с. 129 сборника

** Русскоязычная версия доклада приведена на с. 150 сборника

practice in industrial competitive environment. The term “energy saving project” refers to a project resulting in certain output improvements with respect to energy consumption of the technological process by spending certain inputs. Thus, the energy saving project can be treated as a production unit or Decision Making Unit (DMU). The estimation of the efficiency of energy-saving projects by DEA is illustrated here via example of an industrial enterprise for the production of cellular autoclaved aerated concrete. The nine typical inputs/outputs are used and the twelve DEA models are developed that characterize the technological, environmental, economic and comprehensive estimators of the efficiency of energy saving projects. The developed approach for multi-criteria estimation of the efficiency of energy saving projects by the DEA method has the potential of widespread use in practice for making effective management decisions on the formation of investment programs for industrial enterprises.

CREATION OF A NEW ENERGY-EFFICIENT DESIGN OF THE DUST-EXHAUST SYSTEM

V.M. Kireev, A.B. Goltsov, A.S. Seminenko and Y.G. Ovsyannikov

Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Belgorod

Abstract. Aspiration systems of processing enterprises (local exhaust ventilation) consume a lot of electricity. The article discusses the new energy-efficient design of the aspiration system when using inclined overload gutters. Energy efficiency is the use of the principle of partial recirculation of aspirated air and the Coanda effect when it is fed directly into the transshipment chute. The article discusses in detail the new effective unit for supplying recirculated air to the reloading chute. The use of the proposed design will reduce more than twice the energy consumption of aspiration systems and the energy intensity of general ventilation systems that supply air to the room. The article provides theoretical information on the operation of systems, the results of the experiment. **Keywords:** dust-extracting ventilation, energy efficiency, aspiration system, recirculation, Coanda effect, bulk solids reloading.

THE INCREASING OF THE ENERGY EFFICIENCY OF NUCLEAR POWER PLANTS WITH FAST NEUTRON REACTORS BY UTILIZING WASTE HEAT USING HEAT PUMPS*

V.S. Kostarev, O.L. Tashlykov and V.A. Klimova

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg

Abstract. Today, an important task for the economy is to increase the efficiency of using primary fuel. At present, for nuclear power plants with VVER reactors, ther-

* Русскоязычная версия доклада приведена на с. 157 сборника

mal efficiency is about 33%, with fast neutron reactors - more than 40%. This means that most of the heat produced is released into the atmosphere. In this paper, we consider methods to solve the problem of increasing energy efficiency by the example of NPPs with fast neutron reactors due to the utilization of low-grade waste heat. The results of practical implementation of utilization of low-potential thermal energy of thermal and nuclear power plants using heat pumps were generalized. The analysis of the utilization efficiency of waste heat from various NPP systems was performed.

THE THERMAL AND PHYSICAL ASPECTS OF DESIGNING FACADE HEAT INSULATION AT CAPITAL REPAIRS AND RECONSTRUCTION OF CIVIC BUILDINGS*

M.M. Kosukhin and A.M. Kosukhin

Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Belgorod

Abstract. The brief analysis of civic buildings condition has been presented in this paper. It has been demonstrated that at present the housing stock doesn't meet the up-to-date heat engineering, energy saving and energy performance requirements. To create the necessary indoor climate of living accommodations and to provide the comfortable living environment, most of civic buildings, built at different times, are in need of large-scale reconstruction. The leading role in solving these problems is assigned to capital repairs. For its satisfactory implementation an integrated approach to repairs and construction works with the use of up-to-date energy-efficient technologies and materials is needed. The efficient heat insulation of enclosing structures should be preceded with professional engineering survey of structures and with providing the scientifically-grounded recommendations, based on present-day scientific achievements in this sphere, for the subsequent making of design specification. It has been pointed out that the economic and processing efficiency of the selection and installation of heat insulation can be achieved only by means of scientific approach and the knowledge of physical and chemical processes and phenomena, taking place in enclosing structures under the influence of internal and external operational environment. In this regard it is essential to learn to manage these processes. **Keywords:** housing and utility sector, housing stock, civic buildings, enclosing structures, capital re-pairs, energy efficiency, energy saving, heat insulation, heat transfer, heat conductivity, convection, radiation, heat flux, heat-transfer resistance of an enclosing structure.

