

**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

**IV Международная
научно-техническая
конференция**

Материалы конференции

(Белгород, 31 октября – 1 ноября 2019 г.)

**Белгород
2019**

УДК 620.9(082)

ББК 3

Э65

Серия основана в 2016 г.

Выходит ежегодно.

Энергетические системы [Текст]: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., 31 окт.–1 нояб. 2019 г. / Белгор. гос. технол. ун-т; отв. ред. П.А. Трубаев. – Белгород, 2019. – 455 с.

ISBN 978-5-361-00733-2

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 публикуются в авторской редакции, авторы публикаций сохраняют исключительные права на размещенные в сборнике материалы.

УДК 620.9(082)

ББК 3

Адрес размещения в сети Интернет: <http://es.bstu.ru/archive/2019>

ISBN 978-5-361-00733-2

© Белгородский государственный технологический университет (БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	9
1. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА	
Або Альзахаб О., Амосов Н.Т. Оценка эффективности работы паротурбинных установок при их совместной работе с теплонасосными установками в климатических условиях Сирийской Арабской Республики	13
Гашо Е.Г., Фокин А.М., Киселева А.И. Структурирование функции качества как метод контроля качества и эффективности работы систем централизованного теплоснабжения	19
Губарев А.В. Определение теплотехнических показателей высокотемпературной части конденсационного водогрейного котла	25
Гужов С.В., Гашо Е.Г., Шепель В.А. Составление прогнозного топливно-энергетического баланса котельной в условиях недостаточности данных	33
Зинуров В.Э., Петрова Т.С. Влияние загрязненности дугообразных элементов сепаратора на структуру газового потока	40
Кудинов А.А., Зиганшина С.К., Хусаинов К.Р., Демина Ю.Э. Разработка технологий повышения эффективности и надежности работы парогазовой ТЭС с двухконтурным котлом-утилизатором	44
Кузнецов В.А., Трубаев П.А. Уточнение диффузионной модели переноса излучения в ослабляющей среде	51
Мадышев И.Н., Хафизова А.И. Определение гидравлического сопротивления наклонно-гофрированных элементов блока оросителя градирни	61
Морозов А.В., Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Сошкина А.С. Определение физико-химических свойств борной кислоты для условий аварийных режимов ВВЭР	67
Тян В.К., Шелудько Л.П., Гулина С.А., Бирюк В.В., Горюнова И.Ю. Метод определения характеристик газопаровой ТЭС с паротурбинным приводом компрессора	74
Юрин В.Е. Комплексное исследование эффективности комбинирования АЭС с многофункциональной системой теплового аккумулирования	81

2. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Влацкая Л.А., Семенова Н.Г.

Программная реализация метода Монте-Карло для оптимального размещения компенсирующих устройств 88

Гаврилова А.А., Салов А.Г., Сагитова Л.А.

Системный анализ энергоэффективности территориальной генерирующей компании в период структурных преобразований 95

Губайдуллин Р.Р., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж., Кузнецов А.А., Смирнов А.Б., Муллин Ф.Ф., Карпенко О.И.

Волоконно-оптический датчик контроля высоких напряжений 102

Губайдуллин Р.Р., Аглиуллин Т.А.

Оптоволоконный датчик температуры высоковольтных шин 107

Дадабаев Ш.Т.

Компьютерное моделирование инвертора тока в программе MATLAB/SIMULINK, используемое для электроприводов большой мощности 113

Дронова Ю.В., Черненко Н.А., Тихонова Д.А.

Анализ достоверности применения условных единиц в оценке эффективности электросетевых компаний 119

Елисеев А.А., Шмелёв В.Е.

Средства диагностики электрооборудования цифровой подстанции 128

Зарипов Д.К., Балобанов Р.Н.

Компьютерное моделирование работы устройства контроля состояния высоковольтных изоляторов в процессе его эксплуатации 133

Кондратьева О.Е., Мясникова Е.М., Воронков Д.А.

Влияние ветра на надежность воздушных линий электропередачи 140

Мышкина Л.С., Сабадаш И.А.

Особенности функциональной надежности распределительных сетей 0,4-10 кВ 145

Мышкина Л.С., Терлыга Н.С., Фролова Я.А.

Исследование эффективности объединения зон свободного перетока за счет распределенной генерации 152

Олещук О.В., Сысун А.В., Тихомиров А.А., Соболев Н.В.

Магнитное поле трехфазной линии с рядовой и треугольной прокладкой жил 159

Руцков А.Л., Сидоренко Е.В., Бурковский В.Л., Фёдоров Я.П.

Реализация элементов программно-алгоритмического комплекса оптимизации технологических процессов на базе адаптивных методов 169

Фёдоров Я.П., Бурковский В.Л., Руцков А.Л. Повышение точности прогнозирования электропотребления субъектов ОРЭМ с использованием нечётких нейронных сетей	176
Фролов В.В., Приходько О.Ю., Слипченко С.Е., Матюшенко Н.В. САПР расчета размерных цепей инженерных конструкций	183
Хрусталева В.А., Гариевский М.В. Системная эффективность модернизации главных циркуляционных насосов АЭС с ВВЭР частотно-регулируемыми приводами	190

3. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Гашо Е.Г., Булгаков Н.С., Шкуро Ю.Д. Оценка энергетических эффектов модернизации зданий и микрорайонов в процессе реновации	196
Киселева А.И., Гашо Е.Г. Анализ энергосберегающих мероприятий в системах промышленного пароснабжения	200
Крутилова М.О., Щенятская М.А., Кошлич Ю.А., Шарапова А.В. Инструменты энергоэффективной оптимизации проектных решений зданий и сооружений в информационно-аналитических системах управления строительным и ремонтным производством	207
Муровский С.П., Шубин В.С. Внедрение энергосберегающих технологий на промышленных объектах Крыма	214

4. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Башмур К.А., Петровский Э.А., Шадчина Ю.Н. Гидродинамический модуль с рельефом для автономного электрообеспечения технологического оборудования	218
Гашо Е.Г., Кондрахов В.А. Повышение эффективности и безопасности энергосистемы Калининградской области за счёт возобновляемых источников энергии	224
Губайдуллин Р.Р. Радиодетекторная система контроля температуры аккумуляторных батарей гибридных транспортных средств на основе адресных волоконных Брэгговских структур с двумя идентичными сверхузкополосными спектрами отражения	231
Зацаринная Ю.Н., Логачева А.Г., Григорьева М.О. Электроэнергия на розничных рынках как товар в интеллектуальных энергетических системах	237

Корнилова В.В., Трубаев П.А. Теплотехнический анализ сжигания RDF-топлива с дожигом с использованием свалочного газа	243
Трубаев П.А., Клепиков А.С., Вережкин О.В., Гришко Б.М., Суслев Д.Ю., Рамазанов Р.С. Мониторинг выхода биогаза с тела полигона ТКО	252
5. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ	
Блинов В.Л., Зубков И.С., Бегетнев П.С. Многокритериальная оптимизация проточной части центробежного нагнетателя природного газа	260
Блинов В.Л., Комаров О.В., Заславский Е.А. Оценка эффективной мощности и технического состояния газотурбинного газоперекачивающего агрегата	268
Ильина Т.Н., Кузнецова И.А. Экономическая эффективность аспирационных систем в технологии переработки техногенных волокнистых материалов	275
Макаров А.Н., Окунева В.В., Павлова Ю.М. Расчет и анализ КПД дуг дуговых сталеплавильных печей малой и большой вместимости	281
Мишин Д.А., Перескок С.А. Влияние наличия крупнозернистого кварца в сырьевой смеси на режим работы цементных вращающихся печей	288
Мурзадерев А.В., Нешпоренко Е.Г. Энергосбережение в теплотехнологической схеме переработки сидеритовых руд	295
Надеев А.А., Бараков А.В., Дубанин В.Ю., Андреев А.Ю., Муравьев А.В. Экспериментальное исследование сушки силикагеля в аппарате с псевдооживленным слоем	300
Панова О.А., Гончаров А.А., Коновалов В.М., Беседин П.В. Вторичный энергетический компонент как скрытый потенциал энергосберегающих процессов в производстве цемента	307
Севостьянов В.С., Горягин П.Ю., Бабуков В.А. Исследование процесса измельчения техногенных полимерных материалов иглофрезерными рабочими органами	313
Севостьянов В.С., Шамгулов Р.Ю., Шенин Н.Т., Оболонский В.В., Бабуков В.А. Ресурсоэнергосберегающие технологии и технические средства для переработки твердых коммунальных отходов	319

Федорова С.В., Худяков П.Ю., Лаптев В.А.

Повышение энергетической эффективности процесса электролиза меди за счет идентификации коротких замыканий в электролизных ваннах 327

6. СЕКЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Ахмадеев А.А.

Анализ статистики причин аварийных отключений линий электропередач и пути их снижения 334

Белянский С.В.

Имитационное моделирование системы электроснабжения ИЖС сети 10/0,4 кВ на ПРИМЕРЕ Русскохаланского сельского поселения Чернянского района Белгородской области 341

Белянинова А.А.

Применение нефтяного кокса как энергетического топлива 347

Гордеева И.С.

Разработка тепловой схемы процесса сухого тушения кокса с целью экономии энергетических ресурсов 351

Гошко М.Ю.

Анализ энергоэффективных мероприятий методом жизненного цикла 357

Иванова А.В.

Применение новейших технологий в энергосбережении объекта санаторно-курортного комплекса в Крымском регионе 365

Ионова В.И.

Решение транспортной задачи электроснабжения в условиях переменной нагрузки в пакете MATHCAD 371

Капустин Р.О.

Исследование влияние переменной выработки альтернативных источников энергии на работу объединенных энергосистем 375

Ковальчук В.В.

Способы покрытия тепловой нагрузки зданий альтернативными источниками энергии в Московском регионе 383

Коржов А.Н., Лоза С.А., Романюк Н.А., Бондаренко И.Д.

Комплексная очистка воды для теплоэнергетики 388

Лобыня В.Е., Пономарёв Н.С.

Экономический анализ развития микрогенерации на примере Новосибирской области 393

Миллер И.Я., Апенькина А.И.

Стратегия работы независимых энергосбытовых компаний в России 400

Мошонкин Н.Ю.	
Разработка ветрогенератора в воздуховод с искусственным и постоянным потоком воздуха.....	408
Окушко В.В., Сtryжакoв С.Д.	
Машины для измельчения: мельницы и дробилки	415
Свирин М.В., Бычихин С.А.	
Анализ нестационарного теплового режима здания при снижении отопительной нагрузки в нерабочее время.....	424
Хабидуллин И.Р.	
Исследование влияния эксплуатационных факторов на эффективность работы солнечных панелей.....	433
Чехранова О.А.	
Методы управления отходами и получение энергии в Европе и в России....	437
Шинкарюк Д., Калачева В.	
Оценка экономического эффекта от работы гидроаккумулирующей электростанции на оптовом рынке электрической энергии и мощности в России	444
Предметный указатель	451

ВВЕДЕНИЕ

IV-я международная научно-техническая конференция «Энергетические системы» состоялась 31 октября – 1 ноября 2019 г. на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова).

Рабочие языки конференции – русский и английский. На конференцию после прохождения процедуры рецензирования было отобрано 125 докладов. По результатам конференции подготовлены 29 русскоязычных докладов в основных секция конференции и 18 докладов в секции молодых ученых, 59 докладов на английском языке, 19 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, материалы конференции с докладами на английском языке размещены в издательстве IOP Science (Великобритания) в отдельном выпуске электронного журнала «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE)» как материалы конференции ICES-2019 с индексацией в наукометрической базе данных Scopus.

Всего в конференции приняли участие 191 человек из 51 организаций (в том числе из 42 вузов, четырех научных учреждений и пяти предприятий), расположенных в 26 российских регионах и четырех зарубежных странах.

Количественный состав авторов докладов следующий: д-ра техн. наук, профессора – 22 чел.; канд. наук, доценты – 92 чел.; инженеры, ассистенты, старшие преподаватели, мл. научн. сотрд. и др. не остепенённые – 16 чел.; аспиранты – 18 чел.; магистранты и студенты – 37 чел.; представители производства – 6 чел.

УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ

- Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова (г. Барнаул);
- Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (г. Белгород);
- Белгородский государственный национальный исследовательский университет (г. Белгород);
- Владимирский государственный университет им. А.Н. и Г.Н. Столетовых (г. Владимир);
- Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж);
- Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского (г. Обнинск);
- Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (г. Макеевка);
- Донецкий национальный технический университет (г. Донецк);
- Забайкальский государственный университет (г. Чита);

- Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск);
- Казанский государственный энергетический университет (г. Казань);
- Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (г. Казань);
- Казанский национальный исследовательский технологический университет (г. Казань);
- Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (г. Симферополь);
- Кубанский государственный университет (г. Краснодар);
- М12Системс (г. Казань);
- Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (г. Магнитогорск);
- Магнитогорский металлургический комбинат (г. Магнитогорск);
- Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва);
- Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва);
- Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (г. Харьков);
- Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева (г. Нижний Новгород);
- Нововоронежское представительство Корпорации АК «ЭСКМ» (г. Новоронеж);
- Новосибирский государственный технологический университет (г. Новосибирск);
- Новосибирский государственный технический университет (г. Новосибирск);
- Оренбургский государственный университет (г. Оренбург);
- Петрозаводский государственный университет (г. Петрозаводск);
- Самарский государственный технический университет (г. Самара);
- Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (г. Самара);
- Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург);
- Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина (г. Саратов);
- Саратовский научный центр РАН (г. Саратов);
- Севастопольский государственный университет (г. Севастополь);
- Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова (г. Якутск);
- Сибирский государственный университет путей сообщения (г. Новосибирск);
- Сибирский федеральный университет (г. Красноярск);
- Тамбовский государственный технический университет (г. Тамбов);
- Тверской государственный технический университет (г. Тверь);
- Технический университете УГМК (г. Верхняя Пышма, Свердловская обл.);
- Технологический университет (г. Багдад, Ирак);
- Транспортная компания «Экотранс» (г. Белгород);
- Университет Висконсин-Милуоки (Милуоки, США);
- Университет Куфа (Ирак);
- Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург);
- Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (г. Ростов-на-Дону);
- Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (г. Москва);
- Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» (г. Смоленск);
- Филиал ОАО «МРСК Центра» – «Воронежэнерго» (г. Воронеж);
- Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина (г. Харьков);
- Худжандский политехнический институт ТТУ имени акад. М.С. Осими (г. Худжанд, Республика Таджикистан);
- Южно-Уральский государственный аграрный университет (г. Троицк Челябинской обл.).

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Теплоэнергетика и теплотехника

Рассматривались фундаментальные и практические вопросы в научных областях тепловых и тепломассообменных 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, 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.
д-р 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.

Секция молодых ученых

Проводилась по основным направлениям конференции

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- Трубаев Павел Алексеевич** **председатель**, д-р техн. наук, доц., профессор кафедры энергетики теплотехнологий БГТУ им В.Г. Шухова (Белгород)
- Белоусов Александр Владимирович** канд. техн. наук, доцент., директор института энергетики, информационных технологий и управляющих систем, зав. каф. электроэнергетики и автоматизации БГТУ им В.Г. Шухова (Белгород)
- Бирюков Алексей Борисович** д-р техн. наук, проф., зав. каф. промышленной теплофизики ДонНТУ (Донецк)
- Ботвиньев Алексей Николаевич** заместитель начальника департамента жилищно-коммунального хозяйства Белгородской области – начальник управления развития топливно-энергетического комплекса (Белгород)
- Гашо Евгений Геннадиевич** д-р техн. наук, доц., проф. кафедры Промышленных теплоэнергетических систем института проблем энергетической эффективности НИУ МЭИ, эксперт аналитического центра при правительстве РФ (Москва, РФ)
- Мозговой Николай Васильевич** д-р техн. наук, проф., зав. каф. Промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности ВГТУ (Воронеж)
- Радченко Вадим Витальевич** канд. экон. наук, депутат Совета депутатов города Белгорода, директор ООО «Центр энергосервисных технологий» (Белгород)
- Севостьянов Владимир Семенович** д-р техн. наук, проф., , заслуженный изобретатель РФ, зав. каф. технологических комплексов, машин и механизмов БГТУ им В.Г. Шухова (Белгород)
- Удовиченко Злата Викторовна** канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской архитектурно-строительной академии (г. Макеевка Донецкой обл.).
- Marina Kozhukhova** PhD, COLLEGE OF Engineering & Applied Science, University of Wisconsin–Milwaukee (Milwaukee, USA)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- Глаголев Сергей Николаевич** **председатель**, д-р экон. наук, профессор, ректор БГТУ им. В.Г. Шухова
- Трубаев Павел Алексеевич** **зам. председателя**, д-р техн. наук профессор БГТУ им. В.Г. Шухова
- Белоусов Александр Владимирович** канд. техн. наук, доцент, директор института ЭИТУС БГТУ им. В.Г. Шухова
- Кошлич Юрий Алексеевич** канд. техн. наук, директор ООО «НТЦ АСП», доцент кафедры электроэнергетики и автоматизации
- Фиорова Елена Витальевна** начальник отдела развития топливно-энергетического комплекса и инженерной инфраструктуры Департамента жилищно-коммунального хозяйства Белгородской области

1. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 620.9

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ПРИ ИХ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ С ТЕПЛОНАСОСНЫМИ УСТАНОВКАМИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Аспирант **Або Альзахаб О.**
Канд. техн. наук, доц. **Амосов Н.Т.**
*Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

Рассматривается возможность использования низкопотенциальной теплоты в составе тепловых электростанций (ТЭС) на основе применения парокompрессионных тепловых насосов (ПКТН), для повышения эффективности систем охлаждения воды на входе в конденсатор паровых турбин в летних период режимов работы. Расчеты сделаны для тепловой электрической станции «Тишрин» с турбинами типа К-200-130.

Ключевые слова: *парокompрессионный тепловой насос; тепловая электростанция; эффективность систем охлаждения конденсаторов.*

Потеря теплоты в конденсаторе паровых турбин является основным источником потерь тепловой энергии на ТЭС. Эта потеря теплоты может достигать 49% и выше от величины тепловой энергии подведенной к турбине [1] и в значительной степени зависит от температуры охлаждающей воды. Теплота с отводимой охлаждающей водой конденсатора будет попадать в окружающую среду при использовании градири или непосредственно в реки в зависимости от используемой схемы охлаждения (охлаждение в разомкнутом или замкнутом контуре), вызывая тепловое загрязнение.

В работе [2] приведены результаты математического моделирования процессов работы энергоблока К-200-130 с учетом климатических условий Сирии. В этом энергоблоке потери теплоты в конденсаторе достигает 298,8 МВт в летних период режимов работы, что составляет 50,83% от общего количества тепловой нагрузки. Это огромное количество теплоты, потерянной в конденсаторе, поэтому необходимо предусматривать утилизацию теплоты.

Цели и задачи работы: исследовать эффективность утилизацию теплоты в конденсаторе паровой турбины за счет использования парокompрессионных тепловых насосов в технологических схемах тепловых электростанций. Для анализа эффективности применения ПКТН в составе работающей ТЭС была выбрана ТЭС Тишрин (Сирия).

Климатические условия Сирийской Арабской республики характеризуются высокой солнечной активностью в летний период. Средняя температура воздуха в этот сезон превышает 36°C , что вызывает рост температуры воды в источниках технического водоснабжения ТЭС. Увеличение температуры циркуляционной воды приводит к снижению эффективности работы конденсационной установки, что влечет за собой падение единичной электрической мощности энергоблоков и экономичности электростанции в целом [3].

Тепловые насосы находят широкое применение для повышения эффективности работы целых энергокомплексов. Возможно использовании парокompрессионных тепловых насосов для снижения температуры воды в источниках технического водоснабжения ТЭС.

На рис. 1 представлена схемные решения по подключению парокompрессионного теплового насоса к энергоблоку ТЭС мощностью 200 МВт при подключении конденсационного контура теплового насоса к подогревателю низкого давления и сетевой установке:

а) подключение парокompрессионного теплового насоса к ПНД №7;

б) подключение теплового насоса с промежуточным теплообменником к ПНД №7;

в) подключение теплового насоса с промежуточным теплообменником и переохладителем к ПНД №7 и НСП сетевой установки.

Для ТЭС Тишрин с паросиловым блоком мощностью 200 МВт был произведен расчет трех схем парокompрессионной ПКТН:

– схемы парокompрессионного теплового насоса;

– схемы теплового насоса с промежуточным теплообменником (ПТО);

– схемы теплового насоса с ПТО и переохладителем (ПО).

Расчет производился для двух рабочих агентов теплонасосных установок (ТНУ) – хладонов R134a, R152a, считающихся полностью озонобезопасными. Расчет проводился для одного из характерных режимов работы станции в летний период: температура перед конденсатором ТНУ равна $57,85^{\circ}\text{C}$, а ее расход – 489,5 т/ч, температура циркуляционной воды перед испарителем теплового насоса равна 33°C . Результаты расчетов схем ТНУ представлены в табл. 1.

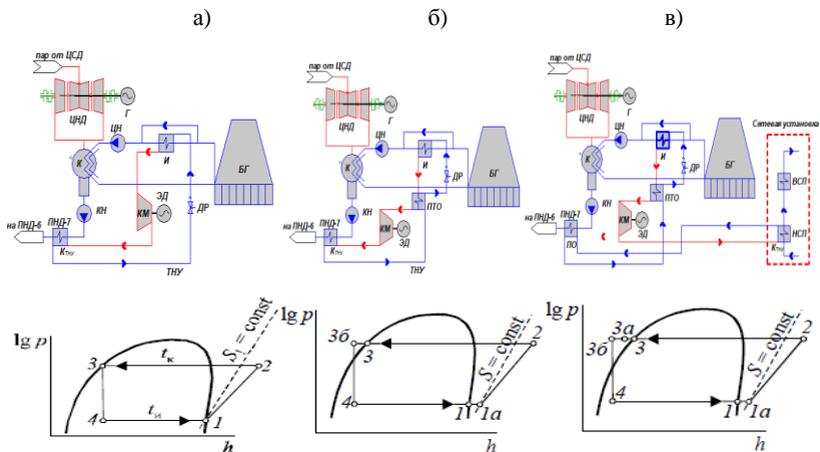


Рис. 1. Схемные решения по подключению ПКТН к технологическому циклу ТЭС мощностью 200 МВт:

ЦСД – цилиндр среднего давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; Г – электрический генератор; К – конденсатор паровой турбины; ЦН – циркуляционный насос; БГ – башенная градирня; КН – конденсатный насос; ПНД-6, ПНД-7 – подогревателей низкого давления; ТНУ – теплонасосная установка; И – испаритель ТНУ; КМ – компрессор ТНУ; К_{ТНУ} – конденсатор ТНУ; ДР – дроссельный вентиль ТНУ; ЭД – электродвигатель ТНУ; ВСП – верхний сетевой подогреватель; НСП – нижний сетевой подогреватель

Таблица 1

Показатели энергетической эффективности рассчитанных вариантов

Название показателя	ПКТН		ПКТН с ПТО		ПКТН с ПТО и ПО
	R134a	R152a	R134a	R152a	R152a
Удельная тепловая нагрузка испарителя $q_{и}$, кДж/кг	105,06	188,22	119,74	204,56	211,07
Удельная тепловая нагрузка конденсатора $q_{к}$, кДж/кг	125,24	234,82	140,72	254,42	217,28
Удельная тепловая нагрузка промежуточного теплообменника $q_{пто}$, кДж/кг	–	–	14,68	16,46	22,4

Окончание табл. 1

Название показателя	ПКТН		ПКТН с ПТО		ПКТН с ПТО и ПО
	R134a	R152a	R134a	R152a	R152a
Удельная тепловая нагрузка переохладителя $q_{по}$, кДж/кг	–	–	–	–	75,75
Удельная тепловая нагрузка теплового насоса $q_{тн}$, кДж/кг	125,24	234,82	140,72	254,42	293,03
Удельная энергия, потребляемая электродвигателем W , кДж/кг	22,42	57,53	23,25	61,41	101,18
Степень сжатия в компрессоре ε	2,43	3,21	2,43	3,21	5,95
Коэффициент преобразования теплоты μ	6,21	5,04	6,71	5,115	3,58
Коэффициент преобразования электроэнергии μ_3	5,03	4,08	5,44	4,14	2,90
Удельный расход первичной энергии ПЭ	0,523	0,645	0,484	0,636	0,91
Эксергетический КПД η_3	0,555	0,418	0,596	0,424	0,327
Тепловая нагрузка теплонасосной установки $Q_{тн}$, кВт	5777,7	5777,7	5777,7	5777,7	23896,57
Массовый расход хладагента $G_{хад}$, кг/с	46,13	24,61	41,06	22,71	81,55
Полная нагрузка в компрессоре N , кВт	1034,2	1415,8	954,64	1394,6	8251,65
Полная нагрузка в испарителе $Q_{ис}$, кВт	4846,4	4632,1	4916,5	4645,6	17212,76
Полная нагрузка в конденсаторе $Q_{к}$, кВт	5777,7	5777,7	5777,7	5777,7	17719,18
Полная нагрузка в переохладителе $Q_{по}$, кВт	–	–	–	–	6177,39
Полная нагрузка в промежуточном теплообменнике $Q_{пто}$, кВт	–	–	602,76	373,81	1826,72
Перепады температуры низкопотенциального теплоносителя Δt_n , °C	0,181	0,173	0,184	0,174	0,643

Удельная тепловая нагрузка теплового насоса $q_{\text{тн}}$ характеризует расход фреона, а значит, влияет на стоимость компрессора и теплообменников. Степень сжатия в компрессоре определяет его стоимость. Коэффициент преобразования энергии и удельный расход первичной энергии характеризуют экономичность работы теплового насоса. Эксергетический КПД показывает термодинамическое совершенство процессов в тепловом насосе. Таким образом, наилучший вариант схемы выбирался с наибольшим коэффициентом преобразования электроэнергии. Для вариантов с близким коэффициентом преобразования энергии наилучшим будет тот, который обеспечивает наименьшую степень сжатия при наибольших эксергетическом КПД и удельной тепловой нагрузке [4].

Эффективность ПКТН оценивается по соотношению потребленной электроэнергии и полученной теплоты [5]. Таким образом, наилучший вариант схемы выбирался с наибольшим коэффициентом преобразования электроэнергии. После анализа расчетов можно сделать вывод, что наиболее эффективна схема парокompрессионного ПКТН с промежуточным теплообменником ПТО на хладоне R134a.

Тепловое совершенство реального цикла теплового насоса обусловлено внутренней и внешней необратимостью термодинамических процессов. Внутренней необратимости являются процессы сжатия в компрессоре и процесс дросселирования. Внешняя необратимость реального теплового насоса, возникающая в результате теплообмена при конечной разности температур в конденсаторе и в испарителе [6].

Использование парокompрессионных тепловых насосов в системе охлаждения конденсаторов паровых турбин в период летних режимов работы приводит к снижению температуры воды, поступающей в конденсатор, и следовательно, к снижению давления в конденсаторе турбины. Снижение давления в конденсаторе приводит к повышению мощности энергоблока. При изменении давления в конденсаторе на $\pm 0,01$ кгс/см² мощность турбины изменяется на $\mp 1,9$ МВт, что приводит к изменению экономичности энергоблока на ∓ 0.95 % [7].

Результаты показывают, что в результате использования парокompрессионного теплового насоса повышается производительность тепловой электростанции. Это происходит за счет повышения мощности энергоблока вследствие отмены отбора пара из турбины в подогреватель ПНД №7 и снижения температуры воды, поступающей в конденсатор. Следовательно, повышается эффективность тепловой установки и снижается расход топлива в котле, что позволяет повысить экономичность электростанции в целом.

Выводы по работе

На основе полученных расчетных данных можно сделать выводы о целесообразности применения ПКТН в тепловой схеме ТЭС:

1. Применение испарительного контура теплового насоса на подающей и отводящей циркуляционных линиях системы технического водоснабжения приводит к снижению температуры воды на входе в конденсатор на $0,2^{\circ}\text{C}$ и, следовательно, к снижению давления в конденсаторе турбины на $0,0011 \text{ кгс/см}^2$ и повышение мощности энергоблока на 209 кВт, что позволяет снизить температуру обратной циркуляционной воды, сбрасываемой в водоем и уменьшает экологическую нагрузку на окружающую среду в целом.

2. Применение конденсационного контура теплового насоса в цикле регенеративной системы позволит повысить мощность энергоблока на 0,216 % и повысить КПД электростанции на 0,213 %.

Библиографический список

1. **Dosa Ion** Power plant waste heat recovery for household heating using heat pumps // ResearchGate. 2014. С. 1-9.

2. **Або Альзахаб О., Амосов Н.Т., Аникина И.Д.** Математическое моделирование тепловых схем энергоблоков при их совместной работе с тепловыми насосами в условиях Сирийской Арабской Республики // Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции международным участием. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 92-94.

3. **Або Альзахаб О., Аникина И.Д., Амосов Н.Т.** Математическое моделирование тепловых схем мощных энергоблоков при их совместной работе с тепловыми насосами // Энергетические системы: III Междунар. науч. -техн. конф.: сб. трудов. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. С. 12-17.

4. **Трубаев П.А., Гришко Б.М.** Тепловые насосы. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 142 с.

5. Тепловые насосы в схемах деаэрации подпиточной воды ТЭЦ / И.Д. Аникина, В.В. Сергеев, Н.Т. Амосов, М.Г. Лучко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 2 (243). С. 24-33.

6. **Толстый О.В., Тихонова О.Б., Русяков Д.В.** Оценка термодинамической эффективности цикла теплового насоса // Молодой ученый. 2016. № 20. С. 207-210.

7. Теплообменники энергетических установок: Учебное электронное издание [Электронный ресурс] / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгини др. Екатеринбург: УрФУ, 2015. URL: <https://openedu.urfu.ru/files/book/>.

УДК 697.347

**СТРУКТУРИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ КАЧЕСТВА КАК
МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАБОТЫ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

Д-р техн. наук, доцент **Гашо Е.Г.**¹

Ст. преп. **Фокин А.М.**²

Аспирант **Киселева А.И.**¹

¹Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва

²Филиал Национального исследовательского
университета «МЭИ», г. Смоленск

***Аннотация.** Представленная статья посвящена решению теоретических вопросов, связанных с оценкой качества теплоснабжения, предложена структурированная функция качества системы централизованного теплоснабжения с целью контроля качества и эффективности работы системы централизованного теплоснабжения.*

***Ключевые слова:** квалиметрия, качество теплоснабжения, системы централизованного теплоснабжения, энергоэффективность, показатели качества.*

Системы управления качеством получили широкое распространение во всех отраслях промышленности. При этом следует отметить, что в области централизованного теплоснабжения данным методам не уделяется должного внимания. Системы качества в энергетике разработаны только для отдельных случаев, в основном при производстве теплоэнергетического оборудования. Сам же процесс теплоснабжения и система отопления в целом как предмет изучения квалиметрии не рассматривалась [1]. В связи с этим актуальной научной задачей, имеющей как теоретическое, так и прикладное значение, выступает разработка системы оценки качества теплоснабжения и построение на её основе мер по повышению качества.

Целью работы являлось построение системы оценки качества централизованного теплоснабжения, обоснование методов повышения качества теплоснабжения и разработка данных методов.

Качество обеспечивается практически всеми свойствами изделия (системы теплоснабжения), количество которых в принципе бесконеч-

но. Обычно задача перевода интуитивных представлений потребителей о качестве в численные значения соответствующих технических параметров решается путём представления свойств и характеристик предмета оценки в виде комплексного показателя качества [2]:

$$K = \sum_{i=1}^n a_i \kappa_i \quad (1)$$

где K – комплексный показатель качества; a_i – весовой коэффициент соответствующего единичного показателя; κ_i – значение единичного показателя; n – количество единичных показателей качества.

Таким образом, на первом этапе оценки определяются наиболее значимые показатели качества системы теплоснабжения: 1) стабильность температуры в помещениях; 2) стабильность влажности; 3) безопасная температура нагревающих устройств; 4) электрическая безопасность системы; 5) гидравлическая безопасность системы; 6) бесшумность; 7) минимально занимаемое системой место; 8) энергоэффективность; 9) стоимость капитальных вложений; 10) стоимость эксплуатации.

Совокупность этих показателей определяет комплексный показатель качества [2]. В свою очередь, каждый из этих показателей обеспечивается соответствующими техническими параметрами (показателями), т.е. они являются также комплексными показателями качества. Но графическое представление показателей планирования уже даст представление об уровне качества системы, например, по сравнению с некоторым базовым образцом.

Среди методов обеспечения и оценки качества можно выделить две большие группы: традиционные существующие и сравнительно новые (не применявшиеся до сих пор) современные методы. К традиционным относятся методы, регламентированные нормативными документами и ведомственными инструкциями и рекомендациями. Среди современных методов рассмотрим следующие: статистические, методы Тагучи и структурирование функций качества [3].

Структурирование функции качества является системным инженерным инструментом, который используется для сбора запросов и пожеланий потребителя (как внутренних, так и внешних) и представления их в виде параметров изделия (параметров планирования) [4]. Требования заказчика сопоставляются с параметрами планирования и представляются в виде корреляционной матрицы (табл. 1)

Таблица 1

Примерный вид структурированной функции качества

$R_{1,j}$	$R_{2,j}$						
$R_{1,j-1}$	...	...	...	...	...	...	...
$R_{1,3}$	Матрица корреляций $R_{i,j}$						
$R_{1,2}$	$R_{2,1}$	...	...	...	...	...	$R_{1-1,1}$
Инженерные параметры планирования							
1	2	...	$j-1$	j	$K_{гр,п,1,k}$		$K_{пнк}$
...	12	...	$1, j-1$	$1, j$	$K_{гр,п,1,1}$	...	$K_{гр,п,1,k}$
i	$i, 2$	...	...	$i, j-1$	...	...	...
...	...	...	...	...	$K_{гр,п,j} = (\sum_{j=1}^n (K_{м,гр,j} \cdot K_{ком,ср,j} \cdot K_{о,j})) / n$		$K = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m K_{гр,п,j}$
n	$n, 2$	...	...	...	...	...	...
$K_{гр,п,1}$	...	...	...	$n, j-1$	n, j	...	$K_{гр,п,k}$
...	$K_{м,гр,i} = \frac{1 + \sum_{j=1}^m R_{ij}}{1 + \max \sum_{j=1}^m R_{ij}}$						
$K_{стр,м}$	ИПП ₁	...	...	...	...	...	...
...
ИПП _м	...	...	...	...	...	...	...
$K_{к,ср,1}$	...	...	...	...	...	...	...
...	$K_{ком,ср} = \frac{ИПП_1}{ИПП_6}$						
$K_{к,ср,м}$	...	...	...	...	...	...	...

Информация, получаемая с помощью такой матрицы, позволяет установить насколько параметры планирования удовлетворяют требованиям заказчика и сопоставить параметры планирования с достижениями в этой области. Структурированные функции качества могут строиться и для существующего изделия в том случае, если требуется определить, какие требования заказчика учтены, а какие пропущены – оставшиеся без ответа пожелания будут представлены пустыми строчками матрицы. Любые излишние параметры планирования (параметры изделия) будут представлены пустыми колонками.

Первым шагом в процессе является установление пределов параметров контроля или границ вариации свойств изделия, которое изучается. В нашем случае рассматривается система теплоснабжения административного здания. Следующей задачей будет определение потребностей заказчика или пользователя. В качестве заказчиков выступают сотрудники, находящиеся в отапливаемых помещениях, администрация организации, обслуживающий персонал и др.

Затем следует установить перечень количественных характеристик, которые обеспечивают выполнение требования заказчиков. Количественные или технические характеристики системы обычно представлены в технической документации на объект. Учитывая важное социальное значение систем отопления, главные характеристики системы регламентированы в нормативных документах [5]. Так как эти характеристики являются количественными, то к ним предъявляется требование измеримости – эти характеристики должны выражаться количественно в установленных единицах. Например, температура отопительного прибора – в градусах Цельсия.

В средней части таблицы приведена матрица соотношений, в которой указана взаимосвязь между требованиями заказчика и параметрами планирования. Из матрицы соотношений видно, какие требования потребителя и насколько обеспечивают те или иные характеристики изделия. При этом различают три вида связи: сильная, средняя, слабая. Численно выразить эту взаимосвязь можно с помощью методов экспертных оценок.

На основе матрицы соотношений строится процесс оценивания конкурентов в зависимости от того, насколько учтены пожелания потребителей тем или иным конкурентом. Графа оценок конкурентов находится в правой части дома качества. При этом конкуренты располагаются по порядку в зависимости от количества набранных баллов.

Над таблицей параметров планирования дана матрица корреляций между самими параметрами планирования. Корреляционная связь мо-

жет быть выражена четырьмя степенями: сильная положительная, положительная, сильная отрицательная, отрицательная [6]. Отрицательные связи рассматриваются при оптимизации соотношения соответствующих технических характеристик. Положительные связи позволяют избежать дублирования усилий. В случае сравнения нескольких конкурентов, как в нашем случае, можно вычислить сами значения коэффициентов корреляции: численное значение коэффициента корреляции между i и j техническими параметрами R_{ij} ; сумму коэффициентов корреляции для i элемента $\sum_{j=1}^m R_{ij}$; максимальную из сумм $\max_{j=1}^m \sum_{j=1}^m R_{ij}$.

На основе этих чисел определяется коэффициент технической трудности реализации того или иного параметра планирования:

$$K_{m,mp,i} = \frac{1 + \sum_{j=1}^m R_{ij}}{1 + \max_{j=1}^m \sum_{j=1}^m R_{ij}} \quad (2)$$

Численные значения технических характеристик системы (исследуемой и альтернативных) приведены в нижней части таблицы.

На основе технических характеристик системы – фактически это оценка изделий конкурентов – строится процесс оценки конкурентоспособности вариантов. Этим достигается установление базового уровня – наиболее достойного варианта изделия. В качестве конкурентов в нашем случае выступили различные варианты теплоснабжения – от централизованного теплоснабжения до индивидуального.

$$K_{\text{конк.сн.}} = \frac{ИПП_i}{ИПП_{i0}} \quad (3)$$

где $ИПП_i$ – численное значение соответствующего параметра планирования; $ИПП_{i0}$ – численное значение соответствующего базового параметра планирования.

Инженерные параметры планирования представляют интерес не сами по себе, а в связи с тем, какое значение они имеют для обеспечения того или иного параметра планирования, это учитывается коэффициентом весомости, который определяется на основе матрицы соотношений:

$$K_{ei} = e^{-\frac{TP_{i1} - TP_{i\max}}{TP_{i\max}}} \quad (4)$$

Затем определяются целевые значения параметров. Целевые значения параметров ранжируются по принципу трудности технической реализации и составляется рейтинг важности для каждой количественной характеристики в процентах. По рейтингу принимают решение о том, какие параметры изделия следует изменять в первую очередь.

Теперь можно определить уровень единичного показателя качества для отдельных требований потребителя, достигаемый в различных системах теплоснабжения:

$$K_{тр.п. j} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (K_{m,mp,i} \cdot K_{кож.зн.i}) \right) \cdot K_{ei} \quad (5)$$

Комплексный показатель качества системы теплоснабжения будет равен среднему от единичных показателей:

$$K = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m K_{тр.п. j} \quad (6)$$

где m – количество требований потребителя.

Выводы по работе: построив структурированную функцию качества, можно решить основные экономические проблемы качества [7]: измерить качество сравниваемых вариантов, оценить стоимость достижения заданного уровня качества или определить уровень качества исходя из имеющихся средств на обеспечение качества, а также тесно связанную с ними задачу о сроке окупаемости мероприятий по повышению качества.

Библиографический список

1. **Киселева А.И., Фокин А.М.** Влияние отдельных показателей на качество функционирования паропроводов // Матер. докл. I Поволжской научно-практ. конф. Казань: КГЭУ, 2015. С. 252-254.
2. **Архангельская Е.Л., Елизарова Н.Н.** Информационное обеспечение управления качеством теплообеспечения потребителей // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2012. № 4. 85 с.
3. **Федюкин В.К.** Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции. М.: Кнорус, 2015. 287 с.
4. Федеральный закон от 27.07.2010 № 190-ФЗ «О теплоснабжении».
5. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. 9-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 472 с.
6. **Кендел М.Дж.** Ранговые корреляции: пер. с англ. М.: Статистика, 1975. 216 с.
7. **Ковылянский Я.А., Старостенко Н.Н.** Практическая методика количественной оценки надёжности тепловых сетей при проектировании и в условиях эксплуатации // Теплоэнергетика, № 5. 1997. С. 30–33.

УДК 697.326.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧАСТИ КОНДЕНСАЦИОННОГО ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА*

Ст. преп. **Губарев А.В.**

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

***Аннотация.** В статье приводятся результаты обработки экспериментальных данных, полученных по результатам испытаний конденсационного водогрейного котла, разработанного сотрудниками БГТУ им. В.Г. Шухова. Область применения котла – автономные системы теплоснабжения. Использование котла в таких системах позволяет достичь значительной экономии топлива, затрачиваемого на выработку единицы теплоты. Приводятся зависимости параметров энергоносителей, а также коэффициентов теплопередачи от производительности котла.*

***Ключевые слова:** конденсационный водогрейный котел, испытательный стенд, результаты испытаний.*

Во многих европейских странах для нужд теплоснабжения используются автономные системы [1]. В последние десятилетия увеличилась доля таких систем и в России [2]. Достоинства автономных систем теплоснабжения: отсутствие протяженных тепловых сетей [3], более простое регулирование отпуска теплоты тепловым источником [4], меньшие затраты на обслуживание и ремонт оборудования [5].

Наблюдается повышение доли устанавливаемых в тепловых источниках указанных систем конденсационных водогрейных котлов. В этих котлах имеет место охлаждение продуктов сгорания до температур, при которых происходит конденсация части водяных паров. В некоторых странах происходит полное замещение котельного парка автономных систем теплоснабжения конденсационными котлами [6]. В таких котлах также дополнительно экономится до 15 % топлива.

Сотрудниками БГТУ им. В.Г. Шухова разработана конструкция конденсационного водогрейного котла для использования его в автономных системах теплоснабжения [7]. Данный котел –

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

двухконтурный. В первом контуре – высокотемпературной части – сжигается топливо и вырабатывается теплоноситель на нужды отопления. Во втором контуре – контактно-рекуперативной части – происходит глубокое охлаждение продуктов сгорания, конденсация из них части водяных паров, и подготавливается теплоноситель для горячего водоснабжения. Указанные части котла связаны между собой адиабатной частью, в которой происходит изоэнтальпное охлаждение и увлажнение газов при их непосредственном контакте с распыляемой в поток газов водой.

Были проведены испытания образца котла теплопроизводительностью 250 кВт для определения его теплотехнических характеристик.

Цель работы – представление результатов экспериментальных исследований высокотемпературной части образца котла.

Для проведения экспериментальных исследований работы котла и определения его теплотехнических показателей в процессе работы был создан испытательный стенд [8], схема которого приведена на рис. 1.

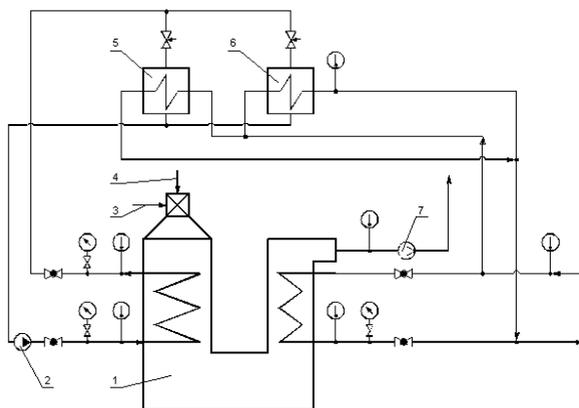


Рис. 1. Схема испытательного стенда конденсационного водогрейного котла:

1 – конденсационный водогрейный котел; 2 – насос системы отопления; 3 – воздух; 4 – топливо; 5 – теплообменник, имитирующий потребителя системы отопления; 6 – подогреватель воды на горячее водоснабжение; 7 – дымосос

В состав теплового оборудования стенда, кроме котла, включены два кожухотрубных теплообменника. Один из них имитирует потребителя системы отопления. В межтрубное пространство этого теплообменника поступает вода, нагретая в высокотемпературной части котла.

Здесь она охлаждается протекающей внутри трубок холодной водопроводной водой до параметров обратной воды системы отопления. Охлажденная вода поступает обратно в котел.

Во втором теплообменнике вода хозяйственно-питьевого качества, протекающая в трубном пространстве, нагревается до параметров воды на нужды горячего водоснабжения. Нагрев воды осуществляется за счет охлаждения воды, полученной в высокотемпературной части котла. Подогретая в указанном теплообменнике вода, смешивается с водой, нагретой в контактно-рекуперативной части котла.

Таким образом, с помощью второго теплообменника производится регулирование соотношения теплоты, направляемой системой на отопление и на горячее водоснабжение.

Работа стенда осуществляется следующим образом. Высокотемпературная часть котла, а также межтрубное пространство теплообменных аппаратов заполняется обессоленной водой, а в трубки трубного пучка контактно-рекуперативной части направляется с постоянным расходом холодная вода хозяйственно-питьевого качества. Для охлаждения в теплообменниках воды, нагретой в высокотемпературной части котла, в их трубное пространство направляется холодная водопроводная вода. В ходе испытаний подогретая в теплообменнике, имитирующем потребителей системы отопления, вода сбрасывается в канализацию. Охлаждающая вода после выхода из подогревателя воды на горячее водоснабжение, смешивается с водой, нагретой в контактно-рекуперативной части, и также сбрасывается в канализацию.

В процессе определения теплотехнических характеристик котла производились измерения следующих параметров: расхода газа, коэффициента избытка воздуха, температур воды на входе в высокотемпературную часть котла и на выходе из нее, воды на входе в контактно-рекуперативную часть и на выходе из нее, а также температур продуктов горения на выходе из высокотемпературной части и из котла.

Для определения теплотехнических характеристик высокотемпературной части котла, пользуясь измеренными значениями, производились расчеты горения топлива, параметров газов в топке, на выходе из высокотемпературной части и из котла, составление теплового баланса котла, расчеты теплообмена в топке и в дымогарных трубах.

В процессе выполнения расчета горения топлива по стандартным методикам определялись объемы сухих и влажных продуктов сгорания и компонентов, входящих в их состав, приходящиеся на 1 м³ сжигае-

мого природного газа. Кроме того, была определена адиабатическая температура горения.

Для дальнейших расчетов было необходимо определить параметры продуктов горения при нормальных условиях и при рабочих условиях в контрольных точках котла: в топке при адиабатической температуре (параметрам присваивался индекс Г1), на выходе из высокотемпературной части котла (Г3) и на выходе из котла (Г5).

Также были определены объемные расходы при нормальных и рабочих условиях, а также массовые расходы газов в контрольных точках. Так как в процессе охлаждения продуктов сгорания в адиабатной и контактно-рекуперативной частях изменяется их влагосодержание, массовый расход уходящих газов определялся по формуле, кг/с

$$G_{Г5} = G_{с.г} (1 + x_{Г5}) \quad (1)$$

где $G_{с.г}$ – массовый расход сухих газов; $x_{Г5}$ – влагосодержание газов на выходе из котла.

Энтальпии продуктов сгорания в контрольных точках котла определялись по формуле, кДж/кг сухих газов

$$I_{Г} = (c_{с.г} + c_{в.п} x_{Г}) t_{Г} + r_0 x_{Г} \quad (2)$$

где $c_{с.г}$, $c_{в.п}$ – средние удельные изобарные теплоемкости сухих газов и водяного пара; $x_{Г}$ – влагосодержание продуктов сгорания; r_0 – теплота конденсации водяного пара при нормальных условиях.

Тепловые потоки с продуктами сгорания в контрольных точках котла определялись по формуле, кВт

$$Q_{Г} = I_{Г} G_{с.г} \quad (3)$$

В результате составления теплового баланса котла определялись его КПД и расходы теплоносителя, направляемого на нужды отопления потребителей. КПД котла определялся по уравнению обратного теплового баланса. Доля потерь теплоты с уходящими газами рассчитывалась как отношение теплового потока с продуктами сгорания на выходе из котла к тепловому потоку с продуктами сгорания в топке.

В результате расчета теплообмена в топке были определены суммарное количество теплоты, отдаваемое в жаровой трубе излучением и конвекцией, а также полный коэффициент теплопередачи в топке.

Для определения коэффициента теплопередачи в дымогарных трубах было определено количество теплоты, передаваемое газами, движущимися в дымогарных трубах, воде, протекающей в межтруб-

ном пространстве. Это количество теплоты определялось как разность количества теплоты, полезно используемого в высокотемпературной части, и количества теплоты, отдаваемого газами в жаровой трубе.

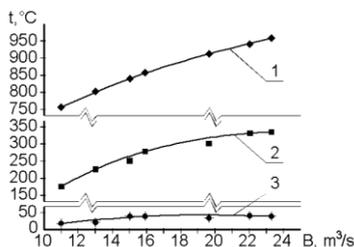
Результаты измерений температуры нагреваемой воды на входе в высокотемпературную часть и на выходе из нее, продуктов сгорания на выходе из высокотемпературной части и из котла, а также результаты расчета температуры продуктов сгорания на выходе из топki при различных расходах природного газа приведены в табл. 1.

Кроме того, результаты определения температур продуктов сгорания приведены на рис. 2.

Таблица 1

**Значения температур теплоносителей
при различных расходах природного газа**

Параметр	Величина параметра						
Расход природного газа, м ³ /с	11,00	13,00	15,00	15,90	19,63	22,02	23,28
Температура воды на отопление, °С:							
на входе	50	53	58	58	57	61	62
на выходе	70	74	88	87	77	93	92
Температура продуктов сгорания, °С, на выходе из:							
котла	20	22	40	40	35	42	40
высокотемпературной части	177	227	252	279	302	332	336
топки	758	804	841	859	913	942	959



**Рис. 2. Значения температур продуктов сгорания
в контрольных точках котла:**

- 1 – на выходе из топki; 2 – на выходе из высокотемпературной части;
- 3 – на выходе из котла

Результаты расчетов, позволяющие оценить изменение значений количества теплоты, передаваемой в единицу времени продуктами сгорания нагреваемой воде в элементах высокотемпературной части котла, а также в высокотемпературной части в целом, при различных расходах природного газа, представлены на рис. 3.

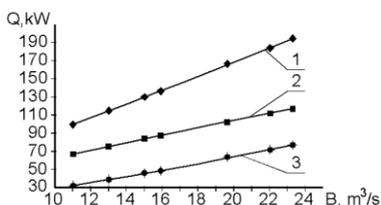


Рис. 3. Количество теплоты, передаваемой от продуктов сгорания нагреваемой воде:

1 – в жаровой трубе; 2 – в дымогарных трубах; 3 – всего в высокотемпературной части котла

Величины коэффициентов теплопередачи в жаровой трубе и в дымогарных трубах при различных значениях расхода природного газа, подаваемого в горелку котла, определенные в результате расчетов, произведенных по приведенной выше методике, представлены на рис. 4.

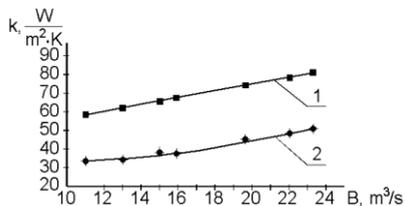


Рис. 4. Коэффициент теплопередачи:

1 – в жаровой трубе; 2 – в дымогарных трубах

Результаты измерений температуры нагреваемой воды на входе в высокотемпературную часть и на выходе из нее показывают, что рассматриваемый котел обеспечивает параметры теплоносителя, необходимые потребителю.

Температура продуктов сгорания на выходе из высокотемпературной части значительно выше температуры уходящих газов традиционных водогрейных котлов [9]. Это обуславливает более высокую разность температур теплоносителей в поверхностях нагрева. Следовательно, при одной и той же производительности поверхности теплообмена в рассматриваемом котле существенно меньше поверхностей нагрева традиционных котлов. Исходя из этого, металлоемкость предлагаемого котла по сравнению с аналогами существенно ниже.

При этом температура продуктов сгорания на выходе из конденсационного водогрейного котла, благодаря глубокому охлаждению газов в его контактно-рекуперативной части, а, следовательно, и потери теплоты с уходящими газами весьма невысоки.

При повышении нагрузки котла от 50 % номинальной до номинальной наблюдается снижение в общем балансе высокотемпературной части котла доли теплоты, отдаваемой газами в жаровой трубе, от 67,3 % до 60,3 % и соответствующий рост доли теплоты, отдаваемой продуктами сгорания в дымогарных трубах.

Значения коэффициентов теплопередачи в элементах высокотемпературной части конденсационного водогрейного котла сопоставимы с величинами этих коэффициентов в соответствующих поверхностях нагрева водогрейных котлов жаротрубно-дымогарного типа. При этом с увеличением нагрузки котла наблюдается более интенсивный рост коэффициента теплопередачи в дымогарных трубах по сравнению с коэффициентом теплопередачи в жаровой трубе.

Выводы по работе. Обработка результатов экспериментов показала, что значения показателей, характеризующих интенсивность теплопередачи в элементах высокотемпературной части конденсационного водогрейного котла находятся в тех же пределах, что и значения аналогичных показателей традиционных водогрейных котлов. Однако возможность поддержания более высоких температур газов на выходе из высокотемпературной части по сравнению с температурами уходящих газов традиционных котлов, позволяет значительно повысить ее компактность по сравнению с аналогами. Так как теплообмен в контактно-рекуперативной части котла протекает значительно интенсивнее, чем теплообмен в хвостовых поверхностях традиционных котлов, его габариты и металлоемкость существенно меньше аналогов.

Результаты испытаний показали соответствие параметров теплоносителей, вырабатываемых в конденсационном водогрейном котле, требованиям нормативов. Все вышеизложенное дает основания счи-

тать, что использование предлагаемого котла в качестве теплогенератора в автономных системах теплоснабжения весьма перспективно.

Библиографический список

1. Modelling decentralized heat supply: An application and methodological extension in TIMES / E. Merkel, D. Fehrenbach, R. McKenna, W. Fichtner // Energy. 2014. № 73. P. 592-605.

2. **Marchenko O., Solomin S.** Economic efficiency of renewable sources in autonomous energy systems in Russia // International Journal of Renewable Energy Research. 2014. № 4(3). P. 548-554.

3. **Лихтер Ю.М., Константинов В.А.** Автономное теплоснабжение зданий // Энергетик. 1995. № 4. С. 9-10.

4. **Бычихин С.А., Свиринов М.В., Трубаев П.А.** Оценка энергосберегающего эффекта при установке автоматизированных тепловых пунктов в образовательных учреждениях // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С.129-133.

5. 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 et al // Advances in Environmental Biology. 2014. № 8(13). P. 89-93.

6. 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.

7. **Губарев А.В., Лозовой Н.М.** Конструкция и варианты модернизации конденсационного водогрейного котла // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С.23-30.

8. Стенд и некоторые результаты испытаний топливосберегающего конденсационного водогрейного котла / В.П. Кожевников, М.И. Кулешов, А.В. Губарев и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 182-184.

9. Study on thermal efficiency of gas-fired vacuum hot water boiler with installing flue gas condensing waste-heat exchanger / Zh. Pan, J. Niu, Ch. Lu et al // 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Chengdu: IEEE, 2010. 11495956.

УДК 620.9

СОСТАВЛЕНИЕ ПРОГНОЗНОГО ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА КОТЕЛЬНОЙ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОСТИ ДАННЫХ*

Канд. техн. наук, доц. **Гужов С.В.**

Д-р техн. наук, доц. **Гашо Е.Г.**

Студент **Шепель В.А.**

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

***Аннотация.** Задачи составления прогнозного топливно-энергетического баланса для источников тепловой энергии в условиях недостаточности данных актуальны при решении вопросов о целесообразности выделения средств для их разности модернизации, проведения периодических наладочных работ, расчёте выбросов в атмосферу вредных веществ. Определение состояния каждого из элементов системы представляет длительную затратную задачу. В работе показан способ составления предиктивного энергопотребления посредством статистических методов обработки информации.*

***Ключевые слова:** модернизация, дымовые газы, система теплоснабжения, прогноз теплотребления, математическое моделирование, регрессионный анализ, мультиколлинеарность, прогнозирование расхода тепловой энергии.*

Реализация политики по модернизации старых котельных требует проведение предварительной оценки не только технического и экономического эффекта модернизации. Сложность подобного расчёта состоит в том, что существующие старые котельные часто работают в режимах, далёких от паспортных. Рассмотрим насколько сильно работа данных котельных на мазутном топливе оказывает влияние на текущую экологическую ситуацию а также эффект от перевода источника тепла на современные технологии. Дополнительная актуальность вопроса состоит в снижении экологической нагрузки. С дымовыми газами котельных в воздушный бассейн выбрасывается большое число твердых и газообразных загрязнителей, среди которых такие вредные вещества как зола, оксиды углерода, серы и азота. Помимо этого, в воздушный бассейн попадает огромное количество диоксида углерода

* Статья подготовлена по результатам проекта, выполненного при поддержке Российского научного фонда (уникальный идентификатор гранта РНФ № 16-19-20568).

и водяных паров. Прогнозирование с инженерной точностью технического и экологического эффектов от модернизации подобных теплоисточников – сложная задача, особенно в условиях существенной недостаточности и частичной недостоверности исходной информации.

Достоверный расчёт целесообразности модернизации позволит повысить качество теплоснабжения, надежность системы, снизить темпы роста тарифов на тепловую энергию, улучшить существующую экологическую ситуацию.

Цель работы состоит в расчёте с заданной точностью технико-экологического эффекта при модернизации существующей морально и физически изношенной системы теплоснабжения городского поселения.

1. Описание существующей системы теплоснабжения

Климат рассматриваемой территории относится к субарктическому району. Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, обеспеченностью 0,92, принимается минус 29°C, а температура воздуха обеспеченностью 0,94 – минус 17°C. Продолжительность отопительного периода в среднем составляет 263 дня. Среднегодовая температура воздуха составляет 0,5°C. Самый холодный месяц – февраль, со среднесуточной температурой минус 11,9°C. Нагрузка отопления и ГВС 2,011 Гкал/ч. Прокладка трубопроводов подземная и надземная. Расход т/мощности на собственные нужды 0,599 Гкал/ч. Потери тепловой мощности в сетях 1,593 Гкал/ч. За отопительный сезон 2018/19гг. нагрузке передано 22,956 тыс. Гкал. В качестве топлива используется мазут. Объём выбросов в атмосферу оценивается около 5,8 млн.т/г [1].

Протяженность тепловых сетей составляет 13,2 км (в двухтрубном исчислении). На данный момент в городском поселении эксплуатируется пять котельных общей мощностью 31,5 МВт. Утвержденные температурные графики работы источников и тепловых сетей составляют 95/70°C и 130/70°C. Однако математическое моделирование показало, что фактические температурные графики от котельных не соответствуют утвержденному температурному графику тепловой сети 95/70°C в виду ряда причин, к которым в том числе относятся: экономия топлива; опасность разрушения оборудования источника теплоснабжения и сетей в виду их существенной изношенности; ручное управление процессом выработки тепловой энергии.

Сложность поставленной задачи состоит в том, что:

1) невозможно использовать для прогноза формульные модели, т.к. на этапе технико-экономического обоснования составлена функциональная 3D модель тепловой сети [2];

2) доподлинно неизвестны степени износа каждого элемента основного и вспомогательного оборудования источника теплоснабжения, магистральных трубопроводов, ЦТП и сетей потребителей [3];

3) неизвестны характеристики ограждающих конструкций отапливаемых зданий и степень их износа, что не позволяет спрос при различных климатических явлениях с приемлемой инженерной точностью [4];

4) невозможно в полной мере опираться исключительно на отпуск тепла источником в виду увеличившихся затрат на собственные нужды, и потери, а также из-за погрешностей ручного управления котельной [5];

5) существуют сложности анализа работы теплоисточника по причине его эксплуатации на отличном от рекомендованного графика отпуска тепловой энергии [6] и пр.

Описанные выше факторы со всей наглядностью не позволяют применять для анализа формульные модели. Следовательно, необходимо принять систему рассматриваемой котельной как «чёрный ящик» и исследовать его статистическими методами анализа информации.

3. Прогнозирование расхода тепловой энергии

В качестве тестовой выборки для построения модели использованы данные о потреблении тепловой энергии за каждые 3 часа в период с 01.06.2018 по 31.05.2019. Составляемая регрессионная модель не предполагает описание летнего периода, когда котельные отпускают тепло в режиме ГВС. Подбор параметров и выбор наилучшей модели осуществлялись в среде EXCEL. Процесс прогнозирования фактического теплоснабжения включает в себя следующие этапы:

а) анализ исходной информации и отсева таких недостоверных данных, как единичные необъяснимые выбросы или провалы теплоснабжения; ошибки в размерностях; отсутствие показаний приборов учёта и мониторинга и пр.;

б) определение значений фактической и «идеализированной» выработки тепловой энергии для исследуемой системы теплоснабжения за выбранный период времени;

в) определение набора факторов, по мнению эксперта оказывающих влияние на значение теплоснабжения и отсева некоторых из них по критериям коллинеарности и мультиколлинеарности;

г) формулирование прогнозной математической функции или группы предиктивных правил;

д) определение значений всех входных факторов на прогнозируемом временном промежутке;

е) определение прогнозных значений теплотребления с учетом всех выбранных факторов и периодов.

В качестве факторных признаков принимаются: Наружная температура воздуха (X_1); Атмосферное давление на уровне станции (X_2); Относительная влажность на высоте 2 м, % (X_3); Направление ветра, в румбах (X_4); Скорость ветра, м/с (X_5); Общая облачность (X_6); Количество всех наблюдающихся облаков (X_7); Температура точки росы на высоте 2м (X_8); Количество выпавших осадков, мм (X_9). В качестве результативного признака принимается суммарный расход тепловой энергии.

Формульный расчёт «идеализированного» отпуска тепловой энергии производится по формуле [7]:

$$Q_{\text{ФОРМ}} = G_{\text{ПОД}} \cdot C_p \cdot (t_{\text{ПОД}} - t_{\text{ОБР}})$$

где $C_p=1,001$ ккал/кг·К, $G_{\text{ПОД}}$ – расход теплоносителя в подающем трубопроводе кг/ч; $t_{\text{ПОД}}$ и $t_{\text{ОБР}}$ – температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе.

Нахождение парных коэффициентов корреляции выполняется по t-критерию Стьюдента:

$$t_{\text{НАБЛ}} = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

где r – парный коэффициент корреляции, рассчитанный по отобраным для исследования данным, n – количество наблюдений.

Для нахождения $t_{\text{КРИТ}}$ по таблице Стьюдента принят уровень значимости $\alpha=5\%$ (доверительная вероятность 95). Для проверки на статистическую значимость сравним $t_{\text{КРИТ}} = -1,646$ и парные коэффициенты корреляции, вычисленные посредством EXCEL. Факторы X_6 , X_9 – статистически не значимы и исключаются из дальнейшего анализа

Проверка предположения мультиколлинеарности входных факторов по методу Фаррара-Глоубера по первому виду статистических критериев:

$$FG = - \left[n - 1 - \frac{2k+5}{6} \right] \ln(\det[R]) \quad (2)$$

где $n = 1976$ – количество наблюдений; $k = 9$ – количество факторов.

При $v = k/2(k-1) = 1$ степенях свободы и уровне значимости $\alpha=0,05$, число степеней свободы $d = 9(9-1)/2 = 36$. Табличное значение FG соответствует значению 50,998, расчётное – 6975. Поскольку расчётное значение больше табличного, то с принятой надёжностью мож-

но утверждать, что с вероятностью 95%. в массиве факторов существует мультиколлинеарность.

Выявим мультиколлинеарность входных факторов по второму виду статистических критериев (критерий Фишера):

$$F_k = (d_{kk} - 1) \frac{n-k}{k-1} \quad (3)$$

где d_{kk} – диагональные элементы матрицы; $n = 1976$ – количество наблюдений; $k = 9$ – количество факторов.

При $v_1 = n - k$ и $v_2 = k - 1$ степенях свободы и уровне значимости α : $d_1 = 1976 - 9 = 1967$; $d_2 = 9 - 1 = 8$; тогда $F_{ТАБЛ}$ соответствует величине 2,071.

Если $F_{РАСЧ} < F_{ТАБЛ}$, то оснований отклонять гипотезу об отсутствии мультиколлинеарности нет. На основании проведённого анализа выявлена большая взаимосвязь факторов X_1 , X_8 с последующим исключением из расчёта X_8 .

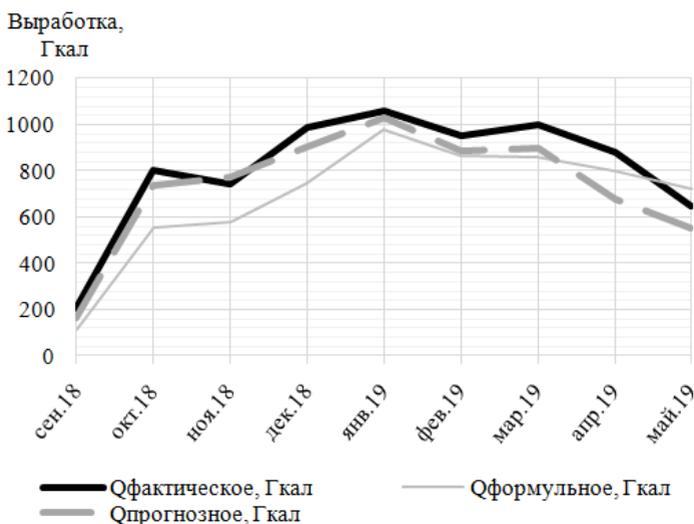


Рис. 3. Прогнозное значение потребления тепловой энергии нагрузкой котельной за отопительный период с ежемесячным периодом дискретизации

Проверка переменных на мультиколлинеарность по третьему виду статистических критериев (критерий Стьюдента) показала возрас-

тание остаточной дисперсии от 0,70 для $Q=F(X_1)$ до $R^2=0,762$ $Q=F(X_1; X_4; X_5; X_2; X_3; X_7)$. Для проверки правильности отборов факторов вернём в расчёт ранее отброшенные факторы X_6, X_8, X_9 . Поскольку значение коэффициента детерминации не изменится $R^2=0,762$, то предикторы отобраны корректно.

Проведя вычисление коэффициентов линейной регрессии определим вид функции:

$$Q = 3,11 - 0,0936 \cdot X_1 - 0,0010 \cdot X_4 + 0,0203 \cdot X_5 - \\ - 0,0010 \cdot X_2 + 0,0042 \cdot X_3 + 0,0038 \cdot X_7.$$

На основании полученной математической зависимости и вычисленного реального графика отпуска тепловой энергии получены данные об отпуске тепловой энергии за последующий отопительный период (рис. 1). Сделано предположение о соответствии климатических факторов в будущем и текущем календарных годах.

На протяжении всего отопительного периода прогнозный отпуск тепловой энергии ниже фактического. Исключением являются месяцы сентябрь и октябрь, когда теплоисточник намеренно отпускает больше тепла с целью прогрева зданий.

Выводы по работе

Общее снижение в прогнозе с доверительной вероятностью 95% и уровнем значимости 5% составило 529 Гкал, что составляет 13.3% и эквивалентно снижению выбросов на 0.77 млн.т./г. Данный эффект может быть достигнут исключительно за счёт оптимизации режимов работы теплоисточника.

В работе показан способ составления прогнозной функции теплотребления системой теплоснабжения в условиях существенного недостатка информации о структуре и состоянии сети. Выполнено обоснование набора значащих факторов. Произведено формулирование прогнозной математической функции теплотребления участком города.

Показано, что формульные модели, применимые при существующем уровне данных дают существенное отличие от фактических и не могут быть применены.

Представлены результаты процесса анализа влияния различных факторов на объем потребляемой тепловой энергии для объекта исследования. В ходе исследования выявлено уменьшение объемов потребления тепла по сравнению с предшествующим периодом за счет ряда параметрических факторов, что подтверждает необходимость как дополнительной настройки режимов, так и модернизации теплоисточни-

ка. Показанный математический аппарат позволяет определить степень влияния климатических факторов на общую величину теплопотребления. Необходимо отметить, что выявленная зависимость носит строго индивидуальный характер, присущий только анализируемой системе. Для другой аналогичной системы проверка на коллинеарность и, как следствие, общий вид функции $Q=f(X_i)$ могут отличаться от полученного в статье.

Результаты расчета модели также могут быть использованы для расчета ожидаемого полезного отпуска в последующих периодах, экономической оценки дальнейшей модернизации изношенной системы теплоснабжения, формулирования тарифной политики, оценки эффективности вложений бюджетных или заёмных средств и т.д.

Библиографический список

1. **Филиппов Е.А., Аленов Д.М.** Перспективы и проблемы перевода угольных котельных в России на твердое топливо // Иностраный язык в контексте проблем профессиональной коммуникации: матер. II Межд. научн. конф. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. С. 20-21.

2. **Акулова Я.Н.** Система показателей оценки энергоэффективности как фактора экономического роста региональной экономики // Вестник ОГУ. 2014. № 4. С.33-38.

3. **Гашо Е.Г., Гужов С.В., Кролин А.А.** О прогнозировании трендов изменения удельных смешанных нагрузок электропотребителей микрорайонов и городов в условиях недостаточности данных // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С. 87-94.

4. **Максимюк Е.В., Микшина В.С.** Математическое моделирование для поддержки принятия решений в области обеспечения энергетической эффективности // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 8. С. 54-63.

5. **Папушкин В.Н., Григорьев А.С., Поляnceв С.О.** Прогнозирование спроса на тепловую мощность в схемах теплоснабжения // Новости Тепло-снабжения. 2014. № 8. С. 3-16.

6. **Выборнов Д.В., Кляус Б.В., Плужник А.В.** Анализ потенциала энергосбережения в зданиях промышленного назначения // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С. 141-149.

7. **Данилов О.Л., Гаряев А.Б., Яковлев И.В.** Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М: Изд-во МЭИ, 2010. 424 с.

УДК 66.074.2

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ДУГООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЕПАРАТОРА НА СТРУКТУРУ ГАЗОВОГО ПОТОКА*

Аспирант **Зинуров В.Э.**

Студент **Петрова Т.С.**

*Казанский государственный энергетический
университет, г. Казань*

***Аннотация.** В работе представлена модель сепаратора для очистки запыленного газового потока от мелкодисперсных частиц. Очистка запыленного потока от мелкодисперсных частиц в сепараторе осуществляется за счет действия центробежных сил на газовый поток. По мере забивки дугообразных элементов мелкодисперсной пылью происходит уменьшение гидравлического сопротивления сепаратора, что является положительным фактором, способствующим снижению энергетических затрат на предприятии. Уменьшение гидравлического сопротивления обусловлено исключением обратных течений газового потока в сепараторе.*

***Ключевые слова:** сепаратор, циклон, мелкодисперсные частицы, пыль, очистка газа.*

Увеличение мощности электростанций приводит к росту выбросов вредных веществ воздушный бассейн. Особенно значима данная проблема для угольных электростанций, на которых используемые аппараты по очистке дымовых газов от пылевидных частиц золы многие десятилетия практически не модернизируются и не заменяются. Наиболее распространенным и дешевым способом очистки газа от пылевидных частиц является применение циклонов, главным минусом которых является улавливание частиц только грубой фракции и большое гидравлическое сопротивление. Небольшими энергетическими и эксплуатационными затратами характеризуются электрофильтры, хотя являются чувствительными к технологическим параметрам очищаемого газа и требуют большие капитальные вложения. Из рассмотренных аппаратов наибольшая популярность у циклонов ввиду их низкой стоимости и долговечности. Одной из основных проблем циклонных ап-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-4522.2018.8

паратов является низкая эффективность очистки газовых потоков от частиц пыли размером менее 10 мкм. Поэтому разработка новых устройств, позволяющих улавливать мелкодисперсные частицы размером менее 10 мкм, является актуальной задачей для энергетической отрасли [1-6].