* *Русскоязычная версия доклада приведена на с. 164 сборника*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF FLUE GAS DESULPHURIZATION OF TPS

Yu.O. Rikker, M.V. Kobylkin and A.G. Batukhtin

Transbaikal State University, Chita

Abstract. The effects of sulfur oxides on the environment and human health have negative consequences. A significant amount of sulfur oxides is emitted into the air with flue gases from the TPS. Modern Russian TPS are not equipped with sulfur-trapping units due to their significant cost. The study is devoted to the research of low-cost methods that increase the efficiency of the flue gas desulphurisation process at coal-fired TPS. Existing methods are considered from the perspective of the presence of advantages and disadvantages. The potential of the use of purge water from boilers for flue gas desulfurization of TPS. **Keyword:** TPP flue gases, desulfurization, seawater, coal-fired thermal power plants, benz(a)pyrene, coal, flue gases, sulfur oxides, ecology, TPP.

APPLICATION OF THERMOHYDRAULIC DISPATCHER FOR EXISTING AND NEW DISTRICT HEATING SYSTEMS

D.O. Romanov¹, Y.V. Yavorovsky¹, V.V. Smirnov²

¹ *National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow*

² *Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo*

Abstract. Electricity consumption represents high share of operational costs in district heating (DH) systems. Recent attempts of decreasing these costs have led to appearing the idea of systems with distributed variable speed pumps (DVSP). One of the parts of such systems is thermohydraulic dispatcher (THD). This article is concerned with application of THD for DH systems. Existing DH systems with low available hydraulic head are suitable for installing THD instead of booster pumps. Electricity consumption and cost of equipment for several schemes of heat substitution are estimated. Application for low temperature district heating (LTDH) systems is considered. Further ideas of development DVSP systems are proposed. Schemes of cascade systems based on THD and hydraulic profiles are presented. In result, cascade systems can reach highest possible electricity saving effect due to eliminating of throttle valves at heat source, heat substations and heat consumers.

ANALYSIS OF OPERATING CHARACTERISTICS OF HYDRO UNIT TURBINES UNDER OPTIMIZATION OF HYDROPOWER PLANT REGIMES

Y.A. Sekretarev¹, Y.V. Panova¹ and M.A. Averbukh²

¹ *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk*

² *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod*

Abstract. Situation management at a hydropower plant often involves optimization of the number and loading conditions of hydro units. This process requires consider-

ing a lot of various information about current operating conditions of power equipment. Turbine energy efficiency depending directly on water discharge is one of these parameters. In this way, energy efficiency of a hydro unit turbine can be considered as a parameter of operating economy. The paper describes the principle of evaluation of operating economy of a hydropower plant with Pelton turbines. Calculations are based on methods of possibility theory (for example, plotting of fuzzy intervals with their comparison). The procedure of calculations for evaluating operating economy using the example of turbines at the Novosibirsk hydropower plant is also given in the paper. Intervals of power, in which one hydro unit is more preferable than another, are shown. The example involves calculation for only two hydro units, but it can also be performed for the greater number of units. Therefore, personnel, which is responsible for hydro unit commitment, can obtain relevant information about water discharge through turbines and estimate alternative variants of hydro unit loading.

COAGULANT ON THE BASE OF INDUSTRIAL FERRIFEROUS WASTE FOR THE PRELIMINARY TREATMENT OF MULTI-COMPONENT SEWAGE

S.V. Svergunova¹, Zh.A. Sapronova¹, A.V. Svyatchenko¹, E.V. Fomina¹ and A.A. Malysheva²