Авторами статьи была разработана модель сепаратора, позволяющая производить очистку газовых потоков от пылевидных частиц размером менее 10 мкм (рис. 1). Данное устройство предлагается устанавливать в качестве второй ступени очистки после циклонов. Таким образом, сперва газовый поток будет эффективно очищаться от пылевидных частиц размером более 10 мкм циклоном, после чего будет осуществляться очистка газового потока от частиц менее 10 мкм сепаратором. Ранее проведенные исследования показали, что эффективность очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц размером не более 10 мкм сепаратором составляет выше 50 %, эффективность очистки газа от частиц размером более 10 мкм составляет не менее 99 % [7].

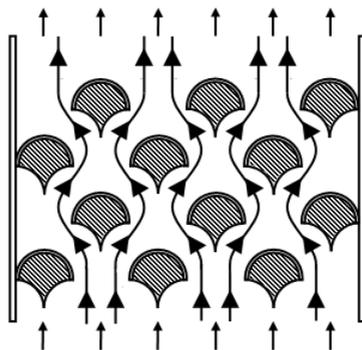


Рис. 1. Движения газового потока в сепараторе (вид сверху). Дугообразные элементы максимально забиты пылью

Модель сепаратора представляет из себя несколько рядов дугообразных элементов, которые заключены в корпус. Очистка газового потока от частиц пыли осуществляется за счет действия центробежных сил на поток, возникающих в ходе огибания газом дугообразные элементы.

Целью данной работы является исследование влияния загрязненности дугообразных элементов сепаратора на структуру газового потока.

Данное исследование проводилось путем численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent.

На рис. 1 представлена двухмерная модель сепаратора с забитыми пылью дугообразными элементами. Численное моделирование показало, что возникает множество обратных течений внутри сепаратора в том случае, когда дугообразные элементы минимально забиты пылью. Это объясняется тем, что запыленный поток, входящий в внутреннюю часть дугообразных элементов, движется, в большинстве случаев, по внутренней стенке дуги и вылетая из дугообразных элементов навстречу новому потоку газа создает ему дополнительное препятствие для движения.

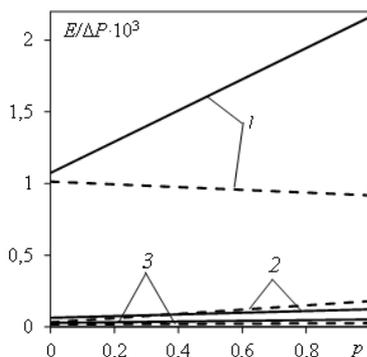


Рис. 2. Зависимость комплекса $E/\Delta P$ от степени забивки дугообразных элементов p мелкодисперсной пылью при различных значениях входной скорости газового потока W , м/с: 1 – 3; 2 – 11; 3 – 15. Линии – $b = 13$ мм; штрих – пунктирные линии – $b = 26$ мм

По мере забивки дугообразных элементов пылью форма элементов приобретает конусообразную (рис. 1).

На рис. 2 представлена зависимость энергетической эффективности сепаратора от степени забивки p дугообразных элементов. При $p = 0$ элементы являются чистыми, при $p = 1$ элементы полностью забиты пылью (рис. 1). Чем больше значение комплекса $E/\Delta P$, тем эффективнее с энергетической точки зрения сепаратор. Следует

отметить, что с данной точки зрения сепаратор наиболее эффективен при нулевой степени забивки дугообразных элементов. Хотя, значения комплексов $E/\Delta P$ при $b = 13$ и 26 мм при скорости 3 м/с намного больше, чем при скоростях 11 и 15 м/с необходимо понимать, что организация скорости газового потока 3 м/с очень затруднительна, так как это существенно замедлит очистительный производственный процесс.

Таким образом, увеличение входной скорости газового потока уменьшает энергетическую эффективность сепаратора, в большей степени это вызвано увеличением потери давления в сепараторе.

Выводы: по мере забивки дугообразных элементов мелкодисперсной пылью происходит уменьшение гидравлического сопротивления сепаратора, что является положительным фактором, способствующим снижению энергетических затрат на предприятии. Уменьшение гидравлического сопротивления обусловлено исключением обратных течений газового потока в сепараторе. Основными параметрами, влияющими на энергетическую эффективность сепаратора, являются степень забивки дугообразных элементов, входная скорость газового потока и эффективность очистки газового потока.

Библиографический список

1. **Ядутов В.В., Петров Т.И., Зацаринная Ю.Н.** Воздействие ТЭС на окружающую среду // Вестник технологического университета. 2013. Т. 16, № 19. С. 78-79.
2. **Орлов С.М., Романенко Б.Р.** Повышение энергоэффективности циклонов // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород: БГТУ, 2018. С. 178–185.
3. **Мингалеева Г.Р., Зацаринная Ю.Н., Вачагина Е.К.** Анализ работы системы подготовки топлива пылеугольной ТЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2005. № 1-2. С. 22-31.
4. **Панев С.Н., Платонов П.С., Ткаченко В.М.** Электрофильтры для очистки газов от золы с высоким удельным электрическим сопротивлением // Энергетик. 2016. № 1. С. 21-24.
5. **Петров В.А., Инюшкин Н.В., Ермаков С.А.** Об осаждении частиц пыли в электроциклоне // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Т. 16, № 1. С. 44-53.
6. **Высоцкий С.П., Мазур Е.А.** Перспективные технологии снижения эмиссии загрязнителей на тепловых электростанциях // Вестник автомобильно-дорожного института. 2018. № 1(24). С. 21-27.
7. Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами / А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Нгуен Ву Линь // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20, № 15. С. 78-80.

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ
ПАРОВАЗОВОЙ ТЭС С ДВУХКОНТУРНЫМ
КОТЛОМ-УТИЛИЗАТОРОМ**

Д-р техн. наук, проф. **Кудинов А.А.**

Канд. техн. наук, доц. **Зиганшина С.К.**

Канд. техн. наук **Хусанов К.Р.**

Аспирант **Демина Ю.Э.**

*Самарский государственный
технический университет, г. Самара*

***Аннотация.** Для повышения экономичности парогазовой ТЭС предложено в двухконтурном котле-утилизаторе осуществлять промежуточный перегрев потока водяного пара, отработавшего в цилиндре высокого давления паровой турбины. Разработаны математический алгоритм и методика котла-утилизатора. Выполнены расчеты для парогазового блока ПГУ-450. Показано, что при установке промежуточного пароперегревателя в котле-утилизаторе его КПД возрастает на 2,15 %. При этом повышаются КПД ПГУ по выработке электроэнергии на 3,36%, степень сухости отработавшего в турбине водяного пара на 0,082. Соответственно, удельный расход условного топлива по выработке электрической энергии снижается на 6,1%.*

***Ключевые слова:** газотурбинная установка, котел-утилизатор, парогазовая установка, водяной пар, промежуточный пароперегреватель, коэффициент полезного действия, условное топливо, экономия.*

Тепловая экономичность парогазовой установки зависит в основном от степени совершенства входящих в ее состав газотурбинной установки, паровой турбины и котла-утилизатора [1]. Значительные резервы в повышении экономичности утилизационной ПГУ заложены в совершенствовании паросилового цикла, который, как известно, обеспечивает примерно 1/3 мощности ПГУ. На КПД ПГУ-У существенное влияние оказывает КПД котла-утилизатора, который зависит не только от температуры уходящих газов на выходе из его конвективной шахты, но и от температуры окружающего воздуха [2]. Одним из путей повышения КПД котла-утилизатора и экономичности парогазовой установки утилизационного типа является увеличение количества

конвективных поверхностей нагрева КУ с целью снижения температуры уходящих газов ГТУ.

Целью работы является разработка технологий повышения эффективности и надежности работы парогазовой ТЭС с двухконтурным котлом-утилизатором за счет применения промежуточного перегрева водяного пара, отработавшего в цилиндре высокого давления конденсационной паровой турбины.

Разработка технологии. Для повышения экономичности и надежности работы парогазового блока ПГУ-450 предлагается в двухконтурном котле-утилизаторе дополнительно разместить ступень промежуточного пароперегревателя для вторичного перегрева водяного пара, частично отработавшего в цилиндре высокого давления паровой турбины (рис. 1).

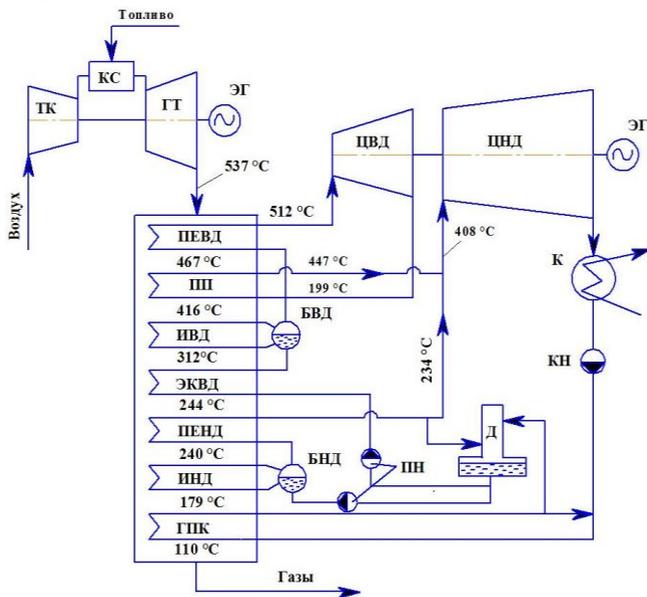


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ПГУ-У с промежуточным перегревом водяного пара в котле-утилизаторе

В состав рассматриваемого блока установки ПГУ-450 входят [3]: газотурбинная установка Siemens V94.2, номинальной мощностью 155 МВт, котел-утилизатор П-90 двух давлений с принудительной циркуляцией рабочего тела в испарительных контурах высокого и низкого

давлений и конденсационная паротурбинная установка КТ-150-8. Расчетная электрическая мощность ПГУ-450 в номинальном режиме при работе без промежуточного перегрева водяного пара составляет 460,44 МВт, а ее КПД – 51,76 %.

Выполнен расчет тепловой схемы ПГУ-450 и определены экономические показатели ее работы [4]. Расчеты выполнены для двух вариантов: 1) при работе ПГУ без промежуточного перегрева водяного пара; 2) при работе ПГУ с промежуточным перегревом водяного пара. За основу принята методика, изложенная в [5]. Результаты расчетов представлены на рис. 2, 3.

Из уравнений теплового баланса для поверхностей нагрева котла-утилизатора рассчитывались энтальпии газов после пароперегревателей (ПЕВД, ПП, ПЕНД), испарителей (ИВД, ИНД), экономайзера (ЭКВД) и газового подогревателя конденсата (ГПК) [6].

Энтальпии газов:

после пароперегревателей высокого и низкого давлений

$$h''_{\text{певд}} = h'_{\text{ку}} - D_0^{\text{ВД}} (h_0^{\text{ВД}} - h''_{\text{s(ВД)}}) / G_{\Gamma}; \quad (1)$$

$$h''_{\text{пенд}} = h''_{\text{эквд}} - D_0^{\text{НД}} (h_0^{\text{НД}} - h''_{\text{s(НД)}}) / G_{\Gamma}; \quad (2)$$

после промежуточного пароперегревателя

$$h''_{\text{ух.пп}} = h''_{\text{певд}} - D_0^{\text{ВД}} (h''_{\text{пп}} - h'_{\text{пп}}) / G_{\Gamma}; \quad (3)$$

после водяного экономайзера высокого давления

$$h''_{\text{эквд}} = h''_{\text{инд}} - D_0^{\text{ВД}} (h_1 - h''_{\text{д}}) / G_{\Gamma}; \quad (4)$$

на выходе из газового подогревателя конденсата

$$h''_{\text{ку}} = h''_{\text{инд}} - G_{\text{ГПК}} (h''_{\text{к}} - h'_{\text{к}}) / G_{\Gamma}, \quad (5)$$

где $h''_{\text{певд}}$, $h''_{\text{пенд}}$, $h''_{\text{ух.пп}}$, $h''_{\text{эквд}}$, $h''_{\text{ку}}$, $h'_{\text{ку}}$ – энтальпии газов соответственно после пароперегревателей высокого и низкого давления, промежуточного пароперегревателя, экономайзера высокого давления, газового подогревателя конденсата, энтальпии газов на входе в котел-утилизатор; $h_0^{\text{ВД}}$, $h_0^{\text{НД}}$ – энтальпия перегретого водяного пара высокого и низкого давления; $h''_{\text{s(ВД)}}$, $h''_{\text{s(НД)}}$ – энтальпия водяного пара при температуре насыщения в барабане высокого и низкого давления; $h'_{\text{пп}}$, $h''_{\text{пп}}$ –

энтальпия перегретого водяного пара на входе в промежуточный пароперегреватель и на выходе из него; G_r – массовый расход газов, поступающих в котел-утилизатор; h_1 – энтальпия питательной воды, поступающей в барабан высокого давления; $h_d^{вд}$ – энтальпия питательной воды, поступающей в ЭКВД; h'_k, h''_k – энтальпия воды на входе в ГПК и на выходе из него; $h''_{ивд}, h''_{инд}$ – энтальпия газов после испарителей высокого и низкого давления; $D_0^{вд}$ и $D_0^{нд}$ – расходы пара высокого и низкого давления; $G_{гпк} = D_0^{вд} + D_0^{нд} - D_d + G_p$ – расход воды через газовый подогреватель конденсата; D_d и G_p – расходы пара на деаэратор и воды на рециркуляцию.

Из уравнений теплового баланса для каждого испарителя рассчитывались расходы пара высокого и низкого давлений:

$$D_0^{вд} = \frac{G_r (h''_{yx.пп} - h''_{ивд})}{h''_{s(вд)} - h_1}; \quad (6)$$

$$D_0^{нд} = \frac{G_r (h''_{пенд} - h''_{инд})}{h''_{s(нд)} - h_d^{нд}}. \quad (7)$$

Здесь $h_d^{нд}$ – энтальпия питательной воды контура низкого давления.

Расход пара на деаэратор:

$$D_d = (D_0^{вд} + D_0^{нд}) (h_d - h''_k) / (h_0^{нд} - h''_k), \quad (8)$$

где h_d – энтальпия воды после деаэратора.

Расход конденсата на рециркуляцию для повышения температуры воды перед ГПК:

$$G_p = (D_0^{вд} + D_0^{нд} - D_d) (h'_k - h_{кн}) / (h''_k - h'_k), \quad (9)$$

Здесь $h_{кн}$ – энтальпия конденсата после конденсатного насоса.

Массовый расход уходящих газов ГТУ $G_r = 506,15$ кг/с, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 3,33$ рассчитывались по формулам, приведенным в [7]. По энтальпии газов на выходе из газового подогревателя конденсата определяется температура газов на выходе из котла-утилизатора $t''_{ку}$.

КПД котла-утилизатора определяется отношением разности эн-

тальпий газов на входе в КУ и на выходе из его конвективной шахты ($h'_{\text{ку}} - h''_{\text{ку}}$) к разности энтальпий ($h'_{\text{ку}} - h_{\text{нв}}$) газов на входе в КУ и энтальпии отводимых в окружающую среду газов, охлажденных в атмосфере до температуры наружного воздуха:

$$\eta_{\text{ку}} = (h'_{\text{ку}} - h''_{\text{ку}}) / (h'_{\text{ку}} - h_{\text{нв}}). \quad (10)$$

Для нахождения температуры газов после испарителей высокого и низкого давления были приняты значения температурных напоров в пинч-точках ИВД и ИНД $-\delta t_s^{\text{ВД}} = 8^\circ\text{C}$, $\delta t_s^{\text{НД}} = 7^\circ\text{C}$ [8]. Температура газов после каждого испарителя определялась по температуре насыщения в барабане и принято температурному напору:

$$\theta_s^{\text{ВД}} = t_s^{\text{ВД}} + \delta t_s^{\text{ВД}}; \theta_s^{\text{НД}} = t_s^{\text{НД}} + \delta t_s^{\text{НД}}. \quad (11)$$

На рис. 2 процесс перегрева водяного пара в промежуточном пароперегревателе, установленном после пароперегревателя высокого давления показан пунктирной линией.

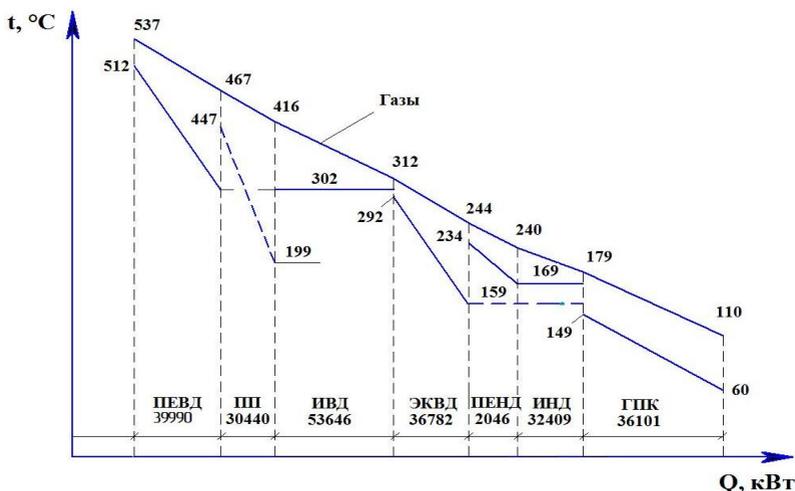


Рис. 2. Тепловая диаграмма котла-утилизатора П-90 с расположением промежуточного пароперегревателя после пароперегревателя высокого давления

На рис. 3 представлен процесс расширения водяного пара в паровой турбине при однократном промежуточном перегреве водяного пара в котле-утилизаторе с расположением промежуточного пароперегревателя после пароперегревателя высокого давления по ходу движения уходящих продуктов сгорания [9].

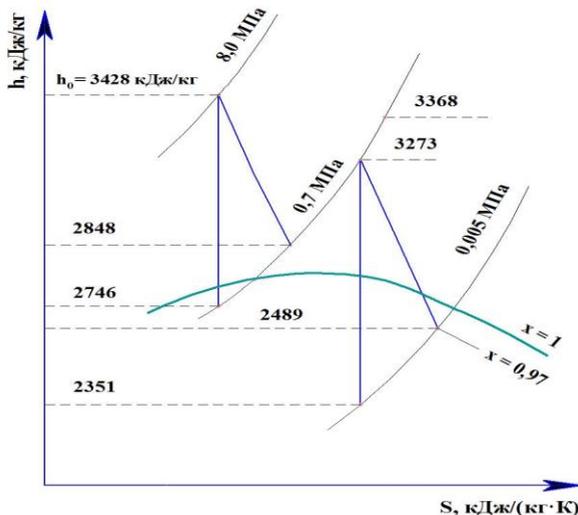


Рис. 3. Процесс расширения водяного пара для турбины КТ-150-8 при однократном промежуточном перегреве пара в котле-утилизаторе

Энтальпия пара в камере смешения при осуществлении промежуточного перегрева водяного пара в зоне высоких температур котла-утилизатора определялась по формуле:

$$h_{см} = \left[D_0^{вд} h_{пп}'' + (D_0^{нд} - D_d) h_0^{нд} \right] / (D_0^{вд} + D_0^{нд} - D_d) \quad (12)$$

Результаты. Выполнены расчеты для технических условий работы ПГУ-450 при следующих исходных данных: $p_0=8,0$ МПа; $p_k=5$ кПа; $p_d=0,6$ МПа; $N_э=155,3$ МВт; давление пара контура низкого давления – 0,7 МПа; электрический КПД ГТУ – 0,344; температура газов на входе в котел-утилизатор – 537 °С. Анализ результатов расчетов показывает что, при размещении промежуточного пароперегревателя в котле-утилизаторе после пароперегревателя высокого давления существенно повышается эффективность работы парогазового блока.

Выводы по работе. Выполнен расчет тепловой схемы ПГУ-450 для двух вариантов работы: без осуществления промежуточного перегрева водяного пара и с осуществлением промежуточного перегрева водяного пара, отработавшего в цилиндре высокого давления паровой турбины [10]. При осуществлении промежуточного перегрева водяного пара в котле-утилизаторе возрастают основные показатели ПГУ: электрическая мощность с 460,44 до 489,4 МВт (на 28,96 МВт), КПД по выработке электроэнергии с 51,76 до 55,12 % (на 3,36%) и степень сухости отработавшего в турбине водяного пара с 0,877 до 0,959 (на 0,082). Соответственно, удельный расход условного топлива по выработке электрической энергии снижается с 237,64 до 223,15 г/кВт·ч (на 6,1%). При этом экономия условного топлива для ПГУ-450 при ее наработке 4500 часов в год и стоимости условного топлива 3700 руб./т.у.т. в денежном выражении составляет 118,72 млн. руб./год.

Библиографический список

1. **Трухний А.Д.** Парогазовые установки электростанций: Учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 648 с.
2. Анализ направлений развития отечественной теплоэнергетики / А.В. Мошкарин, М.А. Девочкин, Б.Л. Шельгин, В.С. Рабенко. Иваново: ИГЭУ, 2002. 256 с.
3. Тепловые электрические станции: учебник для вузов / В.Д. Буров, Е.В. Дорохов, Д.П. Елизаров и др. М.: МЭИ, 2005. 454 с.
4. **Кудинов А.А.** Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: Учеб. пособие для вузов. М.: ИНФРА-М, 2012. 325 с.
5. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Парогазовые установки тепловых электрических станций: Учеб. пособие для вузов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. 220 с.
6. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 584 с.
7. **Трухний А.Д., Романюк А.А.** Расчет тепловых схем утилизационных парогазовых установок: Учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2016. 320 с.
8. **Зысин Л.В.** Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции: Учеб. пособие. СПб.: Изд.-во Политехн. ун-та, 2010. 368 с.
9. **Александров А.А.** Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. М.: МЭИ, 2006. 258 с.
10. Разработка и технико-экономический анализ тепловых схем отопительных газотурбинных электростанций / В.О. Киндра, Н.Д. Рогалев, Е.М. Лисин, В.П. Худякова // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 3. С. 6-20.

УТОЧНЕНИЕ ДИФFUЗИОННОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОСЛАБЛЯЮЩЕЙ СРЕДЕ*

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.** Метод диффузионного приближения отличается простотой алгоритма, применяемого для численного решения дифференциального уравнения радиационного теплопереноса, но не учитывает анизотропности излучения. В докладе дан анализ причин его недостаточной точности, показано, что граничные условия создают источник непредсказуемых погрешностей. Приведено уточненное дифференциальное уравнение переноса излучения в ослабляющей среде запыленных газов, представлен алгоритм его численного решения*

***Ключевые слова:** радиационный теплоперенос, ослабляющая среда, диффузионная модель, численное моделирование.*

Введение. Эффективность тепловых процессов может быть повышена с помощью их моделирования [1, 2]. При численном исследовании переноса излучения в запыленных газах учитывается, что газы испускают и поглощают селективно, в то время как твердые частицы образуют серую изотропно рассеивающую среду. Это позволяет записать для интегральной интенсивности излучения I_l дифференциальное уравнение радиационного теплопереноса по направлению луча:

$$\frac{\partial I_l}{\partial l} = \alpha_n I_o - kI_l + \beta \bar{I}, \quad (1)$$

где I_o – интенсивность равновесного излучения, интегральная по спектру, Вт/(м²·ср); α_n – средний планковский коэффициент поглощения среды, характеризующий совместную излучательную способность газов и пылевых частиц, м⁻¹; k – коэффициент ослабления, м⁻¹,

$$k = \alpha + \beta;$$

α – локальный коэффициент поглощения запыленных газов, м⁻¹; β – коэффициент изотропного рассеяния, м⁻¹; l – расстояние по длине луча,

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

м; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²К⁴); \bar{I} – средняя по телесному углу интегральная интенсивность излучения, Вт/(м²·ср),

$$\bar{I} \equiv \frac{1}{4\pi} \int_{(4\pi)} I_l d\omega = \frac{\sigma}{\pi} T_{\text{л}}^4 ;$$

$T_{\text{л}}$ – лучистая температура, К,

$$T_{\text{л}}^4 \equiv \frac{1}{4\sigma} \int_{(4\pi)} I_l d\omega ; \quad (2)$$

ω – телесный угол, ср, определяемый посредством полярного угла θ и азимутального угла ψ :

$$d\omega = \sin\theta d\theta d\psi .$$

Интегрирование уравнения (1) по телесному углу приводит к дифференциальному уравнению сохранения лучистой энергии:

$$\operatorname{div} \mathbf{q}_{\text{л}} = 4\sigma (\alpha_{\text{п}} T^4 - \alpha T_{\text{л}}^4), \quad (3)$$

где $\mathbf{q}_{\text{л}}$ – вектор результирующего потока излучения, Вт/м²; T – термодинамическая температура, К.

В настоящее время значительное внимание уделяется поиску эффективных алгоритмов решения уравнений переноса излучения [3]. Проблема заключается в том, что в большинстве математических моделей плотность результирующего потока излучения $q_{\text{л}}$ находят, интегрируя по сферическому телесному углу проекции интенсивности излучения для многих направлений лучей и расстояний по их длине:

$$q_{\text{л}} = \int_{(4\pi)} I_l \cos\theta d\omega = \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi} I_l \cos\theta \sin\theta d\theta . \quad (4)$$

Такого рода алгоритмы применяются в методах дискретного переноса [4] и дискретных ординат [5], конечных объемов [6] и конечных элементов [7]. Все они отличаются избыточной сложностью и завышенным временем численного решения задачи.

Особое место занимает метод сферических гармоник [8], старшие приближения которого позволяют учитывать пространственную анизотропию излучения путем численного решения последовательности дифференциальных уравнений. Сравнение различных численных мо-

делей теплообмена в высокотемпературном пламени [9] показало, что приближение Р-3 метода сферических гармоник дает результаты высокой точности при меньшей затрате компьютерного времени. Кратчайшее время счета имеет приближение Р-1 метода сферических гармоник. Однако, оно не учитывает анизотропию излучения, что приводит к повышенной погрешности расчетных результатов.

Приближение Р-1 практически полностью совпадает с методом диффузионного приближения, который подробно рассмотрен в [10]. К преимуществам диффузионного метода можно отнести его хорошую совместимость с алгоритмами численного решения задач турбулентного движения газов и конвективного переноса теплоты. Представляется целесообразным рассмотреть возможность устранения недостатков, присущих диффузионному приближению, и адаптировать его к переносу анизотропного излучения в ослабляющей среде.

Цель работы. Усовершенствование численного метода решения задач радиационного теплопереноса в среде запыленных газов.

Перенос излучения в неограниченной ослабляющей среде. Явно выраженным источником анизотропной интенсивности излучения является поверхность стен, ограждающих область запыленных газов. Чтобы временно исключить его из рассмотрения, введем понятие неограниченной среды, которая имеет те же радиационные свойства и температуру, что и запыленные селективные газы, находящиеся в ограниченном пространстве. Гипотетическое отсутствие ограждающих стен упрощает обоснование уравнений радиационного теплопереноса, так как температурная кривая в неограниченной среде в этом случае может быть представлена непрерывными гладкими функциями, не имеющими особенностей в точках, которые совпадают с поверхностью ограждающих стен.

Выражение для интенсивности излучения в неограниченной среде следует из уравнения (1):

$$I_l = \frac{1}{k} \left(\alpha_n I_o + \beta \bar{I} - \frac{\partial I_l}{\partial l} \right).$$

Эта математическая форма может быть многократно продифференцирована по длине луча при постоянном коэффициенте ослабления. Старшие производные в правой части каждого из полученных равенств заменяются выражениями из последующих равенств. В итоге интенсивность излучения будет представлена разложением в ряд:

$$I_l = \frac{1}{k} \left[(\alpha_n I_o + \beta \bar{I}) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\partial^n (\alpha_n I_o + \beta \bar{I})}{k^n \partial l^n} \right]. \quad (5)$$

При выводе уравнений ограничимся одномерными пространственными преобразованиями, что не исключает возможности записи расчетных формул в трехмерных координатах. Примем, что координаты l по длине каждого луча и y по направлению вектора потока излучения связаны между собой следующим соотношением:

$$dl = dy / \cos \theta.$$

Ряд (5) сходится при определенных условиях и, следовательно, допускает математические преобразования. Например, его интегрирование по телесному углу в соответствии с формулами (2) и (4) дает разложения в ряд лучистой температуры и плотности результирующего потока излучения в неограниченной среде:

$$T_{л}^4 = \frac{1}{k} \left[(\alpha_n T^4 + \beta T_{л}^4) + \frac{\pi}{\sigma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\partial^{2n} (\alpha_n I_o + \beta \bar{I})}{(2n+1) k^{2n} \partial l^{2n}} \right], \quad (6)$$

$$q_{л}^{\infty} = -\frac{4\sigma}{k} \left[\frac{\partial (\alpha_n T^4 + \beta T_{л}^4)}{3k \partial y} + \frac{\pi}{\sigma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\partial^{2n+1} (\alpha_n I_o + \beta \bar{I})}{(2n+3) k^{2n+1} \partial l^{2n+1}} \right]. \quad (7)$$

Здесь в первом слагаемом правой части каждого из уравнений интенсивность равновесного излучения I_o заменена на термодинамическую температуру в четвертой степени в соответствии с законом Стефана–Больцмана, а интенсивность излучения \bar{I} , средняя по телесному углу, – на лучистую температуру в четвертой степени.

Представим ряд (6) в виде следующего равенства:

$$\alpha_n T^4 + \beta T_{л}^4 = k T_{л}^4 - \frac{\pi}{\sigma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\partial^{2n} (\alpha_n I_o + \beta \bar{I})}{(2n+1) k^{2n} \partial l^{2n}}.$$

Введя его правую часть под знаки первой производной в разложении (7), получим уточненное выражение для плотности результирующего потока излучения в неограниченной поглощающей среде:

$$q_{л}^{\infty} = -\frac{4\sigma}{k} \left[\frac{\partial (\alpha_n T^4 + \beta T_{л}^4)}{3k \partial y} - \frac{\pi}{\sigma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4n}{3(2n+1)(2n+3)} \frac{\partial^{2n+1} (\alpha_n I_o + \beta \bar{I})}{k^{2n+1} \partial l^{2n+1}} \right]$$

Заменим здесь приближенно слагаемые со старшими производными разностью первых производных от лучистой и термодинамической температуры, помноженных на соответствующие коэффициенты, применив для этого восьмой интегральный момент от интенсивности излучения, представленный в виде ряда:

$$\frac{4\sigma}{9} \frac{\partial T_{\text{л}}^4}{k\partial y} \approx \frac{\partial}{k\partial y} \int_{(4\pi)} I_l \cos^8 \theta d\omega =$$

$$= 4 \frac{\sigma}{k} \left[\frac{\partial(\alpha_{\text{п}} T^4 + \beta T_{\text{л}}^4)}{9k\partial y} + \frac{\pi}{\sigma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\partial^{2n+1}(\alpha_{\text{п}} I_0 + \beta \bar{I})}{(2n+9)k^{2n+1} \partial l^{2n+1}} \right].$$

В результате получим дифференциальное выражение для плотности потока результирующего излучения, учитывающее анизотропность излучения в неограниченной ослабляющей среде:

$$q_{\text{л}}^{\infty} \approx -\frac{4\sigma}{3k} \frac{\partial T_{\text{л}}^4}{\partial y} - \frac{4\sigma}{9k} \left(\frac{\alpha}{k} \frac{\partial T_{\text{л}}^4}{\partial y} - \frac{\alpha_{\text{п}}}{k} \frac{\partial T^4}{\partial y} \right).$$

Чтобы упростить запись уравнений, введем понятие определяющей температуры T_{Σ} , которая учитывает суммарное влияние лучистой и термодинамической температуры на перенос лучистой энергии:

$$T_{\Sigma}^4 \equiv T_{\text{л}}^4 + \frac{1}{3k} (\alpha T_{\text{л}}^4 - \alpha_{\text{п}} T^4). \quad (8)$$

Это понятие позволяет представить дифференциальное выражение для вектора результирующего потока излучения в неограниченной ослабляющей среде в виде градиентной формулы:

$$\mathbf{q}_{\text{л}}^{\infty} = -\frac{4\sigma}{3k} \text{grad } T_{\Sigma}^4. \quad (9)$$

Поскольку определяющая температура становится расчетной функцией, введем ее вместо лучистой температуры в уравнение сохранения (3), примененное к неограниченной ослабляющей среде:

$$\text{div} \mathbf{q}_{\text{л}}^{\infty} = \frac{4\sigma}{1 + \alpha/(3k)} (\alpha_{\text{п}} T^4 - \alpha T_{\Sigma}^4). \quad (10)$$

Заменяя в этом равенстве вектор результирующего потока излучения градиентным выражением (9), получим уточненное дифференциальное уравнение переноса излучения в неограниченной ослабляющей, записанное здесь в декартовых координатах x, y, z :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T_{\Sigma}^4}{k \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T_{\Sigma}^4}{k \partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T_{\Sigma}^4}{k \partial z} \right) + \frac{9}{3 + \alpha/k} (\alpha_{\text{п}} T^4 - \alpha T_{\Sigma}^4) = 0. \quad (11)$$

Оно отличается от дифференциального уравнения радиационного переноса метода диффузионного приближения как видом искомой функции, так и числовым коэффициентом в последнем слагаемом.

За пределами расчетной области температура неограниченной среды жестко не лимитирована. Поэтому имеет смысл принять физически достоверное допущение, что в точках, лежащих на поверхности ограждающих стен температурная кривая имеет точку перегиба, в которой все производные четного порядка равны нулю. Тогда граничное условие к дифференциальному уравнению (11) последует из равенств (6) и (8):

$$\alpha T_{\Sigma, \text{ст}}^4 = \alpha_{\text{п}} T_{\text{ст}}^4, \quad (12)$$

где $T_{\text{ст}}$ – температура внутренней поверхности стен, К; $T_{\Sigma, \text{ст}}$ – определяющая температура неограниченной среды в точках, лежащих на поверхности стен, К.

Перенос излучения в ослабляющей среде, ограниченной стенами. Разность между эффективным потоком излучения, исходящим от ограждающих стен, и гипотетическим потоком излучения неограниченной ослабляющей среды, приходящим извне, образует источник дополнительного излучения, сосредоточенный на границах расчетной области. В ослабляющей среде промышленных установок дополнительное излучение, как правило, поглощается и рассеивается средой вблизи стен, оказывая наибольшее влияние на величину результирующего потока излучения непосредственно на поверхности стен.