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod*

²*National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow*

Abstract. The paper gives the results of a study on the processing of model systems by a coagulating suspension made on the basis of dust from electric arc furnaces (EAF). Dust of electric furnace steelmaking is a large-tonnage waste containing in its composition a large number of iron compounds. When treating EAF with hydrochloric acid, formed ions FeOH^+ , FeOH^{2+} , $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$ in this process provoke coagulation, which leads to the adhesion of particles in the system and their sedimentation. It is shown that the suspension is effective for clarifying aqueous media from suspended particles (kaolin clay). It has been established that precipitation occurs more effectively in a neutral and alkaline environment than in an acidic one. When processing multicomponent model systems (industrial oil stabilized with sodium lauryl sulfate and clay particles), the efficiency of clarification decreases, but remains high enough (65%). Taking into account the research results, the coagulating suspension can be used at the stage of pre-treatment of highly contaminated sewage of mixed composition to facilitate and reduce the cost of subsequent stages of water treatment. **Keywords:** water treatment, coagulation, industrial waste, wastewater, oil products, multi-component sewage, colloidal systems, clay suspension.

IMPROVEMENT OF SOLID ORGANIC FUEL ENERGY USE BASED ON METHOD OF LOW-TEMPERATURE SWIRL COMBUSTION

A.A. Trichenko

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

Abstract. The development of thermal energy with the use of solid organic fuel entails an increase in the amount of gaseous pollutants emitted into the atmosphere, including environmental pollution by toxic nitrogen oxides. Technological methods of reducing emissions of harmful substances, implemented at the stage of fuel combustion, are preferred all over the world as the cheapest and most promising. A technological method of nitrogen oxides decomposition on the surface of carbon fuels is considered. On the basis of the developed mathematical model it is shown that in the case of low-temperature swirl combustion, the burning of particles proceeds under conditions of repeated circulation, with their periodic return to the zones with the initial concentration of oxygen. Such organization of the furnace process reduces the pollution of flue gases with nitrogen oxides and leads to the formation of environmentally safe carbon dioxide and molecular nitrogen. The results are compared with the experimental data obtained on the reconstructed boilers.

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF AN ARCHITECTURAL OBJECT'S FORM AS A METHOD TO IMPROVE ITS ENERGY EFFICIENCY

N.A. Vasilenko

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. Parametric optimization of an architectural object's form is one of the design tasks, which architects and project designers face at the stage of structural concept development and design. Improving the performance qualities of a design solution, while providing its energy efficiency, is the purpose of system research in the sphere of architecture and urban planning. The article gives the comparison of calculated compactness ratios of the external envelope for one-, two- and three-, four-, five-, six-, seven-storey 6-apartment compact-form residential houses, comparable in the floor surface area criterion. The application of BEM software packages on the basis of BIM-modeling of buildings is reasonable to substantiate with the optimal functional (consumer) properties of an architectural object. Systematic methodology allows considering the architectural and design problems in the interdisciplinary way. Computer modeling of architectural objects should solve the optimization tasks on the basis of version design and contain an optimization module, which would allow taking the optimal decision at the specified design constraints (conditions) and normative parameters. Computer modeling of architectural objects with the use of structural optimization methods for the version design is a promising area, which requires the formalization of project procedures and developing automated design system tools for designing buildings of various purposes.

Keywords: parametric optimization of an architectural object's form, form making, energy efficiency, compactness principle, compactness criterion of a building form, modeling methods, computer modeling of architectural objects, optimization problem, optimization module, version design, transit area method.

THE USE OF MODERN HIGHLY PRECISE ULTRASONIC GAS FLOWMETERS AND ETALON STANDS TO ENLARGE INDUSTRIAL RESOURCE EFFICIENCY*

M.A. Velichko, I.B. Kostina and Yu.P. Gladkikh

Belgorod State National Research University, Belgorod

Abstract. In this article we have described our new development that is the ultrasonic flowmeter with high dynamic range of 1 to 2000 for industrial applications. Its high accuracy of measurement can help gas consuming enterprises to save resources. Its software and the software of corresponding computing device is able to avoid gas leakage, to minimize energy consumption and to save human resources while maintaining metrological data. Shown are the new anti-adhesion technologies that can help to increase measurement accuracy and enlarge interval between counters verifications. Described is the low power consumption that makes it possible to use this ultrasonic flowmeter in hard remote environment without direct management for a period of several months. Experiments held in Turkmenistan have shown that device indications didn't drift and remained stable during the year that is a great advantage in comparison to rotary and turbine flowmeters. Also described is the mobile ultrasonic calibration stand that uses the same physical principles and similar software. Outlined is the usage of modern wireless technologies to collect and transmit metrological data. **Keywords:** ultrasonic flowmeter, verification stand, etalon, WiFi, gas consumption, energy saving.

* *Русскоязычная версия доклада приведена на с. 134 сборника*

Section 4. ALTERNATIVE AND RENEWABLE ENERGY SOURCES

METHOD DEVELOPMENT FOR THE THERMOTECNICAL CALCULATIONS UTILIZING REDUCED CHARACTERISTICS OF THE RDF FUELS*

N.V. Kornilova and P.A. Trubaev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. The paper presents method of calculation of the heat leakage and efficiency by using method of indirect heat balance, utilizing data from gas analysis, which can be employed for operational evaluation plant operation during burning of different types of waste materials. Taking into account that practically only oxygen and carbon dioxide is being measured in the exhaust gases, calculation method for heat leakage with exhaust gases, using measurements of only this component, without utilizing carbon dioxide content in combustion products, was developed. Carbon dioxide and oxygen calculated percentage content in dry complete combustion products in actual air consumption was measured with consideration of incomplete combustion. Heat leakage for low power boilers and furnaces was analyzed, heat leakage calculation method for this kind of plants was introduced. Using design factors analysis of the solid fuel boilers for burning low-calorie fuel and wood waste, was developed dependence of the outside walls specific area of the boiler on the boiler's efficiency. Based on the developed method for seven types of the RDF fuels, tabular and graphic dependences for reduced factors, characterizing heat leakage to the atmosphere and incomplete combustion, were introduced. Suggested method was tested for calculating losses in solid fuel water heating boiler with grate stoker and designed output power of 200 kW during burning of the briquetted waste materials.

THERMOTECNICAL TESTS OF THE LOW POWER SOLID FUEL HEATING BOILERS WHILE INCINERATING BRIQUETTED RDF**

N.V. Kornilova and P.A. Trubaev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. Objective of this paper is an analysis of briquetted waste combustion in the low power boilers. Research was conducted for the 100 kW pyrolysis heating boiler and 200 kW heating boiler with grate stoker. Briquettes were made by compacting milled and crushed materials into cylinders 50 mm in diameter, with a length of 100-200 mm, density of 800 kg/m³. It was established that process of combustion in low power boilers has low thermal efficiency, value of which fluctuated within

* Русскоязычная версия доклада приведена на с. 214 сборника

** Русскоязычная версия доклада приведена на с. 224 сборника

60...74% for wood combustion and 50...70% for RDF briquettes combustion. Burning process was stable and characteristics of the RDF combustion were similar to the wood combustion. Incineration of the fuel briquettes had better effectiveness than burning of solid wood. During RDF briquettes combustion high CO content (up to 0,2% or 2000 ppm) in flue gas was observed, which is an indication of insufficient burning time. It may be concluded that waste incineration in low-duty plants is viable, but to secure complete combustion and desired temperatures process of combustion and heat extraction should be separate in terms of design.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF LOW PRESSURE INJECTION BURNER FOR BIOGAS COMBUSTION

D.Y. Suslov, R.S. Ramazanov, D.O. Temnikov and I.V. Lobanov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. The article is dedicated to the problem of using an alternative energy source – biogas in gas supply systems. A low pressure injection burner with a conical shaped heat diffuser has been designed. A diffuser placed in the burner body provides preheating of the gas-air mixture and allows to increase a flame propagation velocity. A computer simulation of the gas-air mixing process in a body has been made for 3 types of burners: without a diffuser, with a diffuser of 11 mm and 25.5 mm long. As follows from the simulation, 11mm diffuser has no adverse effect on the gas-air mixing process. While an increasing length of the diffuser up to 25.5mm leads to the decreasing cross-section area of a mixing chamber, therefore increasing air-gas mixture rate and methane concentration in the flame holes. Experimental tests have been performed in relation to biogas combustion process for those 3 types of burners. Experimental results proved that placement of 11mm diffuser in a burner body reduces the time for heating water in the tank up to 100°C by 6% (45.41 s). 25.5 mm diffuser reduces the heating time by 1.5% more (11.37 s). Thus, we can make a conclusion that the presence of a diffuser in the burner body increases a flame propagation velocity and a heat rate of the burner.