Отдельный расчет переноса дополнительного излучения не только усложнял бы вычислительный алгоритм, но и вносил бы новые погрешности в компьютерное моделирование. Более целесообразно определить условия, позволяющие применить уравнения (8) – (11) к переносу суммарного излучения, испускаемого ослабляющей средой и стенами. Если определяющую температуру в ограниченном простран-

стве обозначить T_s , то в этом случае расчетные уравнения переноса излучения в ограниченной ослабляющей среде примут вид:

$$T_s^4 \equiv T_l^4 + \frac{1}{3k} (\alpha T_l^4 - \alpha_n T^4), \quad (13)$$

$$\mathbf{q}_l \approx -\frac{4\sigma}{3k} \text{grad } T_s^4, \quad (14)$$

$$\text{div} \mathbf{q}_l = \frac{4\sigma}{1 + \alpha/(3k)} (\alpha_n T^4 - \alpha T_s^4), \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T_s^4}{k \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T_s^4}{k \partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T_s^4}{k \partial z} \right) + \frac{9}{3 + \alpha/k} (\alpha_n T^4 - \alpha T_s^4) = 0. \quad (16)$$

Несмотря на формальную идентичность, выражение (13) в общем случае отличается от своего аналога (8) значениями лучистой температуры T_l . Решение дифференциальных уравнений переноса (11) и (16) также приводит к разным результатам вследствие различий в граничных условиях.

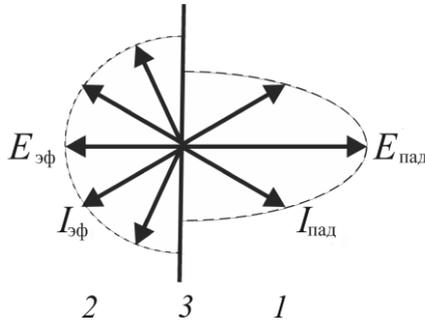


Рис. 1. Схема потоков излучения на поверхности стен:
 1 – падающего; 2 – эффективного; 3 – поверхность стены

Потоки излучения на поверхности стен, связанные с постановкой граничных условий, представлены на рис. 1. Принято, что эффективное излучение стен является диффузным, то есть имеющим одинаковую интенсивность излучения по всем направлениям в пределах полу-сферического телесного угла.

Когда ослабляющая среда в ограниченном пространстве имеет достаточно большую оптическую толщину, дополнительное излучение, исходящее от противоположных стен полностью поглощается в ее объеме. Следовательно, можно принять, что, на стены падает такой же поток излучения, как и рассчитанный для гипотетической неограниченной среды. Этот поток излучения может быть определен интегрированием по полусферическому телесному углу ряда (5), умноженного на $\cos \theta$. Поскольку четные температурные производные на границе приняты равными нулю, поверхностная плотность падающего потока излучения будет следующей:

$$E_{\text{пад}} = \frac{\alpha_{\text{п}}}{\alpha} \sigma T_{\text{ст}}^4 - 2 \frac{\pi}{k} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{\partial^{2n+1} (\alpha_{\text{п}} I_0 + \beta \bar{I})}{(2n+3) k^{2n+1} \partial l^{2n+1}} \right]_{\text{ст}},$$

где индекс "ст" обозначает температуру или одностороннюю производную от интенсивности излучения, взятую на поверхности стен.

Отсюда, с учетом ряда (7), получаем выражение для плотности падающего потока излучения на стенах, ограждающих ослабляющую среду:

$$E_{\text{пад}} \approx \frac{\alpha_{\text{п}}}{\alpha} \sigma T_{\text{ст}}^4 + \frac{1}{2} q_{\text{л.ст}}^{\infty}. \quad (17)$$

Плотность эффективного потока излучения, испускаемого и отражаемого стенами, определяется известной формулой:

$$E_{\text{эф}} = \frac{\alpha_{\text{п}}}{\alpha} \sigma T_{\text{ст}}^4 + \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} - 1 \right) q_{\text{л.ст}}, \quad (18)$$

где $\varepsilon_{\text{ст}}$ – поглощательная способность поверхности стен; $q_{\text{л.ст}}$ – плотность результирующего потока излучения на поверхности стен, Вт/м².

Соотношение коэффициентов поглощения, введенное в формулу, соответствует энергетической доле полос поглощения в радиационном спектре.

Разность падающего (17) и эффективного (18) потоков излучения приводит к формуле, связывающей плотности результирующего потока излучения на поверхности стен в ограниченной ослабляющей среде и в тех же точках гипотетической неограниченной среды:

$$q_{\text{л.ст}} = q_{\text{л.ст}}^{\infty} \varepsilon_{\text{ст}} / 2. \quad (19)$$

Граничные условия. В методе диффузионного приближения постановку граничных условий на поверхности стен к дифференциальному уравнению радиационного теплопереноса выполняют приближенно, как правило, полагая падающее излучение диффузным. Естественно, что такое допущение приводит к непредсказуемым ошибкам в результатах численного моделирования.

В уточненной диффузионной модели из соотношения (19), учитывая градиентные формулы (9) и (14), непосредственно следуют граничные условия второго рода к дифференциальному уравнению (16):

$$\left(\partial T_s^4 / \partial y\right)_{ct} = \frac{\varepsilon_{ct}}{2} \left(\partial T_\Sigma^4 / \partial y\right)_{ct}. \quad (20)$$

Граничные условия третьего рода при диффузном излучении стен могут быть выведены из баланса потоков излучения, если принять во внимание равенства (12) и (17) – (19):

$$\sigma T_{s.ct}^4 \approx \sigma T_{\Sigma.ct}^4 + \frac{3k + \alpha}{12k} (1,75 - \varepsilon_{ct}) q_{л.ст}^\infty. \quad (21)$$

Таким образом, чтобы корректно поставить граничные условия к дифференциальному уравнению переноса излучения (16), необходимо предварительно найти решение дифференциального уравнения (11) при граничных условиях (12).

Выводы по работе. Предложена и теоретически обоснована уточненная диффузионная модель радиационного теплопереноса в ослабляющей среде, образованной селективно поглощающими газами и частицами пыли, изотропно рассеивающими излучение. Чтобы устранить недостатки, свойственные методу диффузионного приближения, реальная ослабляющая среда временно заменена гипотетической неограниченной средой. Разложение в ряд позволило выполнить в ней интегрирование интенсивности излучения по телесному углу и устранить основные источники погрешностей приближенного метода. В итоге получены уточненные дифференциальные уравнения диффузионной математической модели радиационного теплопереноса в реальной ослабляющей среде и сформулированы корректные граничные условия на поверхности ограждающих стен при диффузном отражении падающего на них излучения.

Уточненная диффузионная модель обладает простым алгоритмом, минимальными требованиями к компьютерным ресурсам и малым временем ее численной реализации.

Библиографический список

1. Моделирование энергоэффективных стекловаренных печей / П. Яндачек, М. Ковач, В.И. Онищук и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 169-175.

2. **Шапгала В.В.** Математическая модель управления радиационным фонов производственных помещений предприятий стройиндустрии // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 160-164.

3. **Huang Zh., Cheng Q., Lou Ch.** A direct solution for radiative intensity with high directional resolution in isotropically scattering media // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2018. Vol.117. P. 296-302

4. **Feldheim V., Lybaert P.** Solution of radiative heat transfer problems with the discrete transfer method applied to triangular meshes // J. Comp. Appl. Math. 2004. Vol. 168. P. 179-190.

5. **Ozen G., Selçuk N.** Performance of DOM and IDA with different angular discretization methods in 3-D absorbing–emitting–scattering media // Int. J. Therm. Sci. 2013. Vol. 65. P. 104-110.

6. **Raithby G.D., Chui E.H.** A finite-volume method for predicting a radiant heat transfer in enclosures with participating media, J. Heat Transfer. 1990. Vol. 112. P. 415-423.

7. Finite element method for radiative heat transfer in absorbing and anisotropic scattering media / W. An, L.M. Ruan, H. Qi, L.H. Liu // J. Quant. Spectr. Rad. Transfer. 2005. Vol. 96 (4). P. 409-422

8. **Ou Szu-C. S., Liou Kuo.-N.** Generalization of the spherical harmonic method to radiative transfer in multi-dimensional space, J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer. 1982. Vol. 28 (4). P. 271-288.

9. Comparison of accuracy and computational expense of radiation models in simulation of non-premixed turbulent jet flames / G. Pal, A. Gupta, M.F. Modest, D.C. Haworth // Combustion and Flame. 2015. Vol. 162. № 6. P. 2487-2485.

10. **Четверушкин Б.Н.** Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. М.: Наука, 1985. 304 с.

УДК 66.021.3/4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАКЛОННО-ГОФРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БЛОКА ОРОСИТЕЛЯ ГРАДИРНИ*

Канд. техн. наук, доц. **Мадышев И.Н.**

Аспирант **Хафизова А.И.**

*Казанский национальный исследовательский
технологический университет, г. Казань*

***Аннотация.** В работе представлена оригинальная методика охлаждения оборотной воды в градирнях, которая позволяет заметно сократить использование химических реагентов, не уступая по эффективности аналогам. Разработана и создана экспериментальная установка, на которой проводились гидравлические и теплообменные исследования наклонно-гофрированного элемента блока оросителя. В ходе эксперимента были определены температурные режимы, в которых работает данный блок насадки и его гидравлическое сопротивление.*

***Ключевые слова:** теплообмен, гидравлическое сопротивление, безреагентная градирня, ороситель, насадка.*

Широкое применение при охлаждении жидкости на промышленных энергетических предприятиях в градирнях находят насадочные оросители. Существуют огромное множество насадочных элементов, наиболее известные из них: кольца Рашига, кольца Палля, «Инжехим», НУ-ПАК, CASCADE-RINGS и др. Насадочные блоки оросителя отличаются высокой эффективностью охлаждения, невысоким гидравлическим сопротивлением, высокоразвитой поверхностью контакта фаз в газожидкостной системе. Однако существенной проблемой на сегодняшний день при использовании насадочных и других видов оросителей является быстрое развитие микроорганизмов в жидкой среде и появление биологических обрастаний, что существенно влияет на эффективность работы устройства, приводит к коррозии элементов. На большинстве предприятий для решения данной проблемы используют химические реагенты, закупка которых дорогостояща [1-6].

Для того, чтобы решить поставленные задачи необходимо разработать такую схему работы градирни, при которой количество реаген-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-417.2019.8

тов сводится к минимуму, а эффективность охлаждения жидкости находится на высоком уровне.

Целью проводимых экспериментальных исследований является определение гидравлического сопротивления блока оросителя градирни, состоящего из наклонно-гофрированных контактных элементов.

Авторами статьи представлена оригинальная методика охлаждения оборотной воды, представленная схематично на рис. 1. В градирне организована трехпоточная система движения воды и атмосферного воздуха [7].

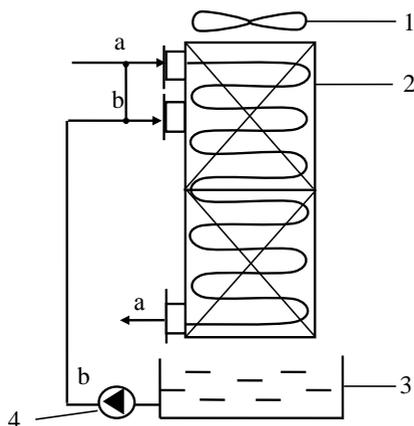


Рис. 1. Принципиальная схема безреагентной градирни с наклонно-гофрированными контактными элементами: 1 – вентилятор; 2 – блок оросителя; 3 – водосборный бассейн; 4 – водяной насос; а – основной поток горячей воды; б – орошаемый поток воды

Принцип действия данной градирни следующий: горячая вода, поступающая после оборудования, в полости аппарата разделяется на два потока так, что главный поток (а) горячей воды попадает в трубчатый радиатор, не взаимодействуя с атмосферным воздухом. Другой поток воды (б) контактирует с потоком атмосферного воздуха и охлаждается путем частичного испарения. Второй поток жидкости выступает в качестве хладагента для основного потока, охлаждая его, омывая стенки труб. Так как поток воды (а) не контактирует с воздухом, различные примеси не имеют возможности попасть в него, следовательно, развитие микроорганизмов в среде практически невозможно. Поток воды (б) представляет собой смесь 5-6% горячей жидкости, по-

даваемой от оборудования и воды, находящейся в водосборном бассейне, которая циркулирует через ороситель с помощью водяного насоса. Благодаря испарению воды, в бассейне поддерживается один уровень жидкости.

Таким образом, одним из основных элементов данной градирни является ороситель. Именно в нем происходит охлаждение потока жидкости, которая в свою очередь отбирает тепло от основного потока воды. В связи с этим была разработана экспериментальная установка для исследования тепломассообменных процессов, протекающих на поверхности наклонно-гофрированных элементов. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

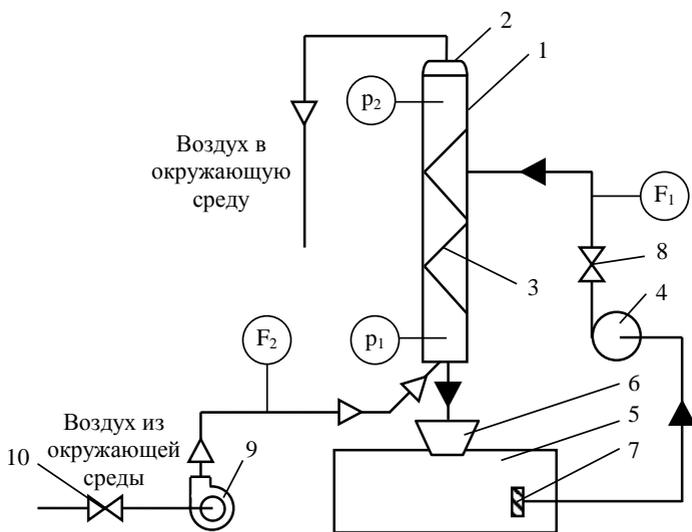


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

- 1 – тепломассообменный аппарат; 2 – крышка; 3 – наклонно-гофрированные контактные элементы; 4 – насос; 5 – емкость; 6 – воронка; 7 – жидкостной фильтр; 8 – запорная арматура на линии подачи воды; 9 – вентилятор; 10 – запорная арматура на линии подачи воздуха

Эксперименты проводились на системе воздух – вода. Вода с помощью распределительного устройства подавалась сверху в центральную часть первой контактной ступени. Фиктивная скорость потока воздуха (на полное сечение устройства) варьировалась в диапазоне

1,4–2,55 м/с; плотность орошения 12–37 м³/м²·ч. Расход жидкости измерялся ротаметром, скорость воздуха измерялась термоанемометром testo 405i, имеющий относительную погрешность не более 5%. Перепад давлений, на высоте равной двум контактным ступеням, измерялся с помощью дифференциального манометра testo 510i с абсолютной погрешностью не более 5 Па.

Исследуемая насадка состоит из двух контактных ступеней, общей высотой 340 мм. Контактная ступень представляет собой два наклонных элемента, расположенных под углом 90°. Пластины представляют собой ленточно-поточные контактные элементы с горизонтальными гофрами округлого профиля радиусом 7,5 мм. На боковых поверхностях и в верхней части гофр просверлены круглые отверстия диаметром 5 мм. Размеры исследуемого аппарата в поперечном сечении составляют 100х100 мм.

Поток жидкости двигался по углублениям пластин сверху вниз по Z-образной траектории. Часть жидкости проваливалась вниз, вдоль поверхности стенки блока насадки, другая часть попадала на ниже расположенную пластину. Воздух проходил через отверстия пластин, выталкивая в разные стороны капли воды, тем самым распыляя жидкость по всему объему насадки. Вышерасположенная наклонная пластина в данной конструкции выполняла роль сепарирующего устройства, снижая процент уноса капель жидкости из рабочей области насадки. Конструктивное оформление насадки выполнено таким образом, что распределение жидкости в рабочем объеме происходит самостоятельно, максимально заполняя всю поверхность пластины с образованием пленочного течения, которое разрушается под воздействием струй и капель жидкости из отверстий в верхних частях пластины.

Исследования по определению гидравлического сопротивления наклонно-гофрированных контактных элементов показывают, что режим подвисяния, который характеризуется резким увеличением гидравлического сопротивления, наступает при фиктивной скорости газа от 1,7 до 2,3 м/с в зависимости от плотности орошения (рис. 3). При этом, чем выше плотность орошения, тем этот режим наступает при меньших скоростях воздуха.

В этом режиме работы гидравлическое сопротивление на 1 м высоты слоя насадки не превышает 1 кПа. При дальнейшем увеличении скорости газа наблюдается увеличение задержки жидкости в аппарате, и, как следствие, мгновенный рост гидравлического сопротивления, который заканчивается наступлением уноса капель жидкости из насадки.

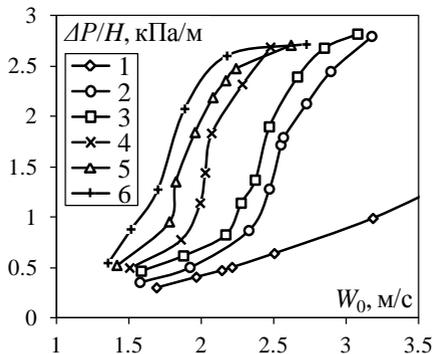


Рис. 3. Изменение гидравлического сопротивления наклонно-гофрированных контактных элементов в зависимости от фиктивной скорости воздуха:

плотности орошения q , $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$: 1 – 0; 2 – 12; 3 – 18; 4 – 24; 5 – 31; 6 – 37

Так же проводилось сравнение гидравлического сопротивления струйно-плёночного контактного устройства [8] с наклонно-гофрированным контактным элементом (рис. 4).

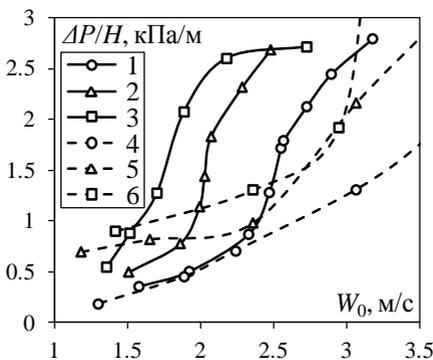


Рис. 4. Сравнительный анализ по гидравлическому сопротивлению:

сплошная линия – наклонно-гофрированные контактные элементы;

штриховая линия – струйно-плёночные устройства;

плотности орошения q , $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$: 1, 4 – 12; 2, 5 – 24; 3, 6 – 37

Как видно из графика, гидравлическое сопротивление наклонно-гофрированных элементов выше, чем у струйно-плёночных. Несмотря

на это, гидравлическое сопротивление у наклонно-гофрированных контактных элементов можно снизить, увеличив свободное сечение для прохода газа. Таким образом, рекомендуется увеличить диаметр отверстий и их количество.

Выводы: исследования показывают высокую эффективность разработанных насадок, обладающую невысоким гидравлическим сопротивлением, малым процентом уноса жидкости из аппарата. Кроме того, применение разработанной трехпоточной схемы охлаждения оборотной воды позволит значительно сократить объемы используемых химических реагентов для сдерживания развития бактериальных отложений.

Библиографический список

1. **Фарахов Т.М., Башаров М.М., Шигапов И.М.** Гидравлические характеристики новых высокоэффективных нерегулярных теплообменных насадок // Нефтегазовое дело. 2011. № 2. С. 192-207.

2. **Замалеев М.М., Шарпов В.И.** О мероприятиях по предотвращению биологического загрязнения сетевой воды // Новости теплоснабжения. 2015. № 4. С. 43-47.

3. **Лаптев А.Г.** Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов. Казань: Отечество, 2013. 454 с.

4. Методы снижения бактериального загрязнения систем оборотного охлаждения ТЭЦ / Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров, С.М. Власов, А.Ю. Власова // Теплоэнергетика. 2015. № 7. С. 62-67.

5. Performance assessment of oxidants as a biocide for biofouling control in industrial seawater cooling towers / M. Al-Bloushi, J. Saththasivam, S. Al-Sayegh et al // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2018. V. 59. P. 127-133.

6. Насадки массообменных колонн / Б.А. Сокол, А.К. Чернышев, Д.А. Баранов и др. М.: Инфохим, 2009. 358 с.

7. Разработка конструкции блока оросителя безреагентной испарительной градирни / И.Н. Мадышев, А.В. Дмитриев, А.И. Хафизова, О.С. Дмитриева // Актуальные проблемы в машиностроении. 2019. Т. 6, № 1-4. С. 162-167.

8. **Dmitrieva O.S., Madyshev I.N., Dmitriev A.V.** Determination of the Heat and Mass Transfer Efficiency at the Contact Stage of a Jet-Film Facility // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. V. 90. № 3. P. 651-656.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ УСЛОВИЙ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ВВЭР*

Д-р техн. наук, доц. **Морозов А.В.**

Мл. науч. сотр. **Сахипгареев А.Р.**

Мл. науч. сотр. **Шлепкин А.С.**

Мл. науч. сотр. **Сошкина А.С.**

*Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, г. Обнинск*

***Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований физико-химических свойств водных растворов борной кислоты. Описаны методика и установка для проведения исследований. Представлены результаты экспериментальных измерений показателя рН водных растворов борной кислоты в широком диапазоне концентраций и получены аппроксимирующие зависимости.*

***Ключевые слова:** ВВЭР, аварийный режим, борная кислота, свойства.*

Необходимость исследования процессов массопереноса высококонцентрированных растворов борной кислоты возникла при анализе работы пассивных систем залива активной зоны АЭС с реакторной установки проекта ВВЭР-ТОИ. В аварийной ситуации с разрывом главного циркуляционного трубопровода пассивные системы безопасности обеспечивают длительное (до 72 часов) охлаждение активной зоны реактора за счет подачи в нее раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг из гидроёмкостей первой, второй (ГЕ-2) и третьей (ГЕ-3) ступеней, а также поступления конденсата из парогенераторов, работающих в конденсационном режиме [1]. Учитывая длительность процесса, кипение теплоносителя и малое содержание борной кислоты в паровой фазе, возможна её кристаллизация в реакторе. Предельная концентрация раствора борной кислоты, соответствующая началу осаждения, зависит от температуры. При параметрах, соответствующих аварийному процессу с разрывом главного циркуляционного трубопровода, предельная концентрация H_3BO_3 в активной зоне составляет ~ 450 г/кг H_2O .

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10649)

При проведении авторами данной работы исследований процессов накопления и кристаллизации борной кислоты в активной зоне реактора ВВЭР в случае аварии, было установлено, что превышение максимальной концентрации борной кислоты начинается после 45 часов аварийного процесса [2]. При этом необходимо отметить, что в рамках этих исследований делалось допущение, что единственной формой существования борной кислоты является ортоборная кислота. Однако, в неорганической химии [3-5] известной считается тенденция образования полиборных кислот при увеличении концентрации ортоборной кислоты (H_3BO_3).

На данный момент данные о влиянии концентрации борной кислоты на pH раствора весьма ограничены, что связано с отсутствием результатов экспериментальных исследований высококонцентрированных растворов H_3BO_3 . Борная кислота в данной форме обладает очень слабыми кислотными свойствами и не выступает как донор протонов, соответственно ее коррозионная активность крайне мала. В то же время, в работе [6], приводится информация о том, что при повышении концентрации ортоборной кислоты кислотность среды возрастает и происходит образование полимерных частиц, структура которых описана выше. Кроме того, при возрастании степени кислотности увеличивается коррозионная активность раствора. При штатных режимах эксплуатации реакторов ВВЭР кислотность среды, обусловленная наличием в первом контуре реактора раствора ортоборной кислоты с концентрацией 4 – 8 г/л, компенсируется введением в систему гидроксида калия. При возникновении аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода, весь объем теплоносителя, находящийся в реакторе на момент начала аварии, выносится в защитную оболочку. Таким образом, в дальнейшем в активной зоне реактора находится только раствор борной кислоты с постепенно повышающейся концентрацией без каких-либо подщелачивающих реагентов. Как было отмечено выше, в настоящее время проводимые исследования свойств полиборных кислот при оценке их влияния на водно-химический режим на АЭС с реакторами ВВЭР носят теоретический характер [6].

Таким образом, для повышения точности расчетов процессов накопления и кристаллизации борной кислоты и учета их влияния на эффективность отвода тепла от активной зоны в аварийной ситуации необходимо знание физико-химических свойств H_3BO_3 . Существующие данные о степени кислотности (pH) растворов борной кислоты охватывают ограниченный диапазон параметров (температура, давление, концентрация кислоты), не характерный для аварийной ситуации

на АЭС с ВВЭР [7, 8]. В связи с этим возникла необходимость проведения дополнительных опытов.

Экспериментальное оборудование и методика проведения опытов

В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» были проведены экспериментальные исследования различных свойств растворов борной кислоты при параметрах, характерных для первого контура реакторной установки ВВЭР к концу первых суток после начала аварии. На данном этапе исследований проводились опыты по определению степени кислотности водных растворов борной кислоты в зависимости от концентрации (5 – 100 г/кг H_2O) и температуры (25 – 50 °С). Для измерений применялся рН-метр МАРК-901 – универсальный прибор, предназначенный для измерения активности ионов водорода (рН). Погрешность измерения активности ионов водорода прибором составляет $\pm 0,1$ рН.

Эксперименты проводились по следующей методике. Перед началом измерений рН-метр проходил процедуру калибровки в специальном буферном растворе с рН равным 7,0. Далее измерялась степень кислотности дистиллированной воды и растворов борной кислоты с разной концентрацией при температурах 25, 40 и 50 °С с помощью рН-метра и электронного термометра (рис. 1).

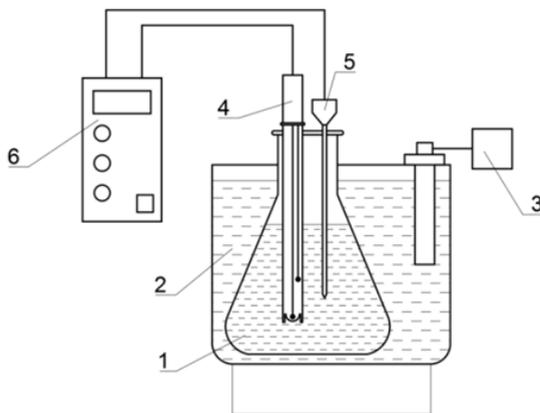


Рис. 1. Схема установки для измерения рН водных растворов ортоборной кислоты:

1 – исследуемая среда, 2 – сосуд с водой, 3 – термостат, 4 – электрод стеклянный комбинированный, 5 – датчик температуры, 6 – преобразователь измерительный

В течение 10 минут осуществляется выдержка, после которой записываются показания с обоих приборов. Затем колба с исследуемой жидкостью извлекается из термостата. На её место помещается следующий сосуд и измерения повторяются по описанной методике.

Ортоборная кислоты, взвешивалась на лабораторных весах Adventurer Pro AV412C (максимальная масса – $m_{\max} = 410 \pm 0.01$ г). Полное растворение кристаллов H_3BO_3 в колбе достигалось с помощью магнитного перешивающего устройства MSH-300.

Результаты экспериментальных исследований

Результаты измерения плотности водных растворов борной кислоты с концентрацией 2,5 – 400 г/кг H_2O при температуре 25 – 130 °C описываются зависимостью [1]:

$$\rho_{sol} = A + B \cdot C_{H_3BO_3}, \quad (1)$$

коэффициенты которой имеют следующий вид:

$$A = 1141 - 0,48 \cdot (T + 273,15); \quad (2)$$

$$B = 39217 \cdot (T + 273,15)^{-0,843}, \quad (3)$$

где T – температура раствора, °C; $C_{H_3BO_3}$ – концентрация борной кислоты в растворе, г/г H_2O , ρ_{sol} – плотность раствора борной кислоты, кг/м³. Максимальное рассогласование расчетных и экспериментальных данных составляет 2%.

В соответствии с разработанной методикой, эксперименты по определению pH водных растворов борной кислоты проводились сериями по четыре пробы на каждую её концентрацию.

Результаты экспериментов по исследованию физико-химических свойств борной кислоты представлены на рис. 2 и 3. Полученные экспериментальные точки можно обобщить следующей зависимостью:

$$pH_{p-ра}(T, C_{H_3BO_3}) = pH_{дист}(T) - (12,72 \cdot C_{H_3BO_3}^{0,59} + 0,49 \cdot 10^{-2} \cdot T), \quad (4)$$

где степень кислотности дистиллированной воды равна:

$$pH_{дист}(T) = 6,46 - 1,36 \cdot 10^{-2} \cdot T, \quad (5)$$

Отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующих кривых не превышает 10%.

После проведенных опытов, было проведено сравнение полученные данных по кислотности водных растворов борной кислоты с имеющимися в литературе. Проведенный анализ показал, что в справоч-

никах по химии приводится только фиксированное значение $pH = 5,2$ при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и концентрации кислоты $0,1$ моль/л (или $1,81$ г/кг H_2O). Помимо этого, в [9] представлено выражение для расчета pH слабых кислот, к которым относится H_3BO_3 :

$$pH = \frac{1}{2} \cdot pK_a - \frac{1}{2} \cdot \lg(C_{M_{sol}}), \quad (6)$$

где $C_{M_{sol}}$ – молярная концентрация раствора, определяемая из выражения:

$$C_{M_{sol}} = \frac{C_{\text{H}_3\text{BO}_3} \cdot \rho_{sol}}{M_{sol} \cdot (1000 + C_{\text{H}_3\text{BO}_3})} \quad (7)$$

где ρ_{sol} – плотность раствора борной кислоты, г/л; M_{sol} – молярная масса смеси, г/моль.

Также для расчета показателя pH по формуле (6) необходимо подставить значение константы кислотности pK_a . Анализ литературных данных показал, что сведения о данной величине носят весьма ограниченный характер. Например, в справочных таблицах [10] приводится значение $pK_a = 9,24$ только при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. В работе [8] представлена формула для расчета константы кислотности H_3BO_3 , однако в ней не учитывается влияние концентрации бора.

Таким образом, возникла необходимость получения зависимости для расчета константы кислотности борной кислоты. Она была получена из выражений (6) и (7) с использованием эмпирических зависимостей (1) и (4) для расчета плотности раствора и показателя pH , соответственно. Данная формула имеет следующий вид:

$$pK_a = 2 \cdot \left(pH_{\text{дист}}(T) - (12,72 \cdot C_{\text{H}_3\text{BO}_3}^{0,59} + 0,49 \cdot 10^{-2} \cdot T) \right) + \lg(C_{M_{sol}}), \quad (8)$$

где $pH_{\text{дист}}(T)$ – степень кислотности дистиллированной воды.

На рис. 3 представлено сравнение экспериментальных и рассчитанных по формуле (6) значений pH ортоборной кислоты с учетом значений константы кислотности. Как видно из рис. 3, разница между значениями, полученными расчетным и экспериментальным путями, не превышает 10%.

Зависимости (4) и (8) для расчета физико-химических свойств борной кислоты применимы в следующем диапазоне параметров:

- температура борной кислоты $T = 25 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- концентрация H_3BO_3 в воде – $C_{\text{H}_3\text{BO}_3} = 0 - 100$ г/кг H_2O .

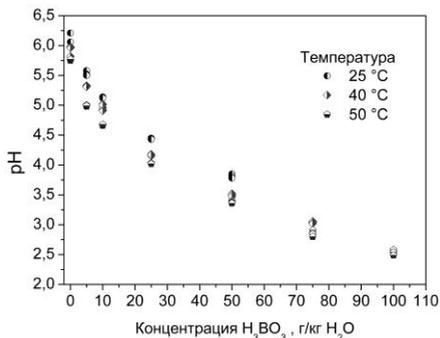


Рис. 2. Изменение кислотности НЗВОЗ в диапазоне концентрации борной кислоты 0 – 100 г/кг H_2O при различных температурах раствора.

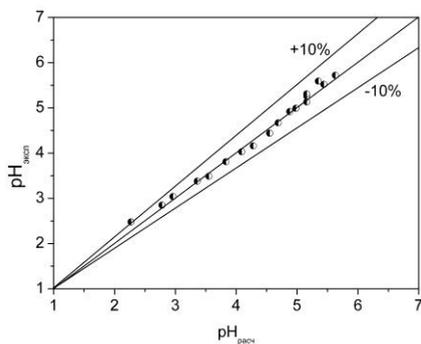


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные значения показателя pH водных растворов борной кислоты.

Закключение

В результате проведенных в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» исследований были получены опытные данные по физико-химическим свойствам высококонцентрированных растворов ортоборной кислоты при параметрах, характерных для аварийных режимов АЭС с ВВЭР. Полученные результаты позволяют существенно расширить диапазон известных параметров растворов H_3BO_3 .

Экспериментальные данные имеют важное прикладное значение для АЭС с реакторными установками ВВЭР нового поколения, оснащенными системами пассивной безопасности. Они могут быть использованы:

- при оценке влияния борной кислоты на параметры водно-химического режима первого контура АЭС с реакторами ВВЭР, как в штатном режиме эксплуатации, так и в случае аварии;
- для уточнения результатов расчетов аварийных процессов теплоотвода в реакторной установке, проводимых как с использованием одномерных расчетных программ, так и трёхмерных CFD-кодов.

Библиографический список

1. Экспериментальные теплофизические исследования в обоснование работоспособности пассивных систем безопасности ВВЭР нового поколения / А.В. Морозов, А.П. Сорокин, Д.С. Калякин и др. // Атомная энергия. 2019. Т. 127, Вып. 1. С. 13-17.
2. Влияние процессов массопереноса борной кислоты на ее накопление в активной зоне при аварийных режимах АЭС с ВВЭР / А.В. Морозов, А.П. Сорокин, С.В. Рагулин и др. // Теплоэнергетика. 2017. № 7. С. 33–38.
3. **Бейтс Р.** Определение рН. Теория и практика. Изд. 2-е, испр. Л.: Изд. «Химия», 1972. 400 с.
4. **Карапетьянц М.Х., Дракин С.И.** Общая и неорганическая химия. М.: Химия, 1981. 630 с.
5. **Коттон Ф., Уилкинсон Дж.** Современная неорганическая химия. М.: Мир, 1969. Ч.1. 226 с.; Ч.2. 496 с.; Ч.3. 594 с.
6. Поведение борной кислоты в 1-ом контуре ВВЭР и ее влияние на массоперенос в активной зоне [Электронный ресурс] / А.В. Гаврилов, В.Г. Крицкий, Ю.А. Родионов, И.Г. Березина // Труды Восьмой международной науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск: ОКБ «Гидропресс». 2013. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/article88-ru.htm>.
7. **Азизов Н.Д., Ахундов Т.С.** Термические свойства водных растворов борной кислоты при 298 – 573 К // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34, вып. 5. С. 798-802.
8. Effect of sodium chloride on the apparent ionization constant of boric acid and the pH values of borate solutions / G. G. Manov, N. J. DeLollis, P. W. Lindvall, S. F. Acree // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1946. Vol. 36. P. 543-558.
9. **Глинка Н.Л.** Общая химия. 24-е изд. Л.: Химия, 1985. 702 с.
10. **Симанова С.А.** Новый справочник химика и технолога. Химическое равновесие. Свойства растворов. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. 998 с.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОПАРОВОЙ ТЭЦ С ПАРОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ КОМПРЕССОРА

Д-р техн. наук, проф. **Тян В.К.**¹

Канд. техн. наук, доц. **Шелудько Л.П.**¹

Канд. техн. наук, доц. **Гулина С.А.**¹

Д-р техн. наук, проф. **Бирюк В.В.**²

Канд. техн. наук, доц. **Горюнова И.Ю.**³

¹Самарский государственный технический университет г. Самара

²Самарский университет г. Самара

³Уральский федеральный университет

Аннотация. Рассмотрен новый тип маневренной газопаровой ТЭЦ (ГПУ-ТЭЦ) с паротурбинным приводом компрессора низкого давления. Разработана математическая модель технологических процессов в элементах этой установки. Предлагаемая схема за счет применения парового привода компрессора установки в котле-утилизаторе двухступенчатого испарителя с камерой дожигания, конденсации паровой составляющей газопаровой смеси, а также двух противоавлапчатеских паровых турбин обладает повышенной тепловой экономичностью и высокой маневренностью со значительным увеличением выработки электрической и тепловой энергии в отопительные периоды года.

Ключевые слова: электрическая и тепловая мощность, котел-утилизатор, противоавлапчатеская паровая турбина, газотурбинная установка, парогазовая турбина, паровой привод компрессора.