THE STUDY OF ENERGY PERFORMANCE OF BIOGAS FROM AGRICULTURAL WASTE*

D.Y. Suslov and R.S. Ramazanov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. The article is devoted to determination of energy indicators of the alternative source of energy - biogas derived from agricultural waste. The main energy indicators of the burning process of biogas fuel are lower heat value, Wobbe index, ignition range, flame propagation rate, as well as amount of oxygen and air required

* Русскоязычная версия доклада приведена на с. 240 сборника

for complete combustion of biogas. The energy indicators of biogas produced from corn silage, technical fat, pig manure, cattle manure and poultry droppings are determined during the study. It has been found out that biogas obtained from technical fat and poultry droppings is characterized by the highest energy indicators, and biogas from corn silage - by the lowest indicators. Wobbe index of biogas is more than 2 times lower than index of natural gas. The biogas produced from technical fat has the highest rate of flame propagation - 23 cm/s, which is 1.5 times lower than the rate of flame of natural gas. Biogas has a wider ignition range than natural gas: the lower limit, the upper limit. The average value of the theoretic air volume required for complete combustion of biogas is 5.8 m³, which is 1.7 times less than the value for natural gas. A low pressure injection gas burner has been developed for efficient combustion of biogas of various compositions

ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL FACTORS INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

J.N. Zatsarinnaya, D.I. Amirov and L.V. Zemskova

Kazan state power engineering university, Kazan

Abstract. The development of civilization is associated with the creation of various methods of energy conversion. Humanity has come a long way from the water wheel to modern power plants. Though earlier people did not think about the damage to the environment from the work of a number of power plants, today this cannot be ignored. Renewable energy sources (RES) and their using by modern technologies claim to play a significant role in the world energy sector. Support for the development of RES in Russia is currently based on compensation of costs under contracts for the sale of power in the wholesale electricity and power market. According to the results of the competition of the Trading System Administrator, projects under the contracts for renewable energy power supply selected. Analysis of bids of the Trading System Administrator (TSA) showed that until 2023 will be introduced 1.8 GW of solar power plants, so the actual goal will be the correct operation of them in the weather conditions of Russia. Pollution of various types, which can be on the panels can affect the operation of solar panels (SP) and prevent the ingress of solar radiation on them. The article investigates the influence of various types of pollutants on the power generated by solar panels and promising places for the construction of solar plants in the climatic and geographical conditions of Russia, taking into account possible polluting factors, which can lead to total economic damage of up to 15 million rubles per year. **Key-words:** solar panels, renewable energy sources, operation of solar modules, pollution of the solar panel, types of pollution, causes of deterioration of the solar module, the efficiency of the solar battery, the power of solar panels.

OPTIMIZATION OF POWER OUTPUT FOR A WIND TURBINE USING METHODS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE*

N.V. Zubova, V.D. Rudykh

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Abstract. Percentage of wind energy in worldwide power generation increases year after year. At the present time, problems of increasing the energy efficiency of wind turbines (WT) and optimization of WT power output are of great importance due to instability of wind energy. It stimulates the development, investigation and using of intelligent systems for controlling operating regimes of wind turbines. Such systems also involve those systems that are developed using algorithms based on fuzzy logic. This paper presents the results of investigations devoted to searching for optimal membership functions for fuzzy sets of input and output variables. These variables and membership functions are used in fuzzy algorithms developed for enhancing power output of wind turbines under the given operating conditions. After analyzing the obtained results, it may be concluded that the use of symmetrical Gaussian membership functions gives the fastest convergence of the optimal power into the point. **Keywords:** wind energy; energy efficiency; artificial intelligence; wind turbine; fuzzy logic; fuzzy sets; membership function; Mamdani algorithm; linguistic variables; fuzzy controller.

Section 5. ENERGY AND RESOURCE SAVING IN TECHNOLOGIES

CONTROL QUALITY OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOYS BY USING SUBMINIATURE EDDY CURRENT PROBES

S.F. Dmitriev¹, L.M. Dmitrieva¹, A.V. Ishkov², V.N. Malikov¹ and A.O. Katasonov¹

¹*Altai State University, Barnaul*

²*Altai State Agricultural University, Barnaul*

Abstract. On the basis of superminiature eddy current probes (ECP), a measuring system is designed that allows scanning of aluminum-magnesium alloys for detection of small defects. The superminiature ECP of the original design is used as a sensor in this device, it is made according to a differential scheme of switching on of the coils of a transformer ECP and allowing to localize the control area up to 0.1-0.5 mm. Having the designed transducer as a basis, a hardware-software complex was

* *Русскоязычная версия доклада приведена на с. 23 сборника*

built to perform experimental studies of plates of Al–Mg alloy (94% Al, 3% Mg) with a thickness of 5.5 mm were used as samples. The dependences of the ECP signal on the defect in this structure are given. In this work were used cores with different shapes: a core of trapezoidal shape, core made in the form of a pointed cone. This study shows the advantages of cores of different shapes and materials for their use in eddy current probes for excitation coil frequencies of 300–700 Hz.

IN-SERVICE PERFORMANCE OF HYBRID GEOPOLYMER BINDERS BASED CLASS F FLY ASH

N.I. Kozhukhova¹, A.Yu. Teslya¹, M.I. Kozhukhova², I.V. Zhernovsky¹, S.N. Yermak¹ and Yu.N. Ogurtsova¹

¹ *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod*
² *University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee*

Abstract. Production of high-performance construction materials, meeting the requirements of construction process when development of up-to-date buildings and structures is very relevant and requires the usage of effective polycomponent binding systems, including geopolymers. This work studied mechanical performance, as well as strength, water absorption and water resistance of portland cement – Class F fly ash – NaOH hybrid geopolymer binding system. The bench scale testing was conducted on different mixes, including regular portland cement-based and Class F fly ash–NaOH geopolymer binders used as reference compositions. The developed hybrid binders demonstrated, that incorporation of portland cement up to 40% as a modifying agent, reduces the formation of water soluble mineral phases such as sodium carbonates and hydroxycarbonates in low reactive class F fly ash geopolymer binders. It was found, that the presence of portland cement in the system positively affects strength development and noticeably reduces water absorption and improves water resistance of the developed binders, which is related to formation of water resistant and stable calcium hydrosilicate phases (C–S–H). **Keywords:** class F fly ash, Portland cement, hybrid binders, geopolymers, water resistance, compressive strength, water resistance, water absorption.

RESEARCH OF HEAT EXCHANGE AND EFFICIENCY OF THE ARCS IN THE ARC STEEL-MELTING FURNACES WITH USUAL CONVEYOR AND LOADED

A.N. Makarov, V.V. Okuneva and Yu.M. Pavlova

Tver state technical university, Tver

Abstract. The analysis of heat exchange and the efficiency of the arcs in the arc steel-melting furnaces with usual conveyor and loaded. For comparison, accepted arc furnace close in power and performance. The analysis revealed that the average efficiency of arcs furnace Consteel ASF-120co 8-9% less than particle ASF-120us.

Analysis of the efficiency of the arcs of electric arc furnaces allowed to explain more 8-9% lower specific energy consumption in the furnace ASF-120co compared to the same period in the furnace ASF-120us. Calculation and the analysis of efficiency of various ways of input of heat in a bathtub of metal of ASF-120co and ASF-120us furnaces is performed. The most effective way is introduction of heat by means of electric arches which efficiency is 0,69-0,78. Heating of the metal charge by means of torches of gas-oxygen torches, efficiency of the method 0,45-0,55 is less effectively carried out. Heating of a metal bath by means of oxidation of coke which is continuously entered into slag for foaming of the last is carried out with the efficiency of a way of the method 0,28-0,36. **Keywords:** electric arc, furnace, steel, torch, thermal radiation, efficiency.