Одной из актуальных проблем энергетики является создание теплофикационных ПГУ-ТЭЦ с высоким уровнем когенерационной выработки тепловой и электрической энергии. Для повышения тепловой и электрической мощности в отопительных режимах их работы в патенте [1] было предложено применить в котле-утилизаторе (КУ) двухступенчатый испаритель с камерой дожигания топлива (КД) между его ступенями, снабдить эту ПГУ-ТЭЦ двумя противоавлапчатескими турбины с сетевыми подогревателями. Это позволяет за счет сжигания топлива в КД увеличить выработку пара в КУ и значительно повысить электрическую и тепловую мощность. Эти мероприятия способствуют повышению маневренных характеристик ПГУ-ТЭЦ. В патенте [2] предложена схема газопаровой теплоэлектроцентрали, в которой пар расширенный в противоавлапчатеской паровой турбине (ПТ) смешивают в камере сгорания (КС) с продуктами сгорания топ-

рания (КС). Для увеличения доли пара в газопаровой смеси процесс горения в КС производят при небольшом коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 1,2$. Такое соотношение топлива и воздуха обеспечит полное сгорание при небольшом расходе воздуха через компрессор. В камеру смешения КС подают пар, расширенный в ПТ1. Полученную парогазовую смесь расширяют в парогазовой турбине (ПГТ). Ее работу используют для привода КВД и электрогенератора (Э). Парогазовую смесь, расширенную в ПГТ, направляют в котел-утилизатор (КУ), где ее теплоту используют: для выработки перегретого пара высокого давления в экономайзере второй ступени (ЭкII), в испарителе и пароперегревателе, для подогрева сетевой воды теплосети, в газоводяном подогревателе ГВП и для подогрева питательной воды в экономайзере первой ступени (ЭкI). Как и в работе [1] для повышения маневренных характеристик установки в отопительный период в КД сжигают дополнительное топливо и увеличивают выработку пара в КУ. Этот пар подают в ПТ2 для увеличения выработки электроэнергии и подогрева сетевой воды в ПСВ. При изменении температуры наружного воздуха паропроизводительность КУ регулируют за счет изменения расхода топлива в КД.

Особенностью данной схемы является привод КНД от паровой турбины ПТ1, а КВД от турбины ГТУ. Ввод пара в зону смешения КС позволяет увеличить работу расширения газопаровой смеси и повысить ее мощность. В КУ предусмотрено использование теплоты конденсации водяного пара из газопаровой смеси и возвращение конденсата в цикл. Ее высокопотенциальное тепло используется для генерации пара в КУ, а низкопотенциальное тепло используется в ГВС для подогрева сетевой воды теплосети.

От выбора суммарной степени повышения давления в компрессоре $\pi_{\Sigma К} = \pi_{КНД} \cdot \pi_{КВД}$ зависит величина полезной работы цикла ГТУ L_e и получение в КС значения α на уровне 1,15...1,25. Рассчитана мощность, потребляемая компрессором N_K , в зависимости от расхода воздуха G_B через него при различных $\pi_{\Sigma К}$ приведена на рис. 2. Мощность компрессора увеличивается при увеличении $\pi_{\Sigma К}$ и расхода сжимаемого воздуха G_B . Параметры пара на входе в КС задаются с учетом параметров пара перед типовыми противоаварийными турбинами и уровнем гидравлических потерь в паровом тракте. Принято: $P_{n,n} = 9,0$ до 13,0 МПа; $T_{n,n} = 818\text{К}$; $P_{n,n} = 1,6$ МПа; $T_{n,n} = 513\text{К}$.

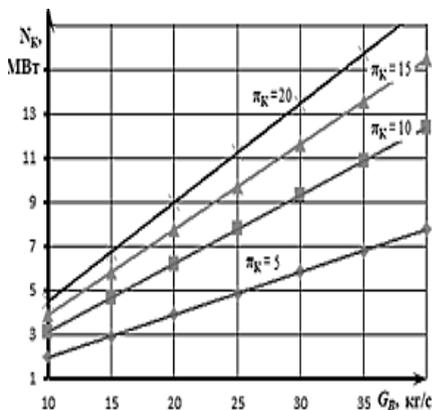


Рис. 2. Зависимость мощности, потребляемой компрессором N_K от расхода воздуха G_B при различных $\pi_{\Sigma K}$

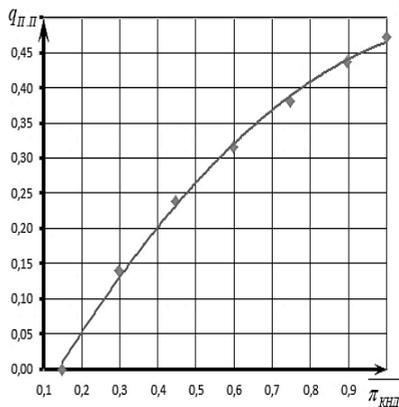


Рис. 3. Зависимость $q_{п.п}$ от относительной $\pi_{кнд}$

Расход пара через ПТ определяется заданным G_B и $\pi_{кнд}$ [5]. На рис. 3 приведена зависимость относительного расхода пара через ПТ1

от распределения π_K по каскадам компрессора, где $\pi_{кнд} = \frac{\pi_{кнд}}{\pi_{\Sigma K}}$.

Применение в КНД с пониженной величины $\pi_{кнд}$ позволяет уменьшить расход перегретого пара и снизить мощность приводной ПТ1 и паро-производительность КУ в неотапительных режимах работы ГПУ-ТЭЦ. Характеристики газопаровой смеси в ПТГ и в КУ – расход, давление, энтальпии смеси определялись с учетом долей продуктов сгорания и пара [6,7]. Электрическая мощность газопаровой ГПУ-ТЭЦ в неотапительных режимах ее работы определяется:

$$N_{\Sigma} = G_B \left[(1 - q_{ox} + q_T + q_{НП}) L_{ПТГ} \cdot \eta_M - L_{КВД} \right],$$

где: $L_{ПТГ}$ - удельная работа парогазовой турбины, $L_{КВД}$ - удельная работа КВД, η_M – механический КПД, G_B – массовый расход воздуха ГТУ, q_i – относительный расход рабочего тела (воздуха на охлаждение, топлива, насыщенного пара).

Энтальпия газопаровой смеси на выходе из парогенератора КУ:

$$h_{выхКУ} = \frac{(1 - q_{ox} + q_T) h_{ПТГ}^e - q_{НП} \cdot h_{ПТГ}^p}{(1 - q_{ox} + q_T + q_{НП})}$$

где: $h_{ПГТ}^2$ – энтальпия парогазовой смеси, $h_{ПГТ}^n$ – энтальпия парогазовой смеси на выходе из паровой части КУ.

Паропроизводительность КУ:

$$G_{ПЭ} = \frac{(1 - q_{ox} + q_T) h_{ПГТ}^2 - q_{НП} \cdot h_{ПГТ}^p}{(h_{выхКУ} - h_{ПВ})}$$

В отопительных режимах в КД сжигается дополнительное топливо с увеличением выработки пара в КУ для ПТ2, ее работа используется для привода электрогенератора. Суммарная электрическая мощность ПТ1 и ПТ2 в отопительных режимах газопаровой ГПУ-ТЭЦ:

$$N_{ЭΣ} = G_{ПГсм} L_{ПГТ} + G_{ПТ} L_{ПТ2} - G_B L_{КВД}, \quad L_{ПТ2} = (h_{ПТ} - h_{НП}) \eta_{ПТ3},$$

где: $L_{ПТ2}$ – удельная работа энергетической паровой турбины, $h_{ПТ}$ – энтальпия перегретого пара, $h_{НП}$ – адиабатическая энтальпия противодавления, $\eta_{ПТ3}$ – КПД паровой турбины 2.

Дополнительная электрическая мощность установки за счет расширения пара в ПТ2:

$$N_{ЭПТ2} = (G_{ПЭ} - G_{ПТ1}) L_{ПТ2}.$$

Суммарная электрическая мощность газопаровой ГПУ-ТЭЦ в отопительных режимах:

$$N_{ЭΣ} = G_B \left[(1 - q_{ox} + q_T + q_{НП}) L_{ПГТ} \cdot \eta_M - L_{КВД} \right].$$

Относительный расход топлива в КД:

$$q_{мКД} = \frac{G_{мКД}}{G_{B2}} = \frac{h_{ВхКД}^* - h_{ВхКД}^* - h_T + h_B}{\eta_{КД} \cdot H - h_T^* + h_T},$$

где: $h_{ВхКД}^*$, $h_{ВхКД}$ – энтальпии смеси перед и за камерой дожигания, $G_{мКД}$ – расход топлива в КД, h_T – энтальпия топливного газа, h_B – энтальпия воздуха.

Тепловая мощность установки в отопительных режимах:

$$Q_{Σ} = Q_{СП} - Q_{ГВП}, \quad Q_{СП} = G_{ПЭ} \cdot r, \\ Q_{ГВП} = (G_{ПЭ} + G_{КД}) (h_{2КУ} - h_{УХ}) \eta_{ГВП},$$

где: $Q_{СП}$ – теплота, вырабатываемая в ВСП; r – удельная теплота парообразования, $Q_{ГВП}$ – тепловая энергия ГВП.

С использованием предложенной математической модели проведен анализ характеристик газопаровой ПГУ-ТЭЦ при ее работе в неотапительный и в отопительный периоды года. В расчетах были приняты: расход воздуха через компрессоры $G_B = 25$ кг/с, степень повышения давления в КНД и в КВД $\pi_{СК} = 6,4$; коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,2$. Температура смеси перед ПГТ $T_{ПГ} = 1100$ К. Параметры перегретого пара вырабатываемого в КУ – 13 МПа, 540^0 С [8]. Регулирование характеристик агрегатов производится в соответствии с режимами работы ПГУ путем изменения расходов топлива в КС и КД. На рис. 4, 5 показано влияние расхода топлива в КД на паропроизводительность КУ и на выработку дополнительной электрической мощности в ПГ2.

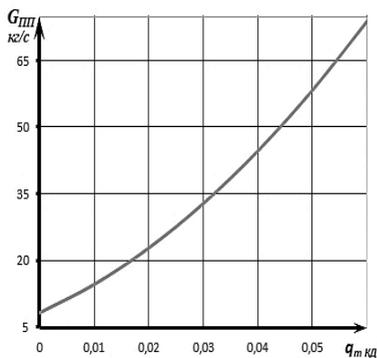


Рис. 4. Зависимость паропроизводительности КУ от относительного расхода топливного газа в КД $G_{П,П} = f(q_{m,КД})$

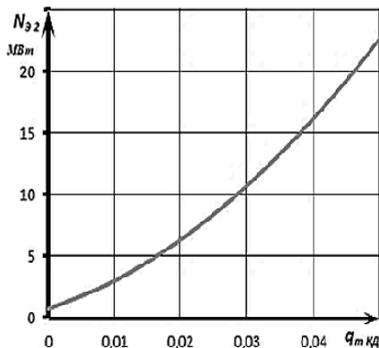


Рис. 5. Зависимость дополнительной электрической мощности $N_{Э2}$ от относительного расхода топлива $q_{m,КД}$ в КД

Предложенная схема газопаровой установки с паровым приводом КНД при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1,2$ в КС и подводе пара из ПТ1 в камеру смешения позволяет при небольшом уровне G_B и $\pi_{СК}$ снизить металлоемкость конструкции компрессоров и ПТ1. Расширение в ПГТ газопаровой смеси способствует повышению температуры

перед КУ увеличивает его паропроизводительность. Установка между ступенями испарителя КД с вентилятором подачи в неё воздуха позволяет повысить тепловую и электрическую мощность ПГУ с увеличением показателей совместной когенерационной выработки тепловой и электрической энергии. Технологическая схема газопаровой ГПУ-ТЭЦ, относительно проста и имеет меньшие капитальные затраты по сравнению ПГУ бинарного цикла. Введение пара в камеру сгорания ГТД улучшает экологические характеристики ГПУ-ТЭЦ.

Библиографический список

1. Патент РФ № 2650232. Теплофикационная парогазовая установка / В.В. Бирюк, Ю.Г. Кирсанов, М.Ю. Лившиц и др.
2. Патент РФ № 2409746. Парогазовая установка с паротурбинным приводом компрессора и регенеративной газовой турбиной / В. А. Никишин, Л.И. Пешков, И.Н. Рыжинский, Л.П. Шелудько.
3. Сравнительный анализ схем ПГУ с газотурбинным и паротурбинным приводами компрессора / А.Е. Зарянкин, В.А. Зарянкин, С.К. Сторожук, С.В. Арианов // Газотурбинные технологии. 2008. № 3. С. 46.
4. Заявка на изобретение РФ № 2019127680. Маневренная газопаровая теплоэлектроцентраль с паровым приводом компрессора / С.А. Гулина, В.К. Тянь, М.Ю. Лившиц, Л.П. Шелудько.
5. Газотурбинные энергетические установки / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Д. Земцов, Ф.С. Осыка. М.: Изд. дом МЭИ, 2011. 427 с.
6. **Гулина С.А., Шелудько Л.П.** Моделирование термодинамического цикла ГТД, работающего на газообразном топливе произвольного состава // Сб. тр. XXIX межд. научн. конф. «Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 29». Том 12. Саратов, 2016. С 67-73.
7. **Ривкин С.Л.** Термодинамические свойства газов. Справочник: в 2 т. М.: Энергоиздат, 1987. 288 с.
9. Парогазовые установки с дополнительным энергетическим котлом и паротурбинным приводом компрессора / А.Е. Зарянкин, В.А. Зарянкин, А.С. Магер, М.А. Носкова // Газотурбинные технологии. 2015. № 3. С. 40.
10. Блочная теплофикационная парогазовая установка / Е.А. Ларин, М.Ю. Лившиц, А.А. Шиманов и др. // ИФЖ. 2018. Т. 91, № 4. С. 1089-1097.

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАНИЯ АЭС С МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ*

Канд. техн. наук, ст. науч. сотр. **Юрин В.Е.**
Саратовский научный центр РАН, г. Саратов

***Аннотация.** Разработан способ комбинирования АЭС с многофункциональной системой теплового аккумулирования, включающей в себя аккумулятор фазового перехода и дополнительную маломощную ПТУ. Использование аккумулирующей системы позволит оптимизировать структуру энергогенерирующих мощностей с возможностью увеличения доли мощных энергоблоков в ЕЭС; позволит сократить выбросы в окружающую среду и увеличить экспорт природного газа и других нефтепродуктов за счет снижения доли тепловых электростанций, работающих на органическом топливе. Кроме того, наличие маломощной ПТУ в составе системы позволяет обеспечить резервирование собственных нужд АЭС на случай полного обесточивания. В работе проведён комплексный анализ эффективности разработанной системы с учётом требований рынка энергосбыта, прогнозных суточных дифференцированных тарифов и экономического ежегодного эффекта от снижения риска повреждения активной зоны реактора в аварийных ситуациях с обесточиванием станции. При расчетах были также учтены результаты оптимизации конструкции АФП на основе проведённого ранее исследования влияния циклического режима работы АФП на его ресурс*

***Ключевые слова:** атомная электростанция, тепловой аккумулятор фазового перехода, многофункциональная дополнительная паротурбинная установка, резервирование собственных нужд АЭС.*

Введение. В настоящее время в Российской Единой энергетической системе (ЕЭС) прослеживается дефицит пиковых и полупиковых энергоустановок, способных экономично и надёжно проходить провалы нагрузки и обеспечивать энергосистему электроэнергией в часы максимумов нагрузок. На полупиковый режим переведено большинство тепловых станций на органическом топливе, что негативно сказывается на их экономичности и надёжности. При этом в ЕЭС прослеживается активный рост доли АЭС, что только усугубляет проблемы,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00881

связанные с прохождением минимумов и максимумов нагрузок, вследствие экономически оправданной загрузки атомных электростанций с максимальным коэффициентом использования установленной мощности. Кроме того, для АЭС кроме экономической нецелесообразности имеются технологические ограничения маневренных характеристик. Эти факторы ведут к снижению конкурентоспособности АЭС на рынке энергосбыта. Указанные проблемы можно устранить, найдя эффективные пути участия АЭС в регулировании графиков нагрузки в ЕЭС. Одним из таких путей может стать комбинирование АЭС с многофункциональными установками, позволяющими аккумулировать дешевую ночную внепиковую энергию и использовать ее в полупиковые и пиковые часы нагрузки [1].

Примером такой системы является разработанный автором энергокомплекс, включающий двухконтурную АЭС, тепловой аккумулятор фазового перехода (АФП) и дополнительную паровую турбину. Структурная схема энергокомплекса приведена на рис. 1.

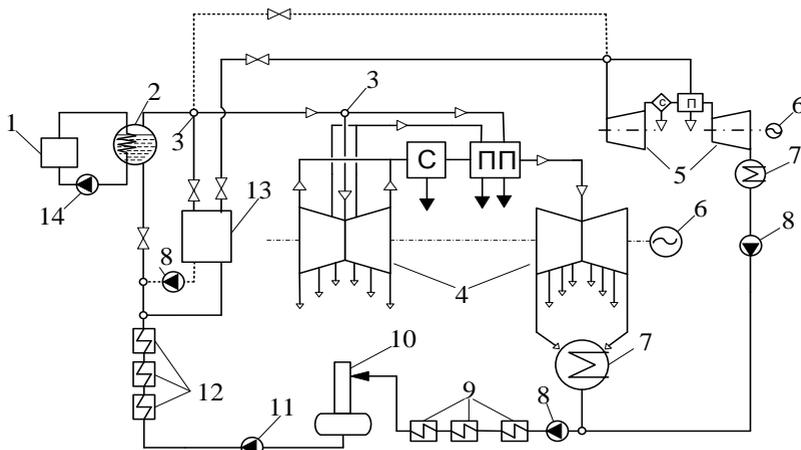


Рис. 1. Система повышения маневренности двухконтурной АЭС

1 – реактор; 2 – парогенераторы; 3 – устройство парораспределения; 4 – основная ПТУ; 5 – дополнительная ПТУ; 6 – электрический генератор; 7 – конденсатор; 8 – конденсатный насос; 9 – подогреватели низкого давления (ПНД); 10 – деаэрактор; 11 – питательный насос; 12 – подогреватели высокого давления (ПВД); 13 – АФП; 14 – главный циркуляционный насос; С – сепаратор; ПП – промежуточный пароперегреватель

В эксплуатационном режиме в ночные внепиковые часы нагрузки в энергосистеме осуществляется зарядка АФП 13 путем подачи в него свежего пара из парогенераторов 2. Конденсат пара после АФП 13 направляется в тракт питательной воды основной ПТУ после ПВД 12. Дополнительная ПТУ 5 работает в режиме холостого хода посредством отбора малого расхода свежего пара после парогенераторов. В режиме пиковых и полупиковых нагрузок часть питательной воды после ПВД 12 поступает в АФП 13, где, с использованием аккумулированного тепла, происходит генерация пара, направляемого на дополнительную ПТУ 5.

Для обеспечения возможности работы системы теплового аккумулирования в требуемых условиях автором в составе Отдела энергетических проблем Саратовского научного центра РАН была разработана конструкция аккумулятора с фазопереходным материалом, способного работать в режиме парогенератора [2].

Повышение безопасности АЭС. Помимо повышения маневренности АЭС разработанная система позволяет повысить безопасность станции. Ранее автором был разработан и обоснован способ использования остаточного тепловыделения реактора типа ВВЭР-1000 для обеспечения электроснабжения собственных нужд (СН) АЭС в процессе расхолаживания активной зоны при полном обесточивании станции. Как показали расчеты на основе опытных данных Балаковской АЭС, остаточного тепловыделения одного реактора ВВЭР-1000 достаточно для расхолаживания двух аналогичных реакторов в течение 72 ч [1]. Для оценки эффективности предлагаемой системы была использована разработанная автором ранее методика предварительного анализа надежности систем резервирования АЭС. Методика основана на построении графа состояний для исследуемой системы (в качестве примера на рис. 2 приведен граф состояний при резервировании собственных нужд АЭС на основе системы аккумулирования, включающей в себя дополнительную паровую турбину) и решении системы дифференциальных уравнений, описывающих полученный граф [1].

Как показали расчеты интенсивность ПАЗ при использовании рассмотренной системы аварийного электроснабжения с ДГ и ПТУ не превышает $1,0 \cdot 10^{-6}$ 1/ректор-год, что удовлетворяет второму целевому показателю, установленному для АЭС с ВВЭР нового поколения [1].

В качестве результирующего экономического эффекта повышения безопасности атомной станции принимается ежегодное снижение риска возникновения ущерба от аварий с ПАЗ, по сравнению с уров-

нем безопасности базовой трехканальной САЭ с ДГ и общестанционным передвижным дизель-генератором.

$$\Delta R_t = (\lambda_{\text{syst}}^{\text{общДГ}} - \lambda_{\text{syst}}^{\text{ПТУ+ДГ}}) \cdot n \cdot Y$$

где: $\Delta \lambda_{\text{syst}} = \lambda_{\text{syst}}^{\text{общДГ}} - \lambda_{\text{syst}}^{\text{ПТУ+ДГ}}$ – снижение интенсивности ПАЗ, $\lambda_{\text{syst}}^{\text{общДГ}} = 3,1 \cdot 10^{-5}$, $\lambda_{\text{syst}}^{\text{ПТУ+ДГ}} = 7,1 \cdot 10^{-7}$ – интенсивность отказа системы электроснабжения СН энергоблока АЭС с последующим ПАЗ при резервировании базовой трехканальной САЭ с ДГ с общестанционным передвижным дизель-генератором и трёхканальной САЭ с ДГ с дополнительной ПТУ, соответственно, 1/реакт.год [1]; n – количество обеспечиваемых резервом собственных нужд энергоблоков; Y – ущерб от аварии с ПАЗ. Оценивается по различным данным от 80 до 155 млрд. долл./реактор (доклад Министра РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий С.К. Шойгу о последствиях Чернобыльской аварии). Для расчетов принят в размере 100 млрд. долл./реактор.

Как показали расчеты, конечный результат ежегодного снижения риска возникновения ущерба от аварий с ПАЗ для варианта комбинирования одного энергоблока АЭС с дополнительной ПТУ составит 3 млн. долл./год.

Повышение маневренности АЭС. Для выполнения требования участия АЭС в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ) тока в энергосистеме текущая мощность реакторной установки должна поддерживаться на уровне не более 98% номинальной тепловой мощности. Выполнение этого требования системного оператора Единой энергосистемы России значительно снижает коэффициент используемой мощности реакторных установок, а значит и показатели работы атомных электростанций. Комбинирование АЭС с разработанной системой аккумулярования может решить эту проблему. Режим работы установки для проведения экономического анализа выбран на основе этого требования. Мощность дополнительной ПТУ подбирается таким образом, чтобы запас ее мощности (с 75 % до 100 %) был равен 2 % суммарной мощности полученного энергокомплекса АЭС + АФП + дополнительная ПТУ (при сопловом парораспределении дополнительную ПТУ можно поддерживать на 75% мощности с достаточно высоким КПД). Тогда, по требованию системного оператора можно увеличить мощность дополнительной ПТУ до 100 % и обеспечить подъем мощности энергокомплекса АЭС + АФП + дополнительная ПТУ на 2%.

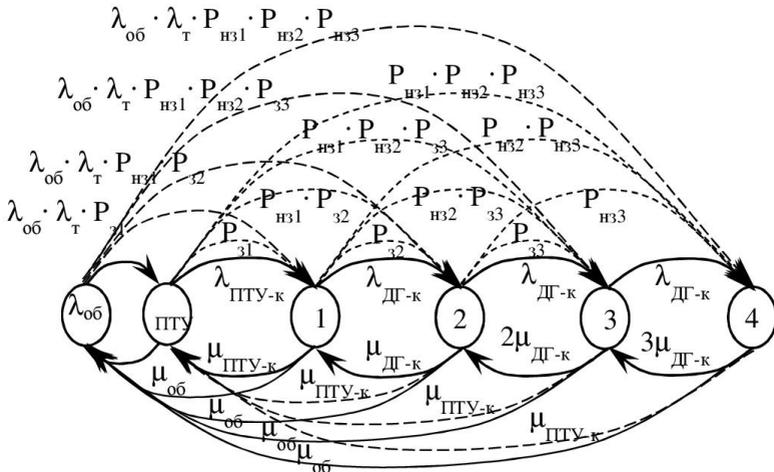


Рис. 2. Граф состояний для системы резервирования собственных нужд АЭС на основе дополнительной ПТУ с тремя каналами системы аварийного электроснабжения с дизель-генераторами (САЭ с ДГ)

Состояния: 0 – отсутствие нарушения электроснабжения СН АЭС; ПТУ – обесточивание АЭС, выполнение функций электроснабжения СН АЭС посредством дополнительной ПТУ; 1 – выполнение функций одним из трех каналов САЭ с ДГ; 2 – выполнение функций 2-м каналом САЭ с ДГ; 3 – выполнение функций 3-м каналом САЭ с ДГ; 4 – отказ всех резервных каналов с потерей электроснабжения и последующим повреждением активной зоны (ПАЗ); $P_{нз1..3}$, $P_{нз1..3}$ – вероятности запуска и незапуска 1-го, 2-го, 3-го дизель-генератора соответственно; λ_T – интенсивность потери теплоносителя 1-го контура; $\lambda_{об}$, $\lambda_{ДГ-к}$, $\lambda_{ПТУ-к}$ – интенсивность обесточивания АЭС, отказов дополнительной ПТУ и канала, ДГ и канала, соответственно; $\mu_{об}$, $\mu_{ДГ-к}$, $\mu_{ПТУ-к}$ – интенсивность восстановления электроснабжения: восстановление связи с энергосистемой, посредством ПТУ, посредством ДГ, соответственно

Для расчетов принято, что дополнительная ПТУ в режиме зарядки в часы ночного провала нагрузки отключается или работает на холостом ходу (8 ч), а остальное время (16 ч) на пониженной нагрузке 75% с целью обеспечения требования ЕЭС к участию АЭС в ОПРЧ. Расчеты проводилось на примере энергоблока с реактором ВВЭР-1000. Для проведения исследования экономической эффективности прирост вырабатываемой на АЭС мощности (с учетом потерь от снижения мощности основной ПТУ в результате увеличения регенеративных отборов) принят 87 МВт (мощность дополнительной ПТУ при этом составляет 117 МВт). Таким образом, с учетом работы на пониженной

нагрузке и потерь на основной ПТУ энергокомплекс будет получать 65 МВт дополнительной мощности. Для ее получения в ночные внепиковые часы на зарядку аккумулятора необходимо направлять 53 % от общего количества свежего пара в течение 8 ч. При этом т.к. в ночные часы часть свежего пара идет на зарядку АФП, а основная ПТУ соответственно работает на неполной нагрузке, по требованию системного оператора при необходимости может быть набрана мощность основной ПТУ.

Экономический анализ. Вопросы использования тепловых аккумуляторов фазового перехода активно исследуются на протяжении нескольких десятилетий Российскими [3] и зарубежными [4] учеными. В качестве рабочего тела теплового аккумулятора могут быть использованы различные материалы, такие как: камни, масла, газы, эвтектические соли [5], в том числе обладающие скрытой теплотой фазового перехода [6]. Широкое распространение в качестве теплоаккумулирующего материала получил сплав LiNO_3 [7]. Обосновано, что материал подходит по теплофизическим параметрам [8]. Однако температура плавления LiNO_3 (253°C) [9] не позволяет использовать его в необходимом температурном режиме. Для получения требуемой температуры плавления (272°C) возможно использование сплава, состоящего из LiNO_3 и NaCl [10].

На основе анализа существующих аналогичных аккумулятору фазового перехода конструкций проведена оценка средней стоимости основных технических узлов исследуемой установки. При этом были учтены результаты исследования ресурса АФП при различных режимах работы с оптимизированными в соответствии с результатами техническими характеристиками АФП, включая выбор материала трубок их длины и толщины стенок [2]. Суммарные капиталовложения в установку составили 4520 млн. руб. (методика оценки представлена в [1]). Удельные капиталовложения в маломощную ПТУ требуемой мощности и модернизацию оборудования энергоблока на основании данных ГК ТУРБОПАР и Балаковской АЭС составляют порядка 27 тыс. руб./кВт.

Для проведения экономического анализа разработанного энергокомплекса диапазон тарифов на электроэнергию и цен за топливо на расчетный период взяты из Прогноза Минэкономразвития России по долгосрочному социально-экономическому развитию Российской Федерации. Как показали расчеты без учета ежегодного риска повреждения активной зоны чистый дисконтированный доход за расчетный период 25 лет составит порядка 4400-4800 млн. руб. При этом капиталов-

вложения полностью окупятся за 15-17 лет. С учетом снижения риска ПАЗ: ЧДД составит 5600-5900 млн. руб., срок окупаемости 13-15 лет.

Выводы по работе. Разработан энергокомплекс на основе комбинирования энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 с системой теплового аккумулярования, включающей в себя аккумулятор фазового перехода и многофункциональную дополнительную паротурбинную установку. На основе данных прогноза Минэкономразвития России проведено комплексное исследование эффективности разработанной системы аккумулярования в условиях выполнения требования Системного оператора Единой энергосистемы России об участии АЭС в общем первичном регулировании частоты тока в энергосистеме с учетом эффекта от повышения безопасности АЭС. Как показали расчеты система полностью окупится за 13-17 лет.

Библиографический список

1. **Аминов Р.З., Юрин В.Е., Егоров А.Н.** Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками. М.: Наука, 2018. 240 с.
2. **Юрин В.Е., Москаленко А.Б., Муртазов М.А.** Оценка долговечности теплообменной трубки аккумулятора фазового перехода, работающего в составе АЭС // Труды Академэнерго. 2019. № 1. С. 63-71.
3. **Левенберг В.Д., Ткач М.Р, Гольстрем В.А.** Аккумулярование тепла. К.: «Тэхніка», 1991. 112 с.
4. **Бекман Г., Гилли П.** Тепловое аккумулярование энергии. М., Мир, 1987. 272 с.
5. **Лукьянов А.В., Остапенко В.В., Александров В.Д.** Аккумуляторы тепловой энергии на основе фазового перехода // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2010. № 6 (86). С. 64-68.
6. **Россихин Н.А.** Расчет и проектирование аккумуляторов теплоты на фазовых переходах (капсульного типа): Методические указания. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 33 с.
7. Phase Change Materials / Ed. by S. Raoux, M. Wuttig (Eds.). Springer US, 2009. 430 p.
8. Phase Transitions in Materials / Ed. by V. Fultz. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 583 p.
9. **Бабаев Б.Д.** Разработка и исследование энергосистем на основе возобновляемых источников с фазопереходным аккумулярованием тепла.: дисс. ... д-ра тех. наук. Махачкала: Дагестанский гос. ун-т, 2016. 213 с.
10. Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов / А.Г.Мозговой, Э.Э.Шпильрайн, М.А.Дибиров и др. // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. Вып. № 2 (82). М.: ИВТАН, 1990. 105 с.

2. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.316.727

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Канд. техн. наук, доц. **Влацкая Л.А.**

Д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф. **Семенова Н.Г.**
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

***Аннотация.** В статье рассмотрена задача повышения энергоэффективности систем электроснабжения посредством оптимального размещения компенсирующих устройств.*

Представлены: математическая модель оптимизационной задачи, разработанный алгоритм оптимального размещения компенсирующих устройств, базирующийся на методе Монте-Карло и его программная реализация в MathCad.

Приведены результаты сравнительного анализа работы программ, реализованных посредством метода Монте-Карло и метода полного перебора.

***Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, оптимизация, метод Монте-Карло.*

Энергосбережение и повышение энергоэффективности в системах электроснабжения промышленных предприятий связано, в том числе, с решением вопроса о снижении потерь активной мощности [1]. Одним из распространенных и эффективных способов их уменьшения является компенсации реактивной мощности (РМ) за счет установки компенсирующих устройств (КУ) [2]. Следует отметить, что КУ позволяют регулировать генерируемую ими реактивную мощность только ступенчато (мощность КУ – дискретная величина). Величина реактивной мощности, подлежащей компенсации, регулируется приказом Минэнерго от 23.06.2015 № 380 «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих

устройств) потребителей электрической энергии» и определяется из уравнения баланса реактивных мощностей [3].

В соответствии с вышеизложенным, актуальной задачей для электрических сетей промышленных предприятий является оптимальное распределение реактивной мощности, подлежащей компенсации, между узлами, с учетом дискретности изменения мощности КУ, по критерию минимальных потерь активной мощности (далее по тексту оптимальное размещение КУ).

Цель работы разработка алгоритма оптимального размещения компенсирующих устройств и его программная реализация.

Сформулированная в работе задача оптимального размещения КУ является многопараметрической, решить которую можно используя различные однокритериальные методы, в том числе метод Монте-Карло [4].

Метод Монте-Карло [5] – численный, итерационный метод решения оптимизационных задач посредством генерирования случайных величин с последующей подстановкой их в целевую функцию и поиском наилучшего ее значения.

В работе представлены: разработанный алгоритм оптимального размещения компенсирующих устройств, базирующийся на методе Монте-Карло и его программная реализация в MathCad.

С учетом сформулированных в [6] допущений поставленная задача описывается математической моделью, в которой:

а) целевая функция – потери активной мощности:

$$\Delta P(Q_{KV1..n}) = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{KVi})^2}{U^2} R_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

б) ограничение – суммарная мощность устанавливаемых КУ, не превышающая значение РМ, подлежащей компенсации:

$$\sum_{i=1}^n Q_{KVi} \leq Q_{\Sigma K}, \quad (2)$$

в) граничные условия – неотрицательные, дискретные значения мощностей КУ:

$$Q_{KVi} \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad Q_{KVi} - \text{дискретные значения.} \quad (3)$$

где n – число узлов сети; Q_i – реактивная нагрузки i -ой линии; Q_{KVi} – реактивная мощность КУ, размещенного в i -ом узле; U – напряжение сети; R_i – активное сопротивление i -ой линии; $Q_{\Sigma K}$ – реактивная мощность, подлежащая компенсации.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рис. 1.

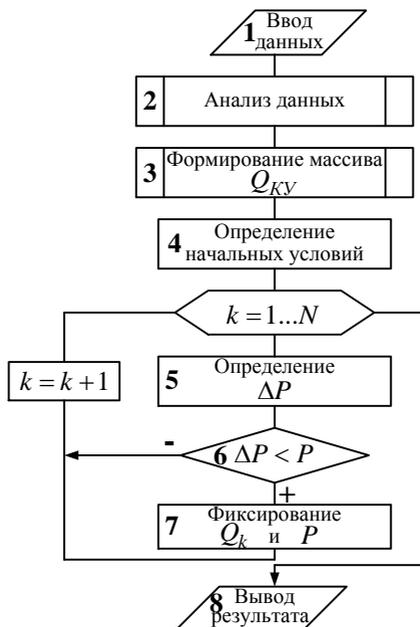


Рис. 1. Блок-схема алгоритма Монте-Карло для оптимального размещения компенсирующих устройств

Алгоритм состоит из следующих процедур.

1) Ввод данных.

Исходными данными являются:

- основные параметры электрической сети: напряжение (U), количество узлов (n), сопротивления линий ($R_i, i = \overline{1, n}$) и реактивные нагрузки узлов ($Q_i, i = \overline{1, n}$), реактивная мощность, подлежащая компенсации ($Q_{\Sigma K}$). Сопротивления линий и реактивные нагрузки узлов задаются в виде векторов (R и Q) размером $n \times 1$.

- шаг изменения мощности компенсирующих устройств (h);

- число итераций алгоритма (N).

Фрагмент интерфейса разработанной программы представлен на рис. 2.