THEORETICAL STUDY OF THE FLOW OF CEMENT RAW MATERIAL SLUDGE THROUGH PIPES

D.N. Pereygin, I.P. Boichuk, A.V. Grinek

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. The flow of fluids through pipes directly depends on the physicomachanical characteristics of the material. When designing technological equipment, it is assumed that the equipment operates with the limiting physical characteristics of the liquid. The study of the flow of non-Newtonian fluids is important for the development of energy-saving methods for the cement industry. In this paper, we study the flow of cement raw sludge through rigid pipes. It is shown that when moving in pipes near the pipe walls, the sludge moves like a normal Newtonian liquid, and near the pipe it moves like a solid. This indicates that when moving through a pipe with a prolonged non-stationary effect, the sludge behaves like a normal Bingham body. The article found the flow rate, the drag coefficient, the Reynolds number, and the hydraulic resistance when the sludge moves through the pipe. In this paper, the parametric law of resistance of sludge movement in pipes is defined, which can be considered as a convenient way to calculate pressure drop. It follows from the law that, when flowing through pipes, sludge now acquires the properties of a plastic body and behaves like Bingham plastic. **Key words:** cement sludge, flow through pipe, Newtonian fluids, hydraulic resistance, Reynolds, Bingham plastic.

EFFECTIVE WAYS OF MOLDING MAN-MADE MATERIALS

M.V. Sevostyanov, T.N. Il'ina and I.G. Martakov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. The article is devoted to the development of multifunctional technological complexes for obtaining highly dispersed activated materials, including fast-hardening microfibrated composite mixtures. Special attention is paid to the development of conditions for their effective homogenization and the molding technology

of various charges. Presented experimental design, aimed at improving the process of forming man-made mixtures. A low-tonnage technological complex for the utilization of technogenic materials with various physical-mechanical properties was developed. The urgency of the development of techniques and technology for the utilization of man-made materials by means of compaction when creating new high-tech industries is shown. **Keywords:** technological complex, microfibration, composite mixtures, extrusion, granulation, additives.

PROCESS OF CHARGE PREVENTION WITH LOW BULK DENSITY

M.V. Sevostyanov, T.N. Il'ina and I.G. Martakov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. The processes of agglomeration of dispersed materials, the relevance of their use in the utilization of man-made powdered materials. Shows the need for prehardening of the granulated charge when they are balling with balling. This is especially true for man-made materials with low bulk density, which is an obligatory stage for the formation of micro-granules, the subsequent growth and compaction of which occurs under the action of centrifugal forces. Analytical expressions for calculation of rotation frequency of the forming rolls providing necessary conditions for realization of processes of filtration of gaseous and liquid phases of a composite mix, and also for reception of microgranules of the set density at a vibro-roll method of preliminary compaction are presented. The obtained dependences are the basis for the development of a vibration-centrifugal granulator for the step-by-step process of forming technogenic dispersed materials with low bulk density. **Keywords:** granulation, technogenic materials, compacting rolls, filtration of liquid and gaseous phases, vibration centrifugal granulator.

ANALYSIS OF SEPARATOR OPERATING CONDITIONS IN A TECHNOLOGICAL MODULE WITH VIBRATION-CENTRIFUGAL CLOSED-CYCLE GRINDING UNIT FOR OBTAINING HIGH- DISPERSITY MATERIALS*

**V.S. Sevostyanov, V.I. Uralsky, I.P. Boichuk, R.A. Ermilov and
E.A. Lukyanova**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract. The demand for up-to-date building materials and components for their production is constantly growing. The purchasing of foreign analogues is often unreasonable and costly, and the domestic products not always meet the high requirements specified for them. In light of this, it is necessary to develop up-to-date knowledge-intensive technologies of producing building materials of various pur-