напряжение сети, [кВ] U := <input style="width: 80%;" type="text"/>	количество узлов сети n := <input style="width: 80%;" type="text"/>	реактивная мощность, подлежащая компенсации, [квар] Q _{ΣК} := <input style="width: 80%;" type="text"/>
сопротивления линий, [Ом] R := <input style="width: 80%;" type="text"/>	реактивная нагрузка узлов, [квар] Q := <input style="width: 80%;" type="text"/>	
шаг изменения мощности КУ, [квар] h := <input style="width: 80%;" type="text"/>	целевая функция (потери активной мощности) f(Q _k) := <input style="width: 80%;" type="text"/>	
Дополнительные параметры расчета		
количество генерируемых (рассчитываемых) вариантов N := <input style="width: 80%;" type="text"/>		

Рис. 2. Интерфейс для ввода данных

2) Анализ данных.

Процедура заключается в анализе исходных данных на корректность ввода. Выполняются проверки следующих условий:

- наличие отрицательных значений в исходных данных;
- соответствие количества узлов сети (n) размерностям векторов R и Q ;

– превышение суммарной реактивной мощности сети значения реактивной мощности, подлежащей компенсации.

Фрагменты результатов работы процедуры анализа данных приведены на рис. 3.

rez(h, Qk) = "Количество узлов и размерность массивов R и Q не совпадают"
 rez(h, Qk) = "PM, подлежащая компенсации (Qk) превышает PM сети"

Рис. 3. Результаты работы процедуры «Анализ данных»

3) Формирование массива Q_{KV} .

Массив Q_{KV} имеет размер $N \times n$:

$$Q_{KV} = \begin{bmatrix} Q_{KV11} & Q_{KV12} & \dots & Q_{KV1n} \\ \dots & \dots & Q_{KVki} & \dots \\ Q_{KVn1} & Q_{KVn2} & \dots & Q_{KVnn} \end{bmatrix},$$

где Q_{KVki} – k -я реализация возможной дискретной мощности КУ в i -м узле, $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, N}$.

Значения Q_{KVki} генерируется случайным образом на интервале $[0..Q_{\Sigma K}]$ с шагом h . Для каждой k -й строки массива выполняется ограничение (2).

4) Определение начальных условий.

Из массива Q_{KV} выбирается первая строка и заносится в переменную Q_k . В соответствии с выражением (1) определяются потери активной мощности на нулевой итерации – $\Delta P(Q_{KV11}, Q_{KV12}, \dots, Q_{KV1n})$, которые заносятся в переменную P .

5) Определение потерь активной мощности (ΔP).

Из массива Q_{KV} выбирается очередная k -я строка и определяются потери мощности на k -й итерации – $\Delta P(Q_{KVk1}, Q_{KVk2}, \dots, Q_{KVkn})$.

6) Проверка условия

$$\Delta P < P. \quad (4)$$

Если на k -ой итерации условие (4) выполняется, то осуществляется переход к процедуре 7, иначе, если $k < N$, то переход к процедуре 5.

7) Фиксирование Q_k и P .

В переменную P заносится значение ΔP , а в Q_k – $(Q_{KVk1}, Q_{KVk2}, \dots, Q_{KVkn})$.

Если $k < N$, то осуществляется переход к процедуре 5, иначе итерационный процесс завершается и выводится результат (процедура 8).

8) Вывод результата.

Результатом работы программы являются найденные дискретные значения мощностей КУ, которым соответствуют минимальные потери активной мощности.

На рис. 4 представлен результат работы программы для 3-х узловой схемы электроснабжения.

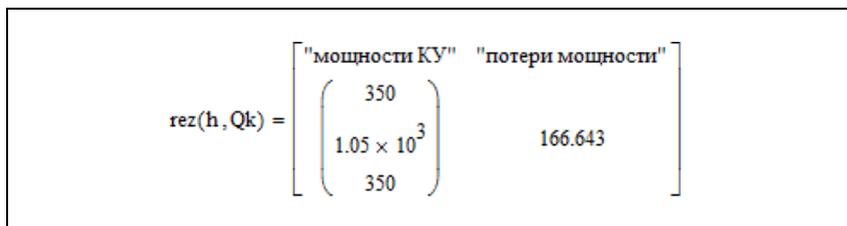


Рис. 4. Фрагмент вывода результатов

Адекватность разработанной программы [7], реализующей метод Монте-Карло (ММК), оценивалась посредством сравнения результатов ее работы с результатами программы, реализующей метод полного перебора (МПП) по следующим показателям:

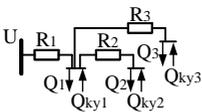
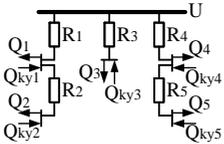
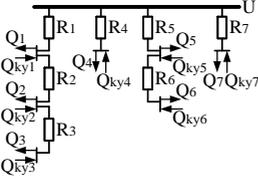
1) относительная погрешность (ε) целевой функции (потерь, определенных с учетом найденных дискретных мощностей КУ);

2) быстродействие (t) – время, необходимое программе для вывода результатов.

Сравнение проводилось для 3-х, 5-и и 7-и узловых радиально-магистральных схем соединений. Шаг изменения мощности КУ принят 50 квар. Отдельные результаты сравнения работы двух программ приведены в табл. 1. Для ММК проводилось 10 прогонов программы, в табл. 1 приведены только максимальные и минимальные значения ΔP . Погрешность вычислений (ε) по ММК определялась как среднее арифметическое.

Таблица 1

Результаты сравнения работы программ

Схема	Метод	ΔP , кВт	ε , %	t	
 3-х узловая	МПП	1292,54		$\approx 1,3$ с	
	ММК	$N=3 \cdot 10^6$	1338,71	5,7	$\approx 16,3$ с
		...	1385,76		
		$N=3 \cdot 10^5$	1438,37	14,2	
		...	1547,39		
	 5-и узловая	МПП	658,43		1 ч 37 мин 14с
ММК		$N=3 \cdot 10^6$	689,29	6,8	$\approx 27,4$ с
		...	712,92		
		$N=3 \cdot 10^5$	746,3	15,6	
		...	806,67		
 7-и узловая		МПП			3 дня 17ч 46 мин 21 с
	ММК	$N=3 \cdot 10^6$	1803,79	7,1	$\approx 40,16$ с
		...	1839,66		
		$N=3 \cdot 10^5$	1957,06	16,3	
		...	2053,78		

Анализ табл. 1 позволяет сделать выводы:

1) для схем с небольшим количеством узлов эффективнее использовать МПП, поскольку он является наиболее точным, а быстродействие программы, реализующей указанный алгоритм сопоставимо с временем работы программы, реализующей алгоритм ММК;

2) для схем, содержащих большое количество узлов целесообразнее использовать метод Монте-Карло. Указанный метод хоть и является приближенным, но быстродействие программы, реализующей алгоритм ММК гораздо выше, чем программы реализующей МПП, а погрешность составляет не более 10 % для 3 млн сгенерированных и просчитываемых вариантов и 20 % для 300 тыс. вариантов.

Выводы по работе. 1. Предложена математическая модель оптимального размещения компенсирующих устройств. 2. Разработан алгоритм оптимального размещения компенсирующих устройств, базирующийся на методе Монте-Карло. 3. Выполнено сравнение результатов работы алгоритмов метода Монте-Карло и метода полного перебора. Результаты сравнительного анализа показывают целесообразность применения метода Монте-Карло для схем, содержащих большое количество узлов.

Библиографический список

1. Компенсация реактивной мощности. К вопросу о технико-экономической целесообразности / В. Овсейчук, Г. Трофимов, А. Кац и др. // Новости электротехники. 2008. № 4 (52). С. 42-46.

2. **Юдин А.А., Бондарь В.В.** Разработка математических моделей для оптимизации режимов электроэнергетических систем по напряжению и реактивной мощности // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С. 123-128.

3. Энергосбережение в системах промышленного электроснабжения: Справочно-методическое издание / Э.А. Киреева, Т.В. Анчарова, С.С. Бодрухина и др. М.: Интехэнерго-Издат, Теплоэнергетик, 2014. 304 с.

4. **Карпенко А.П.** Методы оптимизации (базовый курс). Метод Монте-Карло. [Электронный ресурс]. URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=МО/ch1003.mod/?cou=МО/base.cou>.

5. **Вентцель Е.С.** Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.

6. **Семенова Л.А., Инжеватова А.О., Салимов Р.М.** К вопросу выбора оптимальной мощности и мест размещения устройств компенсации реактивной мощности // Энергетика: состояние, проблемы перспективы: тр. VIII Всерос. науч.-тех. конф. Оренбург: ООО Агентство «Пресса», 2016. С. 15-19.

7. Св-во о регистрации прикладной программы «Метод Монте-Карло для оптимального размещения компенсирующих устройств в узлах электрической сети» / Автор Л.А. Влацкая; Правообл. Оренбургский гос. универ. Универ. фонд эл. рес. ОГУ. Рег № 1985; опубли. 15.10.2019.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ КОМПАНИИ В ПЕРИОД СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Канд. техн. наук, доц. **Гаврилова А.А.**

Д-р техн. наук, доц. **Салов А.Г.**

Аспирант **Сагитова Л.А.**

*Самарский государственный технический
университет, г. Самара*

***Аннотация.** Проведён анализ динамики комбинированного производства тепловой и электрической энергии с целью повышения эффективности деятельности энергетической системы Самарской области. На основе статистических данных построены адекватные модели функционирования энергосистемы в виде трехфакторных степенных неоднородных производственных функций. Параметры моделей идентифицированы методом наименьших квадратов. На основе полученных моделей проведена оценка влияния вкладов капитальных и трудовых ресурсов на выпуск суммарной энергии. Исследовано поведение производственно-технологических процессов в плоскости параметров капитальных и трудовых ресурсов.*

***Ключевые слова:** энергосистема, эффективность, моделирование, производственная функция, эластичность, изокванты, изоклинали, относительные вклады ресурсов.*

Решение проблемы повышения комплексной эффективности производства тепловой и электрической энергии региональной энергосистемой в настоящее время является весьма актуальной.

Цель работы: повышение системной эффективности производства тепловой и электрической энергии региональным энергетическим комплексом Самарской области.

Статистический анализ функционирования энергосистемы.

Проведём комплексный анализ деятельности региональных энергетических систем, их взаимосвязей между собой и с внешней средой с целью совершенствования методов и структур управления энергетическими предприятиями, что обеспечит улучшение технико-экономических показателей работы, позволит повысить эффективность энергетического производства и определить направления развития региона [1], [2], [3].

Используя концепцию системного анализа, идентифицируем инфраструктурные связи экономики региона с территориальной генерирующей компанией, определим закономерности её функционирования, эффективность работы оборудования энергетических предприятий, комплексного использования основных базовых ресурсов на примере функционирования энергосистемы Самарской области [4].

Статистический анализ показателей экономической деятельности в Самарской области за период 1976-2017 годы показал, что объём промышленного производства в области снизился к 2016 году до 64% от уровня 1990 года (рис. 1). Общий спад продолжался с темпом в 1,5% в год до 2002 года, после чего ситуация стабилизировалась.

Процесс спада потребления тепловой энергии в виде промышленного пара существенно повлиял на характер производственной деятельности областной энергетической системы, которая состоит только из теплоэлектроцентралей.

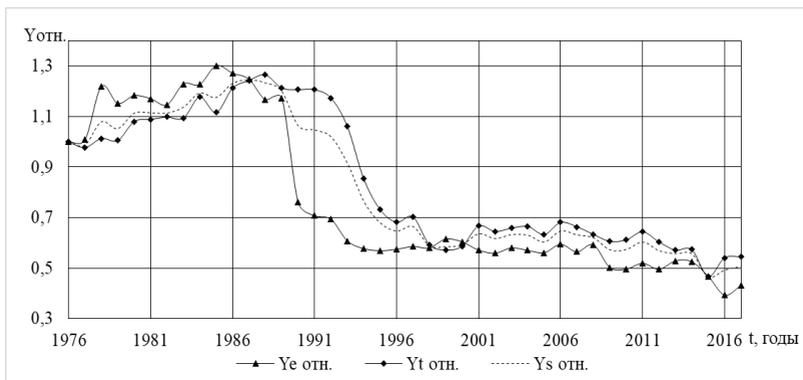


Рис. 1. Производство энергии 1976 – 2017 г.

Нарушился баланс производства между электрической и тепловой энергиями, произошло замещение тепловой нагрузки в виде промышленного пара отопительной нагрузкой. Это привело к работе оборудования теплоэлектроцентралей в неоптимальных режимах с низкими технико-экономическими показателями и выводу части оборудования в резерв [5].

Модельный анализ деятельности энергосистемы.

Исследование динамики поведения энергосистемы в 1976-2017 гг. проведено на основе агрегированных математических моделей функ-

ционирования энергосистемы в форме трехфакторных неоднородных степенных производственных функций [6]. Модели энергосистемы описывается следующими уравнениями:

$$Y(t) = A \cdot K(t)^\alpha \cdot L(t)^\beta \cdot B(t)^\gamma \quad (1)$$

где $Y(t)$ – $Y_s(t)$, $Y_e(t)$, $Y_t(t)$ – соответственно выпуск суммарной, электрической и тепловой энергий, A – масштабный коэффициент, α , β и γ – коэффициенты эластичности, являющиеся функциями логарифмической чувствительности и характеризующие эффективность использования капитальных, трудовых и топливных ресурсов в производственных процессах, соответственно [7].

Идентификация параметров моделей проведена методом наименьших квадратов.

На рис 2 графически отображена сходимость модельных и реальных статистических данных производства энергии за период с 1997 по 2017 гг.

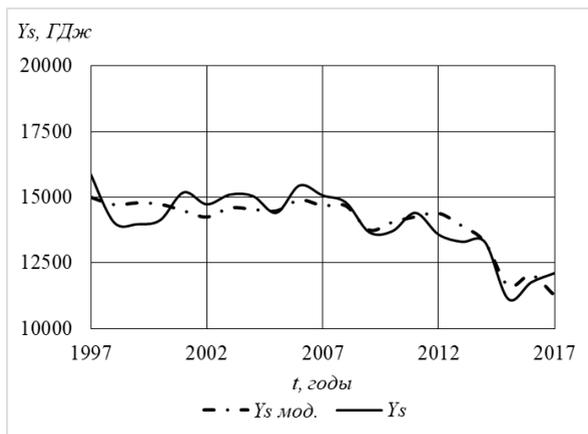


Рис. 2. Энергосистема 1997-2017 гг. Y_s – отпуск суммарной энергии, ГДж; Y_s мод – модельные значения отпуска суммарной энергии, ГДж

Анализ качества моделей (1) проведен по коэффициенту детерминации R^2 , F-критерию Фишера, среднеквадратической ошибке σ , t-статистике Стьюдента [8]. В целом, полученные модели удовлетворительно описывают функционирование энергосистемы [6]. Согласно

критерию Дарбина-Уотсона модели обладают удовлетворительными прогнозными свойствами, что позволяет использовать ее для анализа и построения среднесрочного прогноза на 5-6 лет.

Оценка относительных вкладов относительных ресурсов.

Оценим влияние вклада капитальных и трудовых ресурсов на выпуск суммарной энергии, оценку произведём с помощью относительных вкладов капитальных W_K^i и трудовых W_L^i ресурсов K и L в выпуск энергии в момент времени t , определяемых как произведение предельной производительности на отношение приращения объема входных ресурсов к приращению выпуска суммарной энергии:

$$W_K^i = Y'_K \int_{K_i}^{K_{i+1}} \partial K = \frac{Y'_K \cdot \Delta K_i}{\Delta Y_i} = \frac{Y'_K \cdot (K_{i+1} - K_i)}{Y_{i+1} - Y_i} \quad (2)$$

$$W_L^i = Y'_L \int_{L_i}^{L_{i+1}} \partial L = \frac{Y'_L \cdot \Delta L_i}{\Delta Y_i} = \frac{Y'_L \cdot (L_{i+1} - L_i)}{Y_{i+1} - Y_i} \quad (3)$$

Тогда $W_K^i + W_L^i = 1$.

На рис. 3 приведены результаты расчетов относительных вкладов трудовых и капитальных ресурсов для производства суммарной энергии за период с 1976 по 2017 гг.

Определены периоды снижения (1976 – 1979 гг., 1983 – 1988 гг., 1989 – 1996 гг.) и роста (1979 – 1983 гг.) относительных вкладов капитальных ресурсов

С 1996 по 2008 гг. возникают колебания относительных вкладов трудовых и капитальных ресурсов, при этом амплитуда колебаний возрастает к концу периода, достигая максимума W_K в 2008 году. В этот период на производство энергии наибольшее влияние оказывают капитальные ресурсы.

Период 2009 – 2017 гг. характеризуется увеличением относительного вклада трудовых ресурсов – к концу периода он достигает 100% для суммарной, электрической и тепловой энергии.

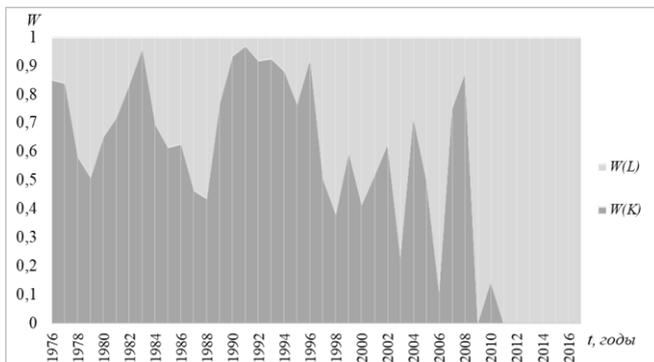


Рис. 3. Производство суммарной энергии

Такая кризисная ситуация является следствием разбалансированности практически всех механизмов ресурсных взаимодействий в производственно-технологической и экономической деятельности энергосистемы и отсутствием целенаправленного, стратегического управления энергосистемой в эти годы.

Исследование динамики выпуска энергии в пространстве входных ресурсов.

Исследовано поведение производственно-технологических процессов в плоскости параметров капитальных K и трудовых L ресурсов. Для этого построены предельные траектории поведения процессов –

изокванты $K = K_0 \cdot \left(\frac{L}{L_0}\right)^{\frac{\alpha}{\beta}}$ и изоклинали $K = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta} \cdot (L^2 - L_0^2)} + K_0^2$, где

K_0 и L_0 – начальные координаты точки, через которую проходит изокванта.

На изокванте выпуск продукции постоянен при различных значениях входных параметров K и L . Изоклиналию называется линия наибольшего роста производственной функции, то есть линия, на которой предельные нормы замещения производственных ресурсов постоянны. По направлению изоклинали определяется максимальный прирост/спад выпускаемой продукции.

На рис. 4 отображена траектория реального протекания процесса выпуска суммарной энергии, соответствующая статистическим данным, в координатах K и L и графики изоквант и изоклиналей для периода времени с 1976 по 2017 гг.

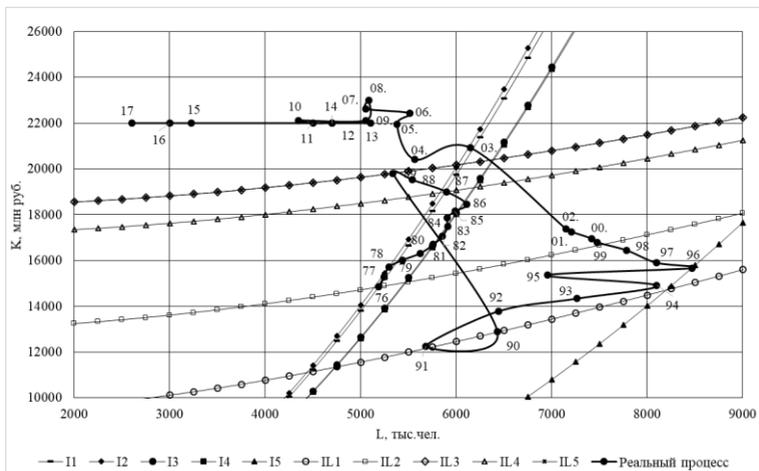


Рис. 4. Динамика выпуска суммарной энергии в пространстве входных ресурсов за период с 1976 по 2017 г.:
 I1, I2, I3, I4, I5 –изокванты, IL1 IL2, IL3, IL4, IL5 –изоклинали

По поведению траектории производства суммарной энергии в период с 1976 по 2017 г. определены некоторые характерные периоды.

Период с 1976 по 1986 гг. характеризовался наиболее эффективным производством энергии, траектория реальной зависимости $K=K(L)$ движется параллельно изоклинали вправо. В этот период произошёл рост производства суммарной энергии на 23 %.

С 1986 по 1991 гг. происходит переходный процесс, линия реального протекания производственных процессов движется вниз, основные ресурсы используются неэффективно. Этому периоду соответствует снижение выпуска суммарной энергии на 15%.

В период с 1991 по 1996 гг. график реальной взаимосвязи факторов производства движется практически параллельно изоклинали вправо, что говорит об оптимальном производстве энергии.

Период 1997-2010 гг. характеризуется максимально неэффективным использованием ресурсов. В 2010 по 2013 гг. отмечено установление эффективного соотношения между ресурсами за счет увеличения трудовых ресурсов. После 2013 года процесс выпуска продукции становится неэффективным. Сокращение численности персонала проведено за счет вывода из состава генерирующей компании ремонтного предприятия и структурных изменений в руководстве генерирующих предприятий слабо коррелирующихся с управляемостью технологиче-

ским производством и надежностью работы энергетического оборудования.

Выводы по работе.

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено взаимовлияние основных входных ресурсов с системной эффективностью функционирования генерирующей компании. Исследована системная устойчивость и управляемость генерирующих предприятий территориальной энергетической компании.

2. Проведён анализ динамики комбинированного производства тепловой и электрической энергии. Определены локальные предельные эффективности использования ресурсов энергетическими производствами.

Библиографический список

1. **Емельянов С.В., Напельбаум Э.Л.** Методы исследования сложных систем. // В кн. Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. М.: ВИНТИ, 1977. Т.8. С. 5-101.

2. **Дилигенский Н.В., Шелудько Л.П.** Проблемы и пути реализации региональной энергосберегающей политики. // Вестник Самарского технического университета. 1998. № 5. С. 144-151.

3. Энергетическая стратегия Самарской области. / А.И. Родионов, В.В. Бобров, Н.В. Дилигенский и др. // Самарская область на пороге XXI века. Стратегия социально-экономического развития: матер. Всерос. науч.-практ. конф. Самара, 1998. С. 69-71.

4. Динамика макроэнергетических показателей топливно-энергетического комплекса области в условиях реформ. / А.И. Родионов, В.В. Бобров, Н.В. Дилигенский и др. // Проблемы и перспективы социально-экономического развития Самарской области: матер. науч.-практ. конф. Том II. Самара, 1997. С. 232-236.

5. Проектирование сложных бизнес объектов на основе системного анализа. Монография / Е.А. Матвеева, А.Р. Дязитдинова, О.Н. Черных, А.А. Гаврилова. Самара: ПГУТИ, 2016. 150 с.

6. **Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А. Цапенко М.В.** Построение и идентификация математических моделей производственных систем. Учеб. пособие. Самара: Офорт, 2005. 126 с.

7. **Салов А.Г., Гаврилова А.А.** Системный анализ и моделирование деятельности энергетических генерирующих предприятий с целью оценки эффективности их функционирования в условия становления рыночных отношений. // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2008. №1 (30). С.86-91.

8. **Замков О.О., Толстопятенко А.В., Черемных Ю.Н.** Математические методы в экономике. М.: МГУ, изд-во «ДИС», 1997. 368 с.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК КОНТРОЛЯ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ*

Аспирант Губайдуллин Р.Р.¹

Д-р техн. наук, проф. Нуреев И.И.¹

Д-р техн. наук, доц. Сахабутдинов А.Ж.¹

Канд. техн. наук, доц. Кузнецов А.А.¹

Канд. психол. наук Смирнов А.Б.²

Канд. техн. наук Муллин Ф.Ф.²

Карпенко О.И.²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань

²ООО «М12Системс», г. Казань

***Аннотация.** В работе описывается опыт создания лабораторного измерительного устройства напряжения тока основанного радиофотонных технологиях измерения, где в качестве чувствительного элемента использована волоконная брэгговская решетка (ВБР). Так же в работе представлены результаты экспериментальных данных по измерению высоких напряжений до 10кВ.*

***Ключевые слова:** волоконная брэгговская решетка, ВБР, датчик напряжения, разность потенциалов, кварц, кристалл кварца, кварцовый тержень, диэлектрик, SmartGid.*

С каждым годом объём потребления электроэнергии в мире непрерывно растет, что требует развитие и усовершенствование существующих высоковольтных линий передач, и создание новых более совершенных сетей. В связи, с чем остро встает вопрос контроля состояния энергетических сетей. Одним из основных параметров, нуждающихся в мониторинге, является напряжение сети, так как именно данный параметр применяется в работе автоматики для предотвращения нештатных ситуаций, а так же для учета поставляемой электроэнергии.

* Работа выполнена в рамках договора на выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ совместно с ООО «М12СИСТЕМС» в рамках проекта Национальной технологической инициативы (НТИ) в сфере энергообеспечения ЭНЕРЖИНЕТ при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения “Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере” (Фонд содействия инновациям) Договор №РФ1 от 09.10.2018.

Для решения поставленных задач в данной работе представлен опыт создания лабораторного измерительного устройства, основанного на радиофотонных технологиях измерения с применением ВБР в качестве чувствительного элемента, который закреплен на стрезень кварцевого стекла деформирующемуся под действием электромагнитного поля.

Мотивация к созданию подобного типа измерительных устройств обусловлена необходимостью создания безопасных и более компактных датчиков высокого напряжения, чем классические вольтметры включенные через измерительные трансформаторы.

Целью данной работы является создание волоконно-оптического датчика контроля высоких напряжений.

Требования к измерительному устройству. Для эффективной работы системы мониторинга напряжения разработанный датчик должен обладать следующими качествами:

- 1) устойчивостью к электромагнитным излучениям (ЭМИ), излучаемым от высоковольтных сетей;
- 2) возможностью организации передачи информации о полученных данных на большие расстояния;
- 3) возможностью организации серии датчиков в единую измерительную сеть с простой архитектурой;
- 4) малые габариты и вес.

Большую часть представленных требований в устройстве могут быть осуществлены с помощью применения радиофотонных методов измерений основанных на использовании ВБР в качестве чувствительного элемента. Так согласно [1] оптическое волокно мало восприимчиво к ЭМИ и радиационным излучениям, что может быть полезным для электрических сетей находящихся в непосредственной близости с атомными электростанциями. На сегодняшний день технология передачи оптического сигнала на большие расстояния и мультиплексирования ВБР хорошо изучена и широко применяется в телекоммуникациях и именуется как ВОЛП – волоконно оптические линии передачи [2, 3]. Так в работе [4] описана классическая технология мультиплексирования ВБР в единую измерительную систему методами спектрального уплотнения каналов (WDM – Wavelength Division Multiplexing). Простота представленного принципа построения оптических сетей позволяет использовать радиофотонную систему измерений в интеллектуальных сетях передачи данных о состоянии электрических сетей согласно концепциям Smart Grid и Smart Grid+ [5, 6], что согласно [7] является приоритетным направлением развития Россий-

ской экономики. Оставшаяся задача работы, связанная с массогабаритными характеристиками датчика, является основным предметом данного исследования.

Структурная схема измерительного устройства. Представленное в работе измерительное устройство состоит из следующих компонентов. Чувствительный элемент 6, представляющий собой ВБР закрепленный на стержне кристалла кварца 5. Два электрода 4а и 4б установленные на концы стержня 5 использующиеся для подачи электрического напряжения на один из электродов и измерения разности потенциалов на концах стержня 5 с помощью лабораторного источника тока 8 УПУ-10М. Оптический чувствительный элемент 6 устройства через оптическое одномодовое волокно 2 и циркулятор 3 соединяется с источником лазерного излучения 1 Superlum SLD-761 и оптическим спектроанализатором 7 Ibsen I-MON.

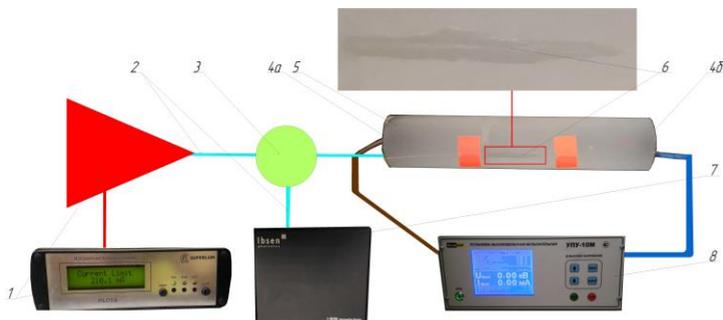


Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптический датчик контроля высоких напряжений: 1 – лазер, 2 – одномодовое оптическое волокно, 3 – циркулятор, 4а и 4б – электроды, 5 – стержень кристалла кварца, 6 – ВБР, 7 – спектроанализатор 8 – лабораторный источник тока.

В результате проделанной работы по созданию измерительного устройства было получено измерительное устройство, состоящее из кварцевого стержня, электродов и ВБР и обладающее следующими массогабаритными характеристиками: диаметр 30мм, длина 180мм и вес около 400г. Все остальные компоненты измерительной системы, такие как спектроанализатор и лазер могут использоваться для нескольких подобных трансформаторов и находиться от них на значительном расстоянии в связи, с чем их массогабаритные характеристики не учитываются в характеристиках датчика. Так же следует отметить, что полученный датчик представляет собой лабораторный образец и не

может быть использован в действующих электрических сетях, так как не имеет корпусных деталей. Соответственно в случае разработки серийного образца датчика, его габариты и масса могут значительно отличаться от представленных. Однако потенциал по габаритам заложенный в лабораторный образец позволяет предположить, что его серийный аналог будет обладать массогабаритными характеристиками лучше, чем у классических измерительных устройств.

Методика измерений. Суть метода измерения напряжения заключается в оценке разности потенциалов на электродах стержня кристалла кварца по смещению волны Брэгга [2], которое происходит вследствие деформации ВБР закреплённой вслед за деформацией кристалла кварца с частотой подаваемого тока под действием электромагнитного поля. В этой связи для определения амплитуд деформации или смещения волны Брэгга в цифровом обработчике оптического сигнала применено быстрое преобразование Фурье по 512 точкам, что позволяет построить зависимости напряжения от амплитуды смещения, представленные в главе ниже.

Анализ экспериментальных данных. На рис. 2 представлена зависимость напряжения от сдвига волны Брэгга ВБР вследствие деформации стержня в ходе проведения экспериментов на кафедре Радиотоники и микроволновых технологий КНИТУ-КАИ.

Проанализировав полученные данные можно сделать вывод о том, что разность потенциалов на электродах прямо пропорциональна амплитуде, что соответствует физическим свойствам кварца [8] и подтверждает работоспособность измерительного устройства.

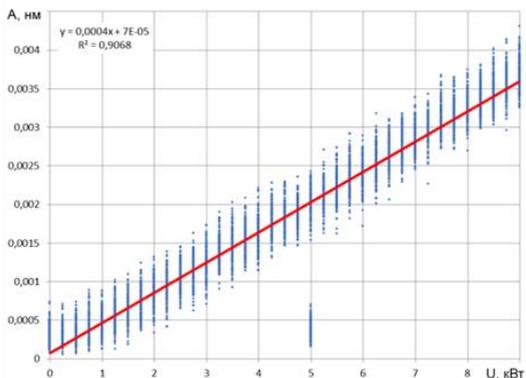


Рис. 2. Зависимость напряжения от амплитуды колебания сдвига центральной длины волны ВБР

Так же следует отметить, что подобная зависимость позволяет значительно упростить процесс калибровки датчика согласно [9].

Выводы по работе. В ходе проведения работ по разработке волоконно-оптического датчика контроля высоких напряжений был получен лабораторный образец обладающий малой массой и габаритами. В ходе испытания полученного образца были сняты показания зависимости деформации кристалла кварца от величины подаваемого напряжения. Исходя из данных полученных в ходе данного исследования можно констатировать перспективность развития подобного класса измерительных устройств.

Библиографический список

1. **Варжель, С.В.** Волоконные брэгговские решётки. СПб: Университет ИТМО, 2015. 65 с.
2. Исследование параметров волоконно-оптической линии передачи / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, А.В. Воронков, Н.А. Шишова. Самара: ПГАТИ, 2004. 65 с.
3. Волоконно-оптическая сенсорная система контроля температуры токоведущих шин / В.А. Иваненко, В.Н. Алексеев, И.А. Лобанов и др. // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. XI всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2018. С. 316-320
4. **Mukherjee B.** WDM optical communication networks: Progress and challenges // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, No 10. P. 1810-1824.
5. **Maskevich K.V., Misbakhov R.S., Morozov O.G.** Fiber optic technologies for diagnostic monitoring of digital energy grids based on 'Smart Grids Plus' concept // International russian automation conference (RusAutoCon 2018), Sochi, 09-16 September 2018. P. 551-555.
6. Волоконно-оптические технологии диагностического мониторинга как основа концепции "SMARTGRIDSPLUS" / Маскевич К.В., Морозов О.Г., Нуреев И.И. и др. // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. XI всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2018. С. 308-312.
7. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Сайт]: Минэнерго России [2009]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 010.0.12019).
8. **Zhang W., Li F., Liu Y.** Fiber Bragg grating pressure sensor with ultrahigh sensitivity and reduced temperature sensitivity // Optical Engineering. 2009. № 48(2). 024402.
9. **Нуреев И.И.** Постановка задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры // Нелинейный мир. 2015. Т. 13, № 8. С. 26-31.

УДК 536.51;531.787

ОПТОВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ШИН*

Аспирант Губайдуллин Р.Р.

Аспирант Аглиуллин Т.А.

*Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань*

***Аннотация.** В данной работе были рассмотрены существующие виды волоконно-оптических датчиков температуры, и оценены возможности их применения для контроля температуры шин и контактов. Так же была проведена работа по созданию новой конструкции волоконно-оптического датчика контроля температуры шин и контактов*

***Ключевые слова:** волоконная брэгговская решетка, ВБР, датчик температуры, высоковольтные шины, SmartGid.*

На сегодняшний день потребление электроэнергии в городах и населенных пунктах продолжает непрерывно расти, что влечет за собой развитие и усложнение высоковольтных электрических сетей. Так по данным Федеральной службы государственной статистики рост потребления электроэнергии в Российской Федерации за последние 3 года составил 5%. В этой связи все более остро встает вопрос контроля состояния энергетических сетей. Одним из основных параметров, нуждающихся в мониторинге, является температура высоковольтных шин, так как именно данный параметр используется для оценки загрузки электрической сети, а в случае выхода данной температуры за допустимые пределы может привести к нештатным ситуациям сопряженными с перебоями поставки электроэнергии и выходом из строя дорогостоящего оборудования.

Целью данной работы является создание оптоволоконного датчика контроля температуры высоковольтных шин.

Требования к датчику. Для эффективной работы системы мониторинга температуры высоковольтных шин разработанный датчик должен обладать следующими качествами:

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части Государственного задания 8.6872.2017/8.9.

1) устойчивость к электромагнитным излучениям (ЭМИ), излучаемым от высоковольтных сетей;

2) возможность организации передачи информации о состоянии высоковольтной шины на большие расстояния;

3) устойчивость чувствительного элемента и корпуса датчика к длительным тепловым нагрузкам в диапазоне от -40 до $+135$ °С и к кратковременным до $+300$ °С для медных шин при токе короткого замыкания (согласно ГОСТ 10434-82);

4) возможность организации серии датчиков в единую измерительную сеть с простой архитектурой;

5) возможность быстрого и простого монтажа датчика температуры на исследуемый объект;

6) простота обслуживания и ремонтпригодность датчика.

Большую часть поставленных выше задач, возможно, решить радиофотонными методами измерений основанных на использовании волоконных брэгговских решетках (ВБР) в качестве чувствительного элемента. Так согласно [1] ВБР мало восприимчивы к ЭМИ и радиационным излучениям, что можно считать дополнительным достоинством подобного класса чувствительных элементов и может быть полезным в электрических сетях находящихся в непосредственной близости с атомными электростанциями. На сегодняшний день технология передачи информации от ВБР на большие расстояния хорошо изучена и широко применяется в телекоммуникациях и именуется как ВОЛП – волоконно оптические линии передачи [2, 3]. Согласно ГОСТ 13659-78 верхний рабочий диапазон оптического волокна составляет $+300$ °С, а температура начала деформации кварцевого стекла по меньшей мере $+1250$ °С согласно ГОСТ 15130-86, что полностью удовлетворяет условиям работы температурного датчика. В работе [4] подробно описана классическая технология мультиплексирования ВБР в единую измерительную систему методами спектрального уплотнения каналов (WDM – Wavelength Division Multiplexing). Простота принципа мультиплексирования WDM позволяет использовать радиофотонную систему измерений в интеллектуальных сетях передачи данных о состоянии электрических сетей согласно концепциям Smart Grid и Smart Grid+ [5, 6], что согласно [7] является приоритетным направлением развития Российской экономики. Оставшиеся задачи работы связанные с обслуживанием и монтажом датчиков является основным предметом данного исследования, результаты которого представлены в главах ниже. Однако стоит отметить, что применение ВБР в качестве чувствительного элемента закладывает значительный потенциал для раз-

работки серий корпусов температурных датчиков под различные требования, так как ВБР малые габариты позволяют значительно снизить сложность создания малоинвазивных обслуживаемых датчиков тупикового и проходного типов.

Обзор аналогов. Перспективность использования радиофотонных методов измерений температуры подтверждается наличием серийных аналогов разрабатываемого датчика. В качестве ближайших аналогов были рассмотрены температурные датчики производства ООО "Инверсия-Сенсор", технические характеристики которых представлены в табл. 1 [8].

Таблица 1

**Технические характеристики температурных датчиков
ООО «Инверсия-Сенсор»**

Модель датчика	ASTRO A511	ASTRO A512	ASTRO A513	ASTRO A514
Диапазон измерения температур	-50 ... +100°C	-50 ... +80°C	-50 ... +80°C	+20 ... +150°C
Материал корпуса	Нержавеющая сталь 12X18H10T	Алюминиевый сплав Д16	Нержавеющая сталь 12X18H10T	Керамика и полиимид PTFE (Teflon)
Способ крепления	Точечной сваркой	Клеем	Анкером	-
Обслуживаемость	Неразборный	Неразборный	Неразборный	Неразборный

Проведя анализ представленных датчиков, следуют выводы о том, что:

– датчики серии ASTRO не удовлетворяют требованиям поставленной задачи, а именно: датчик A511 (рис. 1, а) имеет не удовлетворительный верхний диапазон измерения температур, а так же способ крепления (сварка) усложняющий и удорожающий монтаж сенсорной системы; датчик A512 (рис. 1, б) как и A511 имеет низкий верхний диапазон измерений, а так же ненадежный способ крепления датчика клеем к теплонагруженному телу; датчик A513 (рис. 1, в) имеет температурный диапазон аналогичный A512, а так же более предпочтительный способ крепления анкером, чем другие датчики ASTRO; датчик A514 (рис. 1, г) обладает приемлемым верхним диапазоном измерения температур для долговременных измерений, но в тоже время не

удовлетворяет по нижнему пределу, способ крепления данного датчика производитель не уточняет; все рассмотренные датчики являются неразборными и как следствие не могут удовлетворять требованиям, связанным с обслуживаемостью и ремонтопригодностью.

– в качестве наиболее подходящего материала корпуса температурного датчика можно принять нержавеющей сталь, так как датчик А511 с корпусом из данного диапазона имеет высокие верхние пределы измерения температур и в тоже время данный материал является более дешевым и доступным, чем керамика (А514);

– в отличие от рассмотренных датчиков разрабатываемый датчик должен быть разборным при этом предпочтительным способом соединения деталей корпуса является резьбовой;

– в качестве способа крепления разрабатываемого температурного датчика необходимо использовать болтовое или винтовое соединения, что должно позволить упростить монтаж сенсорной системы.

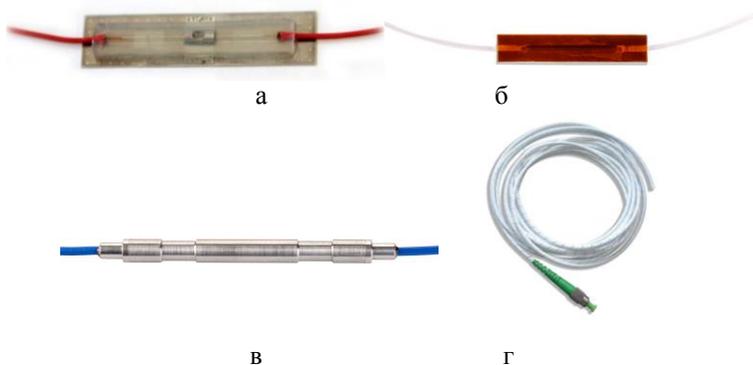


Рис. 1. Температурные оптоволоконные датчики ООО «Инверсия-Сенсор» [8]:

а – ARSTRO A511, б – ASTRO A512, в – ASTRO A513, г – ASTRO A514

Разработка температурного датчика. Основываясь на требованиях к датчику и сравнительном анализе аналогов в НИИ ПРЭФЖС при КНИТУ-КАИ был разработан оптоволоконный датчик контроля температуры высоковольтных шин (рис. 2). Датчик состоит из: оптического волокна (4б) соединённого одним концом к ВБР (4а), а другим к оптическому разъёму FC (4в) и корпуса. Корпус датчика изготовлен из нержавеющей стали и состоит из корпусной детали (2), гайки (5) и пластины (1) скрепленной с корпусной деталью винтами (3), что обесп-

печивает термическую прочность корпуса, обслуживаемость и ремонтпригодность датчика. Спроектированный корпус датчика представляет собой цилиндрическое тело с пластиной на конце. В пластине имеется отверстия (1а, 2а) для крепления датчика к шине резьбовым соединением, а так же полость (2б) для размещения ВБР и запаса оптического волокна необходимого для сварки ВБР с оптическим волокном. Нижняя плоскость пластины, контактирующая с тепло нагруженной шиной, находится ниже цилиндрической плоскости корпуса, что позволяет оптимизировать площадь контакта корпуса, тем самым сократить время реакции ВБР на изменение температуры шины. Полученный датчик температуры был откалиброван согласно методике представленной в работе [9] и испытан на заданном интервале температур.

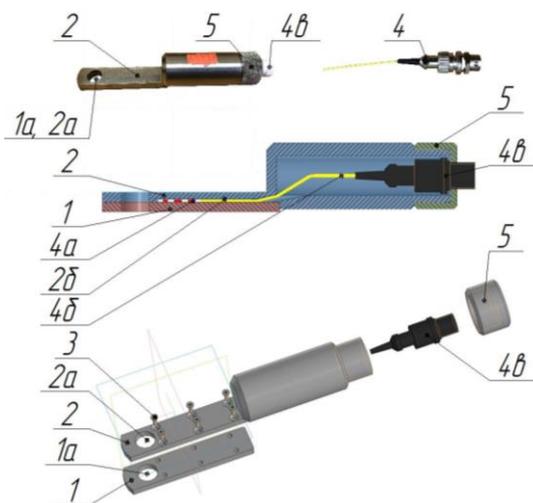


Рис. 2. Оптоволоконный датчик контроля температур высоковольтных шин:

- 1 – пластина; 1а – отверстие под резьбовое соединение в пластине; 2 – корпусная деталь; 2а – отверстие под резьбовое соединение в корпусной детали;
- 2б – полость для запаса оптического волокна; 3 – винты; 4 – оптический элемент; 4а – ВБР; 4б – оптическое волокно; 4в – оптический разъем FC; 5 – гайка

Выводы по работе. В ходе проведения работ по разработке температурного датчика высоковольтных шин был проведен сравнительный анализ существующих решений, были определены требования к

температурному датчику, была разработана конструкция корпуса оптоволоконного датчика температуры и был изготовлен опытный образец оптоволоконного датчика контроля температуры высоковольтных шин.

Библиографический список

1. **Варжель С.В.** Волоконные брэгговские решётки. СПб: Университет ИТМО, 2015. 65 с.
2. Исследование параметров волоконно-оптической линии передачи / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, А.В. Воронков, Н.А. Шишова. Самара: ПГАТИ, 2004. 65 с.
3. Волоконно-оптическая сенсорная система контроля температуры токоведущих шин / В.А. Иваненко, В.Н. Алексеев, И.А. Лобанов и др. // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. XI всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2018 С. 316-320.
4. **Mukherjee B.** WDM optical communication networks: Progress and challenges // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, No 10. P. 1810-1824.
5. **Maskevich K.V., Misbakhov R.S., Morozov O.G.** Fiber optic technologies for diagnostic monitoring of digital energy grids based on 'Smart Grids Plus' concept // International russian automation conference (RusAutoCon 2018), Sochi, 09-16 September 2018. P. 551-555.
6. Волоконно-оптические технологии диагностического мониторинга как основа концепции "SMARTGRIDSPLUS" / Маскевич К.В., Морозов О.Г., Нуреев И.И. и др. // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. XI всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2018. С. 308-312.
7. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Сайт]: Минэнерго России [2009]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 01.0.12019)
8. Датчики температуры [Сайт]: ООО «Инверсия-Сенсор» [2017]. URL: <https://i-sensor.ru/index.php/production/tochechnye-datchiki/sensors> (Дата обращения 20.06.2019).
9. **Нуреев И.И.** Постановка задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры // Нелинейный мир. 2015. Т. 13, № 8. С. 26-31.

УДК 621.3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВЕРТОРА ТОКА В ПРОГРАММЕ MATLAB/SIMULINK ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Ст. преп. Дадабаев Ш.Т.

*Худжандский политехнический институт ТТУ имени акад. М.С. Осими,
г. Худжанд, Республика Таджикистан*

***Аннотация.** Сделан анализ пусковых режимов работы высоковольтных электроприводов, а также сделан обзор негативных факторов влияющие на пуск электродвигателей большой мощности, выполнено компьютерное моделирование инвертора тока с управляемым выпрямителем, результаты моделирования приведен в виде графиков тока и напряжения.*

***Ключевые слова:** инвертор тока, выпрямитель, полупроводниковые преобразователи, высоковольтные электродвигатели, электропривод, переходной процесс.*

Сегодня все больше внимания уделяется к внедрению энергосберегающих технологий к высоковольтным электроприводам с помощью полупроводниковых преобразователей. Высоковольтные электроприводы переменного тока (ВЭПТ) используются в различных отраслях промышленности и народного хозяйства, чем обусловлено повышенной строгости требований к их качеству работы и энергоэффективности. Основная проблема при использовании ВЭПТ возникают в переходных режимах работы, как пуски и отключения. В таких режимах в электроприводе происходят динамические электромагнитные переходные процессы, повреждающие и изнашивающие электрические части оборудования [1]. К примеру, при пуске высоковольтного синхронного электродвигателя возможны следующее: отклонение напряжения, увеличение тока и момент двигателя, нагрев двигателя, потери и, в общем, уменьшение технического ресурса всего оборудования в целом [2, 3].

С развитием силовой электроники, стали доступны к использованию различные полупроводниковые преобразователи, служащие для плавного пуска и при необходимости для регулирования скорости ВЭПТ. В соответствии технологическим и техническим требованиям к ВЭПТ все чаще становится актуальным вопрос об увеличении технического ресурса электрооборудования большой мощности. С этой

целью в практике уже хорошо себя порекомендовали устройства плавного пуска (УПП), которые стоят дешевле, чем преобразователи частоты (ПЧ) в два-три раза [4, 5]. Тем не менее, использование устройств такого типа в некоторых случаях не может обеспечить максимального ограничения по току. Такая ситуация привело к необходимости исследования пуска ВЭППТ от инверторов тока. Для инверторов тока характерен то, что на его выходе формируется ток определенной формы, а форма напряжения зависит от нагрузки [6]. Для анализа работы инвертора тока необходимо провести компьютерное моделирование данного устройства. С этой целью выполнено компьютерное моделирование инвертора тока в программе Matlab/Simulink по схеме (см. на рис. 1).

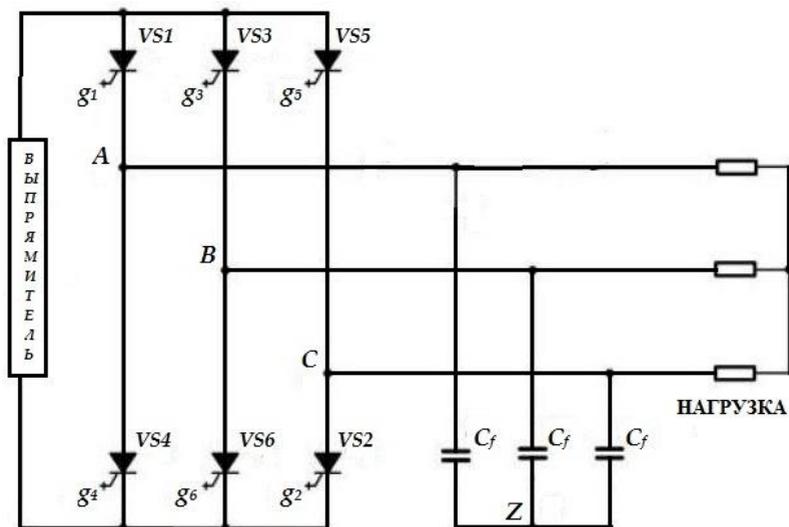


Рис. 1. Силовая схема 3-фазного инвертора тока

На основе силовой схемы (см. на рис. 1) проведем моделирование сначала управляемого выпрямителя и затем инвертора тока. Управляемый выпрямитель будет, служит как источником управляемого постоянного тока для инвертора тока. Компьютерная модель управляемого выпрямителя и графики выходных параметров выпрямителя приведены на рис. 2 и 3.

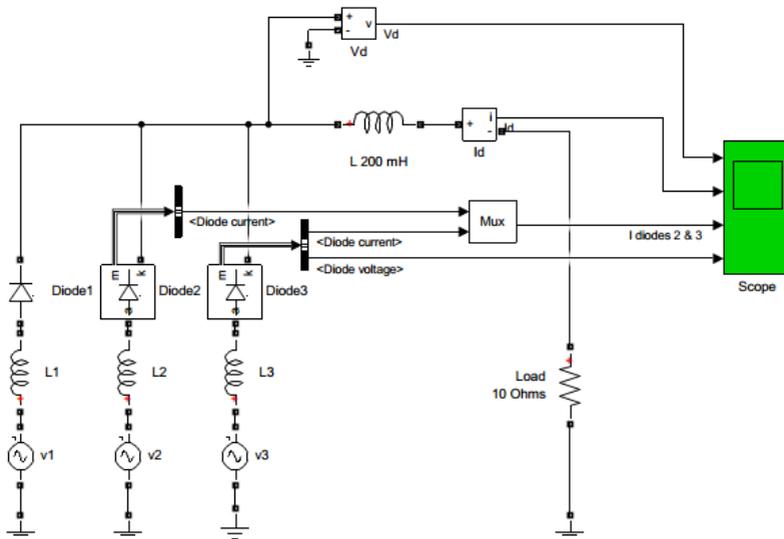


Рис. 2. Компьютерная модель управляемого выпрямителя в MATLAB

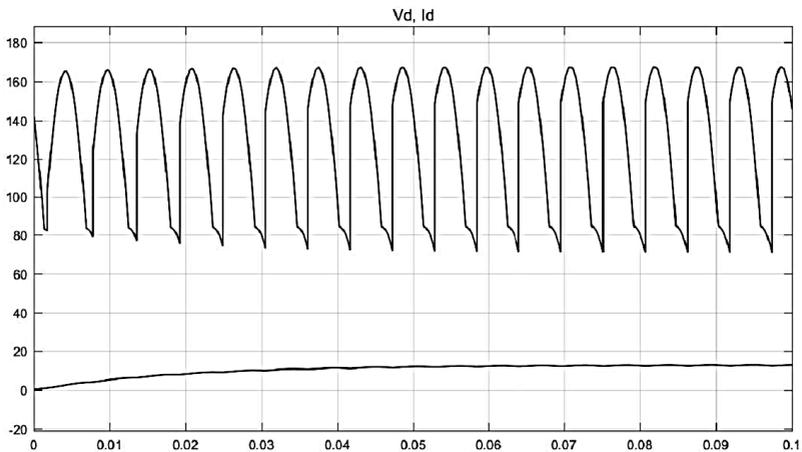


Рис. 3. Графики тока и напряжения на выходе выпрямителя

Компьютерная модель инвертора тока и графики результатов моделирования приведены на рис. 4 и 5.

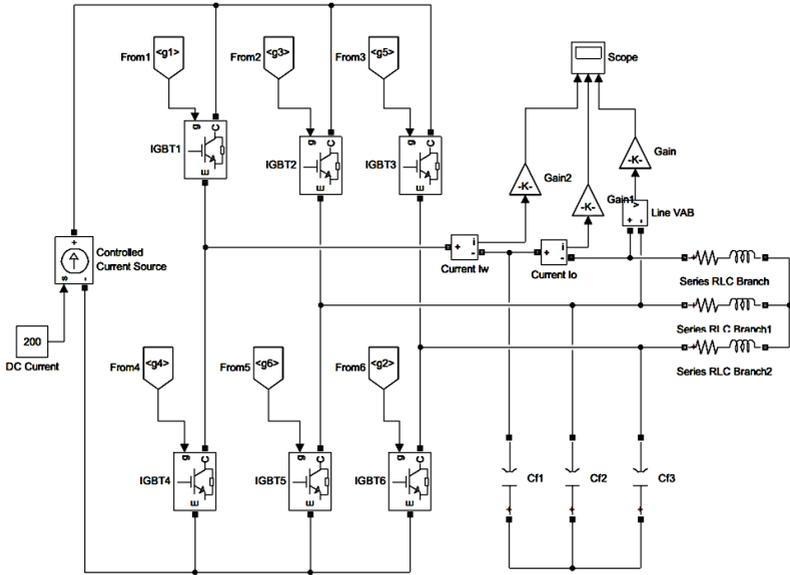


Рис. 4. Компьютерная модель инвертора тока в программе MATLAB

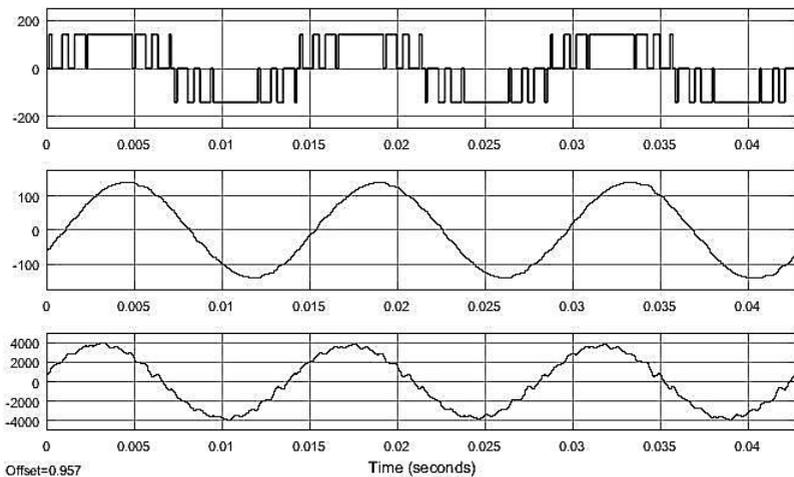


Рис. 5. Графики тока и напряжения, сформированные в инверторе тока

По результатам моделирования видно (см. на рис. 5), что токи на выходе инвертора не зависят от нагрузки и сформированы в виде последовательности разнополярных прямоугольных импульсов тока. При этом напряжение сформировано в виде синусоидальной формы, которая зависит от изменения нагрузки [6].

Инверторов тока служащие для плавного пуска ВЭППТ начали выпускать в 90-х годах прошлого века в различных компаниях по всему миру. Хорошим примером можно привести российскую компанию ООО НПП «ЭКРА», которая выпускает преобразователи на основе инвертора тока и разрабатывают система плавного пуска типа ШПТУ-ВИ [6, 7]. Данная представляет из себя тиристорный преобразователь частоты с управляемым выпрямителем и зависимым инвертором тока. Данное устройство, т.е. ШПТУ-ВИ предназначено для построения системы плавного пуска одного или группы высоковольтных электродвигателей мощностью до 17 МВт для механизмов с тяжелыми условиями пуска, а также обеспечивает автоматизированный процесс последовательных частотных пусков с ограничением пускового тока до $1,3I_{ном}$ [7]. На рис. 6 приведены графики переходных процессов электропривода при пуске с ШПТУ-ВИ [7].

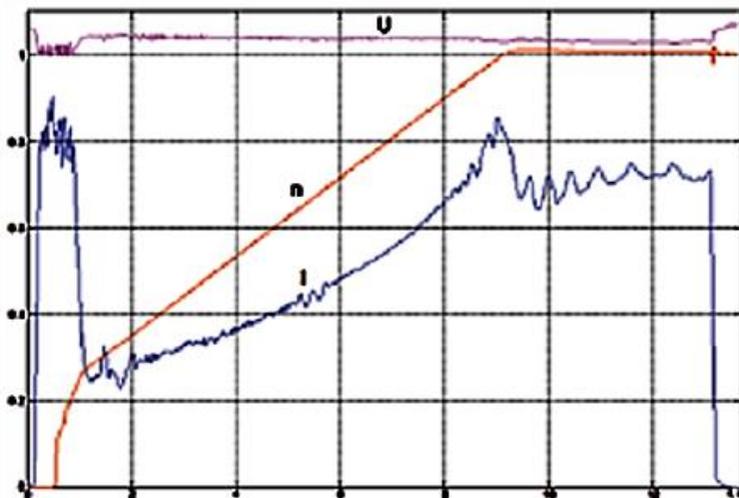


Рис. 6. Переходные процессы при пуске двигателя СТД-6300/6000-2УХЛ4 магистрального насоса перекачки нефти с помощью ШПТУ-ВИ

ВЫВОДЫ

Как показали результаты компьютерного моделирования инвертора тока и практическое применение системы плавного пуска ШПТУ-ВИ, использование преобразователей на основе инвертора тока для пусков ВЭППТ является эффективным решением. К тому же широкие возможности ограничения пусковых токов посредством инверторов тока дает увеличения технического ресурса и в итоге экономию в затратах на ремонт и обслуживание электрооборудования.

Библиографический список

1. **Дадабаев Ш.Т.** Исследование эффективности пуска высоковольтных синхронных электродвигателей при помощи инвертора тока // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 618-622.
2. **Дадабаев Ш.Т.** Компьютерное моделирование инвертора тока используемое для пуска высоковольтных электродвигателей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 370-375.
3. **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.
4. **Дадабаев Ш.Т.** Теория и практика использования инвертора тока для пуска высоковольтного синхронного электропривода // Энергетические системы: Сб. тр. III Межд. науч.-техн. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. С. 95-100.
5. **Дадабаев Ш.Т., Ларионов В.Н.** Исследования применения энергоэффективных способов управления в электроприводах с вентиляторной нагрузкой // Вестник ТТУ. 2014. № 4. 56-59 с.
6. **Лазарев С.А.** Применение инверторов тока в высоковольтном электроприводе // Экспозиция нефть газ. 2013. №4 (29). С. 78-80.
7. Устройства и системы плавного пуска и регулирования скорости электродвигателей напряжением 3-10 кВ и мощностью до 17 МВт. Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2016. 32 с.

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСЛОВНЫХ ЕДИНИЦ В ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ КОМПАНИЙ

Канд. экон. наук, доц. **Дронова Ю.В.**

Ст. преп. **Черненко Н.А.**

Студент **Тихонова Д.А.**

*Новосибирский государственный технический
университет, г. Новосибирск*

***Аннотация.** Рассматривается вопрос достоверности применения условных единиц в экономических расчетах электросетевых компаний. Последние несколько лет вопрос «необоснованности» применения у.е. и необходимости их пересмотра поднимался уже несколько раз. Анализ нормативной документации показал, что использование разных документов позволяет менять методы расчета затрат основных статей, использующих у.е. в качестве опорного показателя. Для различных видов электрооборудования сопоставление трудоемкости ТЮиР показывает расхождение значений при использовании различных нормативно-методических документов в несколько раз. Величина отклонения трудозатрат, обусловленная разницей в периодичности и трудоемкости, приводит к значительному искажению результата в части формирования показателей КПЭ. В условиях ценообразования с использованием бенчмаркинга эти расхождения могут стать инструментом манипуляций со стороны энергокомпаний.*

***Ключевые слова:** условные единицы ремонта, бенчмаркинг, трудоемкость и периодичность ремонта.*

Введение. Понятие «условной единицы» (у.е.) оборудования применяется при расчете большого количества показателей деятельности электросетевых компаний.

Появление этого показателя было связано с необходимостью расчета численности персонала, затрат на обслуживание сетевого оборудования, при этом использовать в качестве основы показатели мощности или длины ЛЭП было невозможно из-за значительных отличий в структуре оборудования отдельных предприятий электрических сетей.

Современная система ценообразования также в части расчетов опирается на использование этого понятия. Однако, большая часть нормативно-правовой базы, определяющей применение условных единиц, в настоящее время либо морально устарела, либо имеет статус

«недействующих документов». Это приводит к возникновению возможности изменять расчетные значения в соответствии с целями компании.

Понятие «условной единицы» оборудования электрических сетей. Условная единица – это оценка определенной трудоемкости труда безразмерным коэффициентом (единицей). Первые документы, определяющие понятие условной единицы относят к 1960 году. За 1 у.е. были приняты затраты труда на эксплуатацию 1 км одноцепной ВЛ 110 – 154 кВ на металлических и железобетонных опорах. Структура объемов обслуживания в условных единицах по объектам электрических сетей (ЛЭП и подстанциям) соответствовала структуре эксплуатационного персонала, а число условных единиц на 1 человека производственного персонала – удельная загрузка по объектам электрических сетей всех классов напряжения – была примерно одинаковой [1].

С течением времени нормативы подвергались неоднократной коррекции на основе регулярно проводимого анализа фактической численности персонала электрических сетей. После реструктуризации отрасли такой анализ практически перестал выполняться, компании получили частичную самостоятельность при определении структуры персонала, все это привело к возникновению разрывов между фактической трудоемкостью обслуживания электрооборудования сетей и нормативной численностью.

Об этой проблеме упоминается в статье Гольберг Ф.Л, где в качестве альтернативы действующим условным единицам предлагается принятие «объемообразующих единиц», разработанных ОРГРЭС [1]. В 2008 приказом № 162 компания ОАО «ФСК» принимает эти единицы к расчету [2]. Однако другие электросетевые компании продолжают работать с условными единицами.

В настоящее время в РФ отсутствует нормативно-правовой документ, закрепляющий это понятие. В литературе можно встретить следующие определения:

– число условных единиц на 1 человека производственного персонала – удельная загрузка по объектам электрических сетей всех классов напряжения $1 \text{ Е.О.} = 40 \text{ ч} \cdot \text{ч}$ [1];

– число условных единиц определяет трудозатраты на проведение одного ремонта данного вида на принятый измеритель [3];

– количество условных единиц – это показатель, характеризующий затраты живого труда, выраженные в рабочем времени, затраченном на производство продукции (услуг) [4].

В части применения у.е. сегодня используют различные нормативно-правовые акты, среди которых:

- Приказ Госстроя РФ от 03-04-2000 № 68, определяющий расчет численности персонала для ремонта и технического обслуживания [5];
- Приказ Федеральной службы по тарифам от 6 августа 2004 г. № 20-э/2 [6];
- Руководящий документ РД 39-0148311-601-88 [7];
- Методические указания по разработке технологических карт и проектов производства работ по техническому обслуживанию и ремонту ВЛ, СТО 56947007-29.240.55.168-2014 [8].

Применения у.е. для оценки показателей эффективности деятельности сетевой компании. В связи с переходом системы ценообразования на новый порядок формирования НВВ на основе Методики комплексного определения показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства (утв. постановлением Правительства РФ от 19 декабря 2016 г. № 1401) сетевые компании вынуждены использовать систему бенчмаркинга или метода лучших практик. Для организации данного подхода Минэнерго начиная с 2016 года инициировало сбор данных.

Перечень этих показателей достаточно обширен при этом часть из них рассчитывается относительно количества у.е. на электросетевом объекте, а часть учитывает это количество опосредованно. К показателям, рассчитываемые на основе количества условных единиц, относят в первую очередь затраты на техническое обслуживание и ремонт, которые составляют самую существенную статью расходов любой сетевой компании. На рис. 1 представлен рейтинг электросетевых компаний по удельным затратам на ТОиР.

Зеленым цветом выделены эффективные компании, а красным неэффективные. Средняя линия показывает значение, которое будет устанавливаться как целевое для всех компаний. Однако вопрос расчета затрат на ТОиР остается методически не проработанным.

Анализ достоверности показателей у.е. Для оценки достоверности расчета ключевых показателей деятельности электросетевых компаний сопоставим различные значения, используемые для расчета трудоемкости по некоторым типам электрооборудования. Основой для расчета трудоемкости в соответствии с действующей нормативно-технической документацией являются разработанные внутри организации технические документы, определяющие условия и содержание работ по обслуживанию электрооборудования.

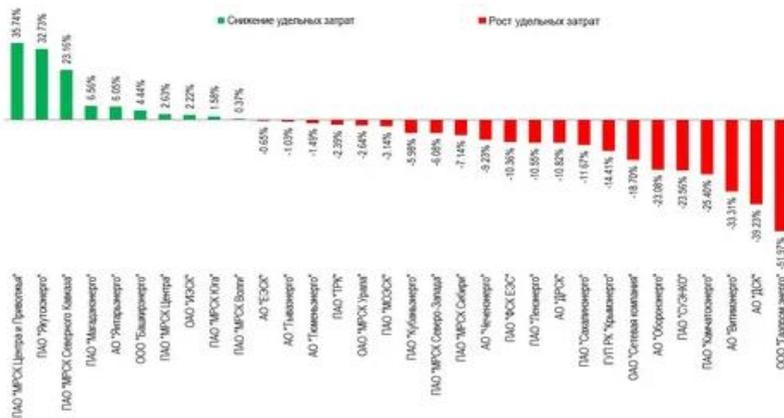


Рис. 1. Рейтинг электросетевых компаний по удельным затратам на Т&ОиР (по данным Минэнерго)

В соответствии с утвержденными в рамках Приказа Минэнерго России от 25.10.2017 №1013 «Правилами организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики» для повышения надежности при эксплуатации объектов электроэнергетики, а также с целью увеличения продолжительности межремонтных периодов и для обеспечения качества работ по техническому обслуживанию и ремонту, субъекты электроэнергетики разрабатывают и утверждают Стандарты организаций по техническому обслуживанию и ремонту объектов электроэнергетики или единицы оборудования электрических сетей.

Предусматривается возможность проведения как планово-предупредительного ремонта, так и ремонта по техническому состоянию. Стандарт разрабатывается в строгом соответствии с действующими законодательными актами, техническими требованиями нормативных документов, локальными актами организации. Основной формой технической документации, отражающей весь процесс технического обслуживания или ремонта объекта электроэнергетики является технологическая карта на техническое обслуживание и ремонт. Технические нормы и требования, методики и рекомендации, учитываемые при составлении технологических карт, должны отражать основные положения технической политики организации, многолетний опыт проведения технического обслуживания и ремонтов, как в своей организации, так и в других организациях, учитывать особенности эксплу-

атируемого оборудования, срок службы, техническое состояние и остаточный ресурс, как всего оборудования, так и отдельных элементов и узлов, требования конструкторской документации предприятий-изготовителей, а также учитывать требования охраны труда и правил безопасности.

Технологическая карта содержит в себе следующие разделы:

– меры и условия безопасного выполнения работ (отражаются опасные производственные факторы на рабочем месте, перечисляются мероприятия по пожарной безопасности, указываются экологические требования к производству работ);

– организация выполнения работ (перечисляются наименование и количество защитных средств и одежды, инструмента и приспособлений, материалов и запасных частей, механизмов необходимых механизмов, а также перечисляется состав бригады с указанием должности, группы по электробезопасности, количества человек и их квалификационных признаков);

– технология производства работ (приводится порядок производства работ, включающий в себя операции, как организационного характера (начало и окончание работ), так и технологического (осмотры, проверки, основные работы по техническому обслуживанию или ремонту, испытания и измерения) с указанием исполнителя, группы по электробезопасности, количества человек, нормы времени на отдельную операцию в ч·ч).

Таким образом, на каждую единицу оборудования электрических сетей составляется технологическая карта, как на техническое обслуживание, так и на ремонт. Трудоемкость выполняемых работ по технологической карте является интегральным показателем и определяет перечень производимых операций в рамках ТОиР.

В табл. 1 представлены нормы трудоемкости (ч·ч) на ремонт силового трансформатора на класс напряжения 6(10) кВ мощностью 1000 кВ·А с масляным охлаждением типа ТМ-1000/6(10), взятые из технологических карт различных электросетевых компаний.

Таблица 1

Нормы трудоемкости для текущего ремонта силового трансформатора в разных электросетевых компаниях

Номер электросетевой компании	1	2	3	4
Нормы трудоемкости на текущий ремонт ТМ-1000/6(10), ч·ч	19,7	42	24	17

Значительные отличия связаны с использованием в качестве руководящих документов при разработке технологических карт различную нормативно-техническую документацию. В качестве примера в табл. 2 приведены нормы трудоемкости на ТОиР для различного типа оборудования по нескольким методическим документам. В табл. 3 приведены периодичности ремонтных воздействий по тем же единицам оборудования с указанием источника этих показателей. В табл. 4 приведены результаты сопоставления трудозатрат на ТОиР и пересчета. Как показывает анализ, расхождение между разными подходами может быть значителен, при этом такие расхождения наблюдаются практически по всем типам электрооборудования.

Таблица 2

Нормы трудоемкости ТОиР по разным методическим документам для текущего ремонта, ч·ч

Тип электрооборудования	Метод расчета		
	СТО 56947007-29.240.55.168-2014 [8]	Справочник [9]	РД-39-0148311-601-88 [7]
Воздушные линии до 1000 В на металлических и железобетонных опорах	6	8	6
Кабельные линии до 10 кВ	23	21	23
Трансформаторы трехфазные двухобмоточные масляные напряжением до 10 кВ	18	–	5,2
Выключатель масляный 35-110 кВ	7	–	7,2

Таблица 3

Нормы периодичности ТОиР по разным методическим документам для текущего ремонта, мес.

Тип электрооборудования	Метод расчета		
	СТО 56947007-29.240.55.168-2014 [8]	Справочник [9]	РД-39-0148311-601-88 [7]
Воздушные линии до 1000 В на металлических и железобетонных опорах	36	36	72
Кабельные линии до 10 кВ	24	12	72
Трансформаторы трехфазные двухобмоточные масляные напряжением до 10 кВ	36	-	24
Выключатель масляный 35-110 кВ	12	-	24

Таблица 4

Нормы трудоемкости ТООиР по разным методическим документам

Тип электрооборудования	Пересчет в у.е. в соответствии с приказом ФСТ № 20-э/2 [6], у.е.	Полная трудоемкость ТООиР, ч·ч		Максимальная разница, ч·ч
		СТО 56947007-29.240.55.1 68-2014 [8]	РД-39-0148311-601-88 [7]	
Воздушные линии до 1000 В на металлических и железобетонных опорах	200	216	432	232
Кабельные линии до 10 кВ	350	529	1656	1306
Трансформаторы трехфазные двухобмоточные масляные напряжением до 10 кВ	-	648	124,8	523,2
Выключатель масляный 35-110 кВ	23	84	172,8	149,8

Моделирование расчета показателей эффективности с использованием различных методических документов. Для иллюстрации возможного искажения результатов расчета ключевых показателей за счет использования различных методик определения затрат на ТООиР проведен расчет для реального участка электрических сетей.

В табл. 5 приведен перечень электрооборудования реального участка электрических сетей и определены годовые трудозатраты, как в ч·ч [8], так в у.е. [6].

Расчеты показали, что пересчет суммарной трудоемкости обслуживания одной единицы оборудования меняется от 1 ч·ч до 11 ч·ч. Разброс отклонений показан на рис. 2.

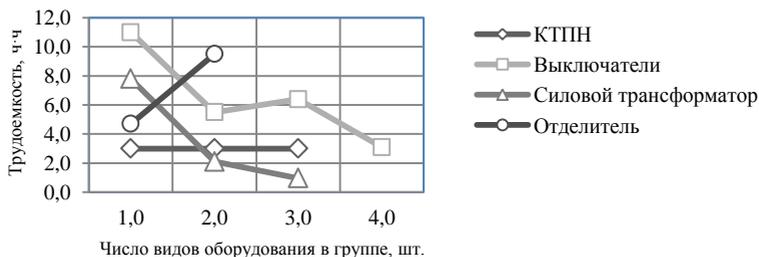


Рис. 2. Расчет количества ч·ч в 1 у.е. по группам электрооборудования

Таблица 5

Трудоемкость обслуживания по видам оборудования

Вид электрооборудования	U, кВ	Количество, шт. (ед.)	Трудозатраты в год	
			СТО 56947007-29.240.55.168-2014 [8], ч·ч	Приказ ФСТ № 20-э/2 [6], у.е.
Комплектная трансформаторная подстанция (2-х трансформаторная)	110/35/6	3	72	9
	35/6	19	380	57
Комплектная трансформаторная подстанция	35/6	5	80	15
Выключатели воздушные	35	50	460	550
	6(10)	555	2608,5	3052,5
Выключатели масляные	35	47	352,5	300,8
	6(10)	254	2997,2	787,4
Трансформатор силовой масляный	110/35/6	6	376,8	46,8
	35/6(10)	43	1982,3	90,3
	6(10)/0,4	685	15549,5	658
Отделитель с короткозамыкателем	110	10	177	47
	35	68	1067,6	646
ИТОГО		1745	26103,4	6259,8

Выводы по работе. Применение различных методических подходов для расчета затрат на ТОиР и оценка величины удельных затрат в у.е. значительно различаются в зависимости от вида используемого документа. Это дает возможность энергокомпании в соответствии с ее целями манипулировать при проведении расчетов, завышая или занижая абсолютное значение затрат и НВВ. Применение бенчмаркинга возможно только при наличии точных и единообразных методических указаний, если они отсутствуют, то использовать для расчета КПЭ сопоставление показателей невозможно.

В настоящее время электросетевые компании, в особенности, те которые могут использовать отраслевые методические документы (энергосервисные компании нефтяной, газовой отрасли) могут при формировании затрат на ТОиР использовать внутреннюю отраслевую документацию или методические документы Минэнерго. Различия в расчетах могут достигать 10-кратного значения, что в конечном итоге приведет к увеличению/снижению НВВ, и в конечном итоге тарифу на услуги по передаче энергии.

Необходима разработка новых нормативно-методических документов для определения трудоемкости и периодичности по ТООР. Использование действующей нормативной базы не позволяет достоверно реализовать бенчмаркинг при оценке эффективности деятельности электросетевых компаний.

Библиографический список

1. **Гольберг Ф.Л.** Система объемообразующих показателей и ее применение в ЕНЭС // Энергетик. 2008. № 4. С. 7-10.
2. Приказ ОАО «ФСК ЕЭС» № 162 от 30.04.2008 «Об утверждении Методических рекомендаций по расчету трудозатрат (численности) производственного персонала на вновь вводимые и реконструируемые объекты» [Электронный ресурс]. URL: http://www.fsk-ees.ru/media/File/customers_tech/Prikaz_30.04.2008_162.rtf
3. **Афанасьев Н.А., Юсипов М.А.** Система технического обслуживания и ремонта оборудования энергохозяйств промышленных предприятий (система ТОР ЭО). М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
4. **Полевой Г.П.** Трудоемкость работ в сельском хозяйстве и пути его снижения // Нормирование и тарификация труда. 2014. № 11. С. 36-39.
5. Приказ Госстроя РФ № 68 от 03.04.2000 «Об утверждении рекомендаций по нормированию труда работников энергетического хозяйства. Часть 3. Нормативы численности работников коммунальных электроэнергетических предприятий» [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=132303>.
6. Приказ федеральной службы по тарифам от 06.08.2004 № 20-э/2 «Об утверждении методических указаний по расчету регулируемых тарифов и цен на электрическую (тепловую) энергию на розничном (потребительском) рынке» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/187460/>.
7. Руководящий документ РД 39-0148311-601-88 «Положение о системе технического обслуживания и ремонта электроустановок в добыче нефти и бурении. Часть 1. Общие положения. Электрооборудование и линии электропередачи». [Электронный ресурс]. URL: https://standartgost.ru/g/pkey-14293794505/РД_39-0148311-601-88.
8. СТО 56947007-29.240.55.168-2014. Методические указания по разработке технологических карт и проектов производства работ по техническому обслуживанию и ремонту ВЛ. [Электронный ресурс]. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2014. URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.55.168-2014.pdf.
9. **Яшура А.И.** Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования: Справочник. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2006. 503 с.

УДК 620.9

СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

Магистрант Елисеев А.А.

Канд. техн. наук, доц. Шмелёв В.Е.

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

***Аннотация.** Изложены требования к диагностическим приборам изоляции высоковольтного электрооборудования цифровых подстанций. Особое внимание уделено применению метода частичных разрядов в средствах диагностики. Представлен разработанный портативный и стационарный прибор цифровой регистрации частичных разрядов.*

***Ключевые слова:** обмен информацией, стандарты серии МЭК 6185, направленные антенны, частичные разряды, мониторинг.*

Применение современных средств цифровой и аналоговой электроники в электроэнергетике позволяет создавать новые энергетические объекты – цифровые подстанции (ЦПС). Отраслевой стандарт [1] даёт следующее определение: «ЦПС – это подстанция (ПС) с высоким уровнем автоматизации, в которой процессы информационного обмена между элементами ПС, а также управление работой ПС осуществляются в цифровом виде на основе стандартов серии МЭК 61850, объединенными общим наименованием "Сети и системы связи на подстанциях». С точки зрения технической реализации ЦПС – это сложный объект, объединяющий первичное технологическое оборудование со средствами телемеханики (ТМ) (телеизмерение (ТИ), телесигнализация (ТС), телеуправление (ТУ)). Средства ТИ измеряют и передают на диспетчерский пункт (ДП) режимные параметры ПС и соответствующей сети, а также диагностические параметры первичного оборудования. Средства ТС передают на ДП логические сигналы о различных нештатных ситуациях. Средства ТУ принимают от ДП управляющие воздействия.

Одной из важных особенностей ЦПС является практическое отсутствие гальванических связей между первичным технологическим оборудованием, а также средствами ТИ, релейной защиты и автоматизации (РЗА). В современных ЦПС в системах ТМ вместо электрических каналов связи применяются волоконно-оптические. Это весьма полезно с точки зрения электромагнитной совместимости, безопасно-

сти труда, компактности ЦПС, снижения затрат на строительномонтажные и пусконаладочные работы, а также на обслуживание подстанции в период эксплуатации [2]. В перспективе ЦПС должны стать ключевыми компонентами «интеллектуальных электрических сетей с активно-адаптивными связями» (по западноевропейской концепции – SmartGrid). Показательный пример – ЦПС «Медведевская-110/20 кВ», питающая объекты центра «Сколково», введённая в эксплуатацию в июне 2018 года. Также в течение октября 2019 года планируется завершение строительства ЦПС «Порт -220 кВ» в Тамани для питания контактной сети железнодорожной части Крымского моста.

На первой из названных ЦПС установлено новое электрооборудование отечественного производства: силовые трансформаторы (два по 80 МВА); комплектное распределительное устройство (КРУ) 110 кВ с элегазовой изоляцией полностью российского производства; 4-секционное распределительное устройство 20 кВ с вакуумными выключателями, рассчитанное на 20 линейных ячеек; комплекс РЗА, выполненный на микропроцессорных терминалах.

Главный принцип проектирования и построения современных ЦПС – применение в составе ТИ таких диагностических средств диагностики первичного оборудования, которые могли бы длительно и надёжно работать без снятия рабочего напряжения. Диагностируемое первичное электрооборудование – трансформаторы (силовые и измерительные), реакторы (шунтирующие и токоограничивающие), элегазовые распределительные устройства и коммутационная аппаратура классов напряжения 6-750 кВ. Режимные и диагностические устройства ТИ, ТС должны поддерживать протокол МЭК 61850-8-1. Диагностические средства традиционных ПС не удовлетворяют названному принципу и стандартам МЭК [3]. Непрерывный диагностический мониторинг позволяет в реальном времени обнаруживать недопустимые изменения параметров свойств элементов (главным образом – изоляции) первичного оборудования и другие нештатные ситуации и своевременно передавать информацию об этом на ДП, что обеспечивает время на выполнение ремонтно-профилактических мероприятий.

Цель работы: Замена традиционных методов диагностики мониторингом без потери информации о текущем техническом состоянии оборудования для снижения времени нахождения человека в опасных зонах ЦПС.

Методы диагностики (мониторинга), основанные на вычислительном анализе электромагнитных шумов называют «электрошумовыми» [4]. Цифровой анализ статистическими методами во временной

области, спектральными методами и с применением вейвлет-разложений. Особенно эффективны эти методы для обнаружения дефектов изоляции. Физически шумы возникают вследствие случайных местных пробоев на локальных неоднородностях структуры диэлектриков, где концентрируется распределение напряжённости электрического поля (микрообласти с пониженной диэлектрической проницаемостью) и снижена электрическая прочность. Такие местные пробои называются частичными разрядами (ЧР). Диагностическими признаками состояния изоляции являются: частота ЧР и статистические распределения их кажущихся зарядов [5] (обычно это диапазон от 0,1 до 100 нКл). Цифровые средства диагностики (мониторинга) установлены на ЦПС «Медведевская» (рис. 1). В России ведущие позиции в сфере диагностики ЦПС методом ЧР занимает пермская компания. Для ЦПС разработан мониторинговый комплекс TDM (Transformer Diagnostics Monitor), а также переносной многоканальный прибор R2200, предназначенный для регистрации и анализа частичных разрядов в изоляции различного высоковольтного оборудования [6].



Рис. 1. Внешний вид цифровых средств диагностики: а) без визуализации текущих процессов; б) с визуализацией

Электромагнитные импульсы от ЧР распространяются в окружающее пространство и могут быть первично восприняты антеннами. Российские компании производят направленные антенны, чувствительные к электромагнитным излучениям частотного диапазона 3 МГц – 30 ГГц, для стационарного монтажа на элегазовом оборудовании ЦПС (рис. 2).

Существующие стационарные систем мониторинга обладают очевидными недостатками, связанными с жёстким заданием мест компоновки датчиков, многократным дублированием однотипных систем мониторинга на ЦПС, сложностью переналадки систем на диагностику новых видов оборудования

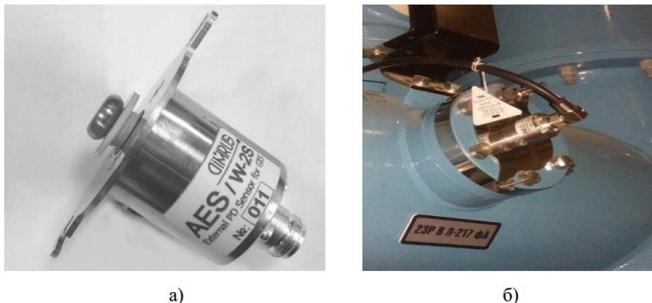


Рис. 2. Внешний вид узконаправленных антенн: а) AES/W-2S; б) стационарная антенна 23P В Л-217 ФА

. Поэтому авторами разрабатываются переносные цифровые диагностические приборы, в которых в качестве сенсоров применены упомянутые выше антенны (рис. 3) [6, 7].



Рис. 3. Разработанный переносной прибор

Опытные образцы этого прибора испытаны на КРУЭ 110 кВ подстанции «Медведевская 100/20 кВ». Прибор позволяет определять усреднённое за полупериод сетевого напряжения (10 мс) значение кажущихся зарядов ЧР. Диагностика проводится оператором вручную через радиопрозрачные вставки КРУЭ.

Разработан также стационарный вариант средства диагностики (мониторинга) изоляции [8], реализующий метод частичных разрядов. Поскольку стационарные средства в большинстве случаев располагаются в ближней зоне излучения, в этом приборе чувствительные элементы – не антенны, а бесконтактные индуктивный и ёмкостный датчики, сигналы на выходе которых подвергаются цифровой обработке. В [8] это вычисление скалярного произведения сигналов с датчиков, по значению которого определяется, был ли за измерительный интервал времени частичный разряд и какова его ампер-секундная площадь.

Переносной (мобильный) прибор всегда работает на безопасном расстоянии от высоковольтного оборудования (до 50 м). В этом случае нижняя часть анализируемого спектра излучений соответствует ближней или средней зоне излучения, а верхняя – дальней зоне. Из-за этого форма сигнала, подаваемого на вход цифрового анализатора, зависит от конструкции антенны. Соответствующие исследования проводятся авторами в настоящее время.

Выводы по работе: В данной работе обоснована необходимость перехода от традиционных методов диагностики к непрерывному мониторингу. Особое внимание было уделено электрошумовым методам, позволяющим обнаружить быстроформирующиеся микродефекты изоляции высоковольтных аппаратов и распределительных устройств высокого напряжения. Также был представлен образец переносного цифрового диагностического прибора для регистрации частичных разрядов, который имеет преимущество перед стационарными системами мониторинга, главным недостатком которых является жёсткая заданность количества и мест расположения датчиков.

Библиографический список

1. СТО 56947007-29.240.10.248.-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ [Электронный ресурс]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.10.248-2017_.pdf.
2. **Сви П.М.** Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
3. **Михеев Г.М.** Цифровая диагностика высоковольтного оборудования. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. 304 с.
4. **Хомяков М.В.** Метод измерения частичных разрядов. // Электро. 2008. № 9.
5. **Вдовико В. П.** Частичные разряды в диагностике высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 356 с.
6. **Елисеев А.А.** Современные приборы для диагностики высоковольтного оборудования методом частичных разрядов. // Дни науки студентов ВГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых: Сб. мат-лов науч.-практ. конф. Владимир, 2018. С. 754-759.
7. Патент РФ на изобретение № 2511607, МКП G01R 33/12. Способ электрошумовой диагностики высоковольтного оборудования / В.А. Шахнин, Ю.С. Чибрякова; опубл. 2014, Бюл. № 10.
8. Патент Р.Ф. № 2434236, МКП 001Я 31/12. Способ диагностики высоковольтного оборудования / В.А. Шахнин, О.И. Моногаров; опубл. 20.11.2011., Бюл. № 32.

УДК 620.9

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Канд. техн. наук, доц. **Зарипов Д.К.**

Канд. техн. наук **Балобанов Р.Н.**

*Казанский государственный энергетический
университет, г. Казань*

***Аннотация.** В данной статье приводятся результаты моделирования в программе COMSOL Multiphysics работы изолятора с индикатором. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность светодиодной индикации дефекта изолятора с помощью устройства, созданного на основе бесконтактного метода.*

***Ключевые слова:** компьютерное моделирование, устройство контроля, высоковольтные изоляторы, воздушные линии, индикатор.*

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%. Поэтому создание устройств контроля состояния изоляторов ВЛ является актуальной.

Цель работы: произвести моделирование работы индикатора состояния высоковольтных изоляторов в программной среде COMSOL Multiphysics.

Содержательная часть. Установка оптических излучателей, сигнализирующих о наличии дефекта, на изолирующие конструкции в заранее определенных и доступных для наблюдения местах позволяет также дистанционно диагностировать дефекты в условиях перемещения регистрирующего устройства. Поскольку положение излучателя на изолирующей конструкции известно, то упрощаются алгоритмы автоматического выявления дефектов.

Принцип действия оптического индикатора: при нарушении отдельных частей изоляционной конструкции, распределение электрического поля вдоль неё изменяется. Разность потенциалов на поврежденном участке уменьшается, а напряжение в неповрежденной части конструкции увеличивается. Обнаружение дефекта возможно по интенсивности свечения индикатора. Она зависит от падения напряжения на его электродах и протекающего тока.

На рис. 1 упрощенно показана работа светового индикатора, внесенного в область действия переменного электрического поля вблизи изолятора, подвешенного на металлической опоре [1]. На рис. 1 схематично указан электрод (1) и электрическая связь индикатора с металлическими элементами конструкции. С – емкость электрода индикатора относительно высоковольтной части конструкции.

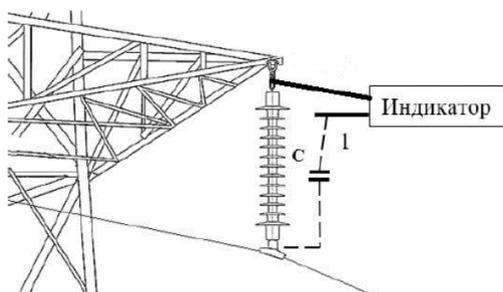


Рис. 1. Индикатор в электрическом поле вблизи изолятора.

Индикатор работает без использования отдельного источника питания на принципе накопления энергии электрического поля. Для эффективности такого устройства необходимо, чтобы во время накопления энергии как можно меньшая ее часть терялась. Поэтому выработка критериев для подбор элементов схемы индикатора с минимальными токами утечки является принципиальной. Это было первой задачей, поставленной при моделировании.

Второй задачей при компьютерных расчетах была оценка возможности визуального обнаружения появления дефекта изоляции на различных типах изоляторов по изменению напряжения на индикаторе, а значит и изменению частоты мигания светодиодов.

Расчеты проводились в программе конечноэлементного моделирования COMSOL Multiphysics [2-7] путем построения и анализа

трехмерных моделей изоляторов ЛК70/35 и ЛК70/110 с установленным на них одним и тем же индикатором.

Моделирование работы изолятора ЛК70/35 с индикатором. В данной части работы прежде всего решалась задача оценки требований к конструкции и электронным компонентам индикатора. Однако разработанная модель послужила основой и может быть использована для оценки возможностей индикатора по назначению в целом для воздушных линий 35 кВ.

Вначале, в программе COMSOL была прорисована трехмерная модель изолятора (рис. 2).

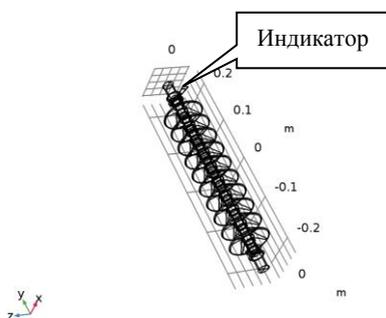


Рис. 2 Геометрия трехмерной модели изолятора ЛК70/35 с установленным на верхнем оконцевателе индикатором

На рис. 3 отдельно выделен участок изолятора с индикатором, установленным на оконцевателе.

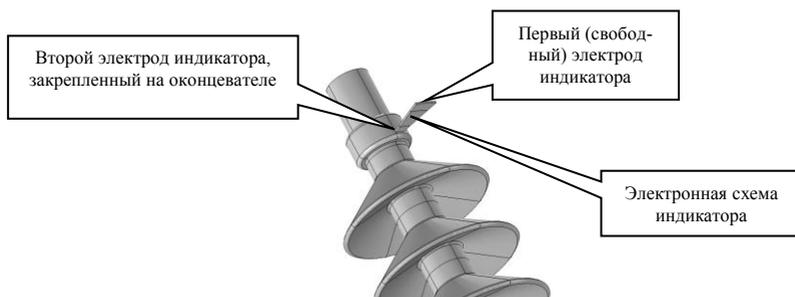


Рис. 3 Индикатор, прикрепленный к оконцевателю.

Моделировалась ситуация, когда изолятор находится в воздухе, на оконцеватели изолятора подается фазное напряжение 20 кВ (35 кВ/1,7), амплитудное значение которого $U_0 = 28$ кВ. Был проведен параметрический расчет, где в качестве параметра использовалось значение сопротивления схемы индикатора Ri . Сама электронная схема индикатора моделировалась полоской полупроводящего материала, торцами упирающегося в два электрода, один из которых закреплен на заземленном оконцевателе (рис. 4). Изменяемый параметр Ri пересчитывался в значение удельной проводимости материала полупроводящей полоски G из известной формулы

$$Ri = \frac{1}{G} \frac{l}{S},$$

где l – длина схемы, м; S – площадь сечения полоски в средней части, m^2 .

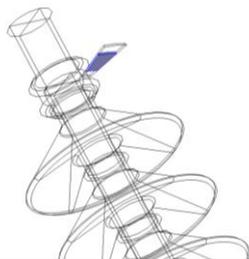


Рис. 4 Полоска с электронной схемой индикатора между электродами 1 и 2

Уравнение, по которому программа COMSOL Multiphysics производила расчеты, получается из закона Ома, уравнения непрерывности и теоремы Гаусса. Для синусоидального тока с угловой частотой $\omega=2\pi f$ и изотропной среды эти выражения запишутся в виде

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E};$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = -j\omega \rho;$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho;$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \cdot V; \mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E};$$

где $\mathbf{J}, \mathbf{E}, \mathbf{D}$ – векторы плотности тока (A/m^2), напряженности электрического поля (В/м) и электрического смещения ($Kл/m^2$) соответственно; σ – удельная проводимость (См/м); ρ – объемная плотность заряда

(Кл/м³); ε - диэлектрическая проницаемость материала; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; j - мнимая единица.

После подстановки выражений для E и ρ в уравнение непрерывности получается уравнение Пуассона вида $\nabla \cdot (-c \nabla V) = f$ из набора математических уравнений, решаемых программой COMSOL Multiphysics.

$$\nabla \cdot (-(\sigma + j\omega\varepsilon\varepsilon_0) \cdot \nabla V) = 0$$

Далее были установлены электрические характеристики материалов для каждой из областей (доменов) (рис. 5) на примере области изоляции. Также были заданы граничные условия для потенциала, «земли» и границы расчетной области.

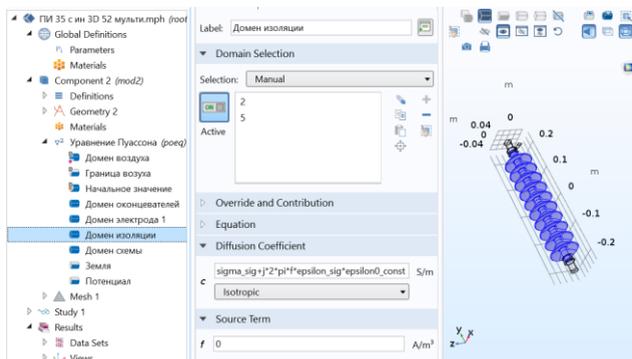


Рис.5 Задание исходных данных для одной из областей (домена)

В соответствии с методом решения уравнения программа COMSOL Multiphysics разбила область вычисления на конечные элементы (рис. 6).

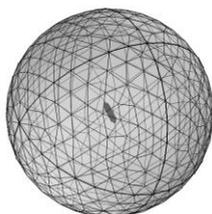


Рис. 6 Разбиение области вычисления на конечные элементы

Параметрический расчет произведен для значений сопротивления утечки R электрической схемы индикатора: 1 МОм, 10 МОм, 100 МОм и 500 МОм. На рис. 7 изображено распределение напряжения вдоль изолятора в псевдоцветах. Тоже распределение в виде одномерного графика изображено на рис. 8. На нем видно характерное увеличение градиента потенциала при приближении к оконцевателям. Наиболее важный результат отображен на графике (рис. 9).

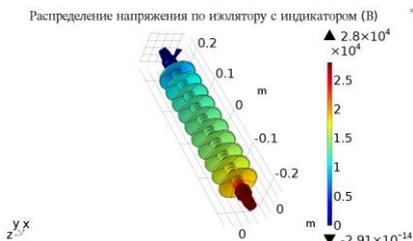


Рис. 7 Распределение напряжения на изоляторе в цвете

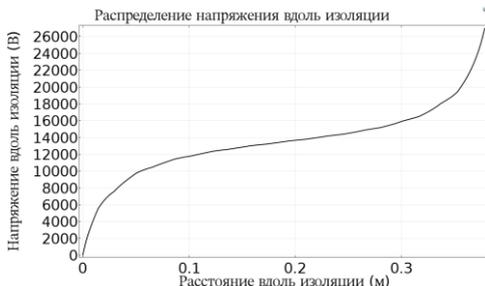


Рис. 8 График роста напряжения на изоляторе от заземленного оконцевателя до оконцевателя под напряжением

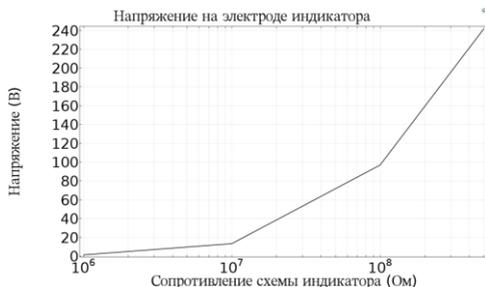


Рис. 9 Зависимость амплитудного значения напряжения схемы от сопротивления схемы индикатора

Здесь показана разность потенциалов между электродами схемы при изменении полного сопротивления утечки схемы от 1 МОм до 500 МОм. Из графика видно, что разработанная схема на основе динисторов не будет работать пока разность потенциалов не превысит напряжение срабатывания динисторов (~40 В), что может произойти только если полное сопротивление индикатора превысит 20 МОм. Этот важный вывод лег в основу выбора компонентов и конструкции индикатора.

Выводы по работе. Моделированием в программе COMSOL Multiphysics были сформулированы требования к электронным компонентам разработанной схемы: выбор элементов должен быть таким, чтобы общее сопротивление схемы индикатора было не менее 20 МОм.

Построенная модель послужила основой для расчетов работы изолятора на 110 кВ с индикатором, где были смоделированы и оценены возможности индикатора по функциональному назначению.

Библиографический список

1. **Зарипов Д.К., Балобанов Р.Н.** Индикатор дефекта высоковольтной изолирующей конструкции // *Электротехника*. 2016. № 6. С. 16-21.
2. **Огородников, А.С.** Моделирование в среде MATLAB – COMSOL 3.5a. Часть 1: учеб. пособие Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 104 с.
3. Comsol Multiphysics [Сайт]: Comsol Inc [2019]. URL: <http://www.comsol.com> (дата обращения 01.10.2019).
4. **Bazhutin D.** Simulation of elastic vibrations of crane installations constructions in comsol multiphysics package // *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*. 2013. № 4. С. 4.
5. **Исаев Ю. Н., Будько А.А., Васильева О.В.** Методы расчета электромагнитных полей. Практика использования MathCAD, COMSOL Multiphysics. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2012. 162 с.
6. **Будько А.А., Васильева О.В.** Моделирование статических электромагнитных полей и расчет параметров в COMSOL MULTIPHYSICS // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 2. С. 133.
7. **Титков В. В., Янчус Э.И.** Компьютерные технологии. Comsol Multiphysics в задачах энергетики: учеб. пособие СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 184 с.

УДК 551.583 / УДК 621.312.1

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА НАДЕЖНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Д-р техн. наук, доц. **Кондратьева О.Е.**

Магистрант **Мясникова Е.М.**

Магистрант **Воронков Д.А.**

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

***Аннотация.** В работе рассмотрен вопрос влияния климатического фактора «ветер» на работу воздушных линий электропередачи на примере энергосетевой компании, осуществляющей электроснабжение на территории Республики Башкортостан. Произведен анализ изменения характеристик ветра на территории России с 2015 по 2018 г.*

***Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи, климатические изменения, ветер, аномалии скорости ветра, аварийные отключения.*

За последние годы в электросетевых компаниях наблюдается рост количества технологических нарушений, связанных с воздействием климатических факторов [1]. В зависимости от региона, размера компании, протяженности воздушных линий электропередачи число таких аварийных отключения может достигать от нескольких процентов до 90% и более. Согласно сводным данным об аварийных отключениях различных электросетевых компаний, преобладающим среди климатических факторов, воздействующих на состояние объектов энергетики, является ветер. При этом наиболее подвержены влиянию ветра воздушные линии электропередачи (ВЛ)

Цель работы: исследовать влияние климатического фактора ветер на ВЛ и их элементы с учетом изменяющихся климатических условий.

Содержательная часть.

На примере компании ООО «Башкирэнерго», осуществляющей электроснабжение в Республике Башкортостан, было рассчитано количество технологических нарушений (ТН), вызванных влиянием климатического фактора ветер в отдельности и в сочетании с другими климатическими факторами (гололед, дождь, снег, гроза, температура и др.) за последние пять лет (с 2014 по 2018 гг.). Данные получены из сводных данных об аварийных отключениях [2] для 2018 года и [3] для 2014-2017 гг. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Количество технологических нарушений (ТН) компании
ООО «Башкирэнерго» на период с 2014 по 2018 гг.**

Год	2014	2015	2016	2017	2018
Общее количество ТН	7587	8179	6571	7393	8003
ТН, вызванные климатическими явлениями	3278	4433	3315	4059	4115
ТН, возникшие под действием ветра	974	1429	1091	1471	1968
ТН, возникшие под действием ветра в сочетании с другими климатическими факторами	416	600	745	618	479
Процент количества ТН, связанных с воздействием ветра (в сочетании с другими климатическими факторами и без) от общего количества ТН, %	~18,3	~24,8	~27,9	~28,3	~30,6

Из табл. 1 видно, что на территории республики Башкортостан на период с 2014 по 2018 гг. произошло большое количество ТН, связанных с воздействием климатических факторов: ~43÷55% от общего числа ТН в зависимости от года. Общее число ТН, которые произошли под действием ветра в сочетании с другими климатическими факторами или только под действием ветра, составляет практически половину или больше от количества ТН, связанных с влиянием климатических явлений (~42÷60% в зависимости от года).

Аварийные отключения, возникшие только под действием ветра, происходят чаще, чем те, которые происходят под действием ветра в сочетании с другими климатическими факторами. При этом процент суммарного количества ТН, связанных с воздействием ветра (в сочетании с другими климатическими факторами и без), достаточно большой по отношению к общему количеству ТН, которые произошли в компании ООО «Башкирэнерго» с 2014 по 2018 гг. С годами процент таких ТН постоянно увеличивается.

Наиболее распространенными последствиями влияния ветра, а также ветра совместно с другими климатическими факторами являются свхлест, падение и обрыв проводов, приближение проводов на недопустимое расстояние, наброс посторонних предметов на провода, падение деревьев, срыв, повреждение или разрушения изоляторов, междоузельные короткие замыкания, ослабление креплений проводов и др.

Для повышения надежности ВЛ от воздействия климатического фактора ветер, необходимо изучить различные характеристики ветра с учетом изменяющихся климатических условий. На основе докладов

Росгидромета об особенностях климата на 2014 год [4], 2015 год [5], 2016 год [6] и 2018 год [7] был проведен анализ следующих характеристик ветра для территории России:

• пространственное распределение максимальной скорости ветра (без учета порывов), полученной из средних за 10-минутный интервал времени;

- аномалии среднегодовой скорости ветра;
- число дней со скоростью ветра ≥ 15 м/с;
- аномалии числа дней со скоростью ветра ≥ 15 м/с.

Под аномалией понимается отклонение средней величины от нормы базового периода. В данном случае в качестве базовой величины используются средние многолетние значения характеристик ветра за период 1981-2010 гг. [7].

В результате были получены следующие результаты.

1. Максимальная скорость ветра ≥ 25 м/с встречается в каждом квазиоднородном регионе, которые делятся на:

- I – север Европейской части России и Западной Сибири;
- II – север Восточной Сибири и Якутии;
- III – Чукотка, Магаданская область и север Камчатки;
- IV – центр Европейской части России;
- V – центр и юг Западной Сибири;
- VI – центр и юг Восточной Сибири;
- VII – Дальний Восток (Амурская и Сахалинская области, Хабаровский и Приморский края, ЕАО, центр и юг Камчатского края);
- VIII – Алтай и Саяны;
- IX – юг Европейской части России.

2. На большей части России преобладающей является максимальная скорость ветра 10-15 м/с, при этом с 2015 по 2018 гг. на территории Европейской части России увеличивается количество областей с максимальной скоростью ветра 10 м/с, а на Азиатской части России увеличивается количество областей с максимальной скоростью ветра 15 м/с.

3. В III квазиоднородном регионе, а также на севере Западной и Восточной Сибири с 2015 по 2018 гг. максимальная скорость ветра составляет $25 \div 30$ м/с и выше.

4. Наибольшее количество дней со скоростью ветра ≥ 15 м/с наблюдается вдоль прибрежных территорий, омываемых водами Северного Ледовитого и Тихого океанов, на Алтае. В основном с годами максимальное количество дней со скоростью ветра ≥ 15 м/с на данных территориях увеличивается. Так, например, число дней со скоростью

ветра ≥ 15 м/с составило на Камчатке (Мыс Лопатка) в 2015 году – 148, в 2016 году – более 161, в 2017 году – более 163, в 2018 году – более 187; на о. Сахалине (Мыс Крильон) в 2015 году – 79, в 2016 году – 86, в 2018 году – более 106 дней.

5. Аномалии среднегодовой скорости ветра (по отношению к норме 1981-2010 гг.) на большей части страны отрицательные, однако с 2015 по 2018 гг. увеличивается количество территорий с положительными аномалиями на юге страны и на Дальнем Востоке [36, 41-43].

6. Наибольшие отрицательные аномалии среднегодовой скорости ветра зафиксированы в Сахалинской области (в 2017 году аномалия составила -2,27 м/с, в 2018 году -2,08 м/с) и в Курганской области (в 2017 году аномалия составила -2,04 м/с, в 2018 году -2 м/с).

7. Наибольшие положительные аномалии среднегодовой скорости ветра до +1,4 м/с зафиксированы в 2018 году в Дагестане и Хабаровске.

8. Практически на всей территории России аномалии числа дней со скоростью ветра ≥ 15 м/с – отрицательные и лежат в диапазоне от -4 до -0,1 дней. В основном небольшие территории с отрицательными аномалиями ≤ -4 дней наблюдаются в I, III, VII, VIII квазиоднородных регионах. Наибольшие отрицательные аномалии числа дней со скоростью ветра ≥ 15 м/с наблюдаются в Мурманской области (в 2017 году - 11,93 дней, в 2018 году -12,62 дней) и на Курильских островах. Незначительные положительные аномалии зафиксированы на территории Дальнего Востока.

9. Оценка многолетних изменений характеристик ветра для России и её квазиоднородных регионов выявила, что во все сезоны года средняя скорость ветра уменьшается. Число дней со скоростью ≥ 15 м/с также уменьшается для большинства регионов зимой, весной и осенью. Летом число таких дней уменьшается в Европейской части России, на Чукотке и на севере Камчатки [36, 41-43].

Исходя из полученных результатов было определено, что с 2015 по 2018 гг. на территории Республики Башкортостан увеличивается количество областей с максимальной скоростью ветра ≥ 15 , ≥ 20 и ≥ 25 м/с. На большей части территории максимальная скорость ветра составляет 15 м/с. Также на территории Республики Башкортостан с годами увеличивается количество областей с положительными аномалиями среднегодовой скорости ветра (по отношению к норме 1981-2010 гг.). В 2018 году зафиксирована небольшая область с аномалией среднегодовой скорости ветра 1 м/с. Это говорит об усилении характеристик