* Русскоязычная версия доклада приведена на с. 254 сборника

pose, as well as materials and products of ceramic, varnish-and-paint, glass and other industries, the basis of which is the application of high-dispersive powders. The extensive use of fine-ground and ultrafine-ground materials resulted in designing a wide range of grinders of various types (ball, vibration, planetary, centrifugal, jet grinders etc.). In each certain unit the special conditions for grinding are created, which allows using them for processing materials with various physical and mechanical characteristics. In this work the mathematical model of closed grinding cycle with combined-action air separator is suggested. In this model the integral functions of partition in air separator have been obtained. The calculated and experimental values of the integral functions of partition in air separator have been compared. **Keywords:** technological complex, finely-dispersed product, centrifugal grinding-mixing unit, combined-action air separator, closed grinding cycle.

INVESTIGATION OF CAVITATION AND VIBRATION PROCESSES IN THE TECHNOLOGY OF TREATMENT OF THE CONTAMINATED LIQUIDS*

V.S. Sevostyanov, M.M. Belykh and K.I. Sevostyanova

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Summary. This article considers the problems of treatment of contaminated liquids. Scientific works of home and foreign authors were analysed and according to this analysis it was made the conclusion. Experimental studies of the process of treatment of the contaminated liquids, in which the cavitation process in the technology of treatment of the contaminated media were investigated, as well as the process of treatment of the contaminated media in a vibration and centrifugal unit. As a result of the research, it was discovered that the cavitation method can be effectively used to treat water from heavy mechanical impurities, which makes it possible to carry out further filtration in fine filters. A vibration-rotary unit, developed in Belgorod State Technological University n.a. V G Shukhov, (Russia) at the Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms, was taken as a technical object, where experimental investigation of treatment of the contaminated liquids was carried out. It was also carried out the research of the stepwise process of treatment of the contaminated liquids in the developed unit. On the basis of these results the authors propose to use a stepwise method of treatment of liquid media: cavitation effect - for the preliminary phase of treatment and vibration -rotary effect – for the final stage of treatment. **Keywords:** liquid, contaminated liquids, vibration and centrifugal unit, rotational speed, filtration chamber, cavitation, vibration, sieve, amplitude of oscillations, treatment.

* *Русскоязычная версия доклада приведена на с. 261 сборника*

RESOURCE AND ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES OF COMPLEX PROCESSING AND UTILIZATION OF TECHNOGENIC MATERIALS*

N.T. Shein¹, V.S. Sevostyanov², V.V. Obolonsky¹, M.V. Sevostyanov², P.Yu. Goryagin², V.A. Babukov²

¹ *Transport company Ecotrans LLC, Belgorod*

² *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod*

Summary. At present, a very topical environmental problem is the increase in the formation of industrial and solid municipal waste (ISMW). This leads to a deterioration of the ecological situation, and, consequently, threatens human life and health, has a detrimental effect on the biosphere as a whole. Therefore, a special place in the organization of rational use of natural resources should take a comprehensive system of measures for the processing and utilization of various man-made materials that are the product of human production. The purpose of research and development projects is the creation of resource-saving technology, technological systems and special equipment for integrated processing and recycling of various man-made materials. One of the conditions for the implementation of resource-saving technology is the use of internal energy and material resources of the processing plant.

Keywords: complex processing, utilization, technogenic materials, resource saving, energy saving, industrial and solid municipal waste.

* *Русскоязычная версия доклада приведена на с. 268 сборника*

Научное издание

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ

III Международная
научно-техническая
конференция

Сборник трудов

ISBN 978-5-361-00663-2



Подписано в печать 20.12.18 г.

Тираж 500 экз.

Цена 500 руб.

Заказ

Формат 60×84¹/₁₆.

Усл.-печ. л. 21,75.

Уч.-изд. л. 19,98.

Макет подготовлен в Белгородском государственном
технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 4б

Тиражировано ИП Остащенко А.А.
308036, г. Белгород, ул. Буденного, д. 10, оф. 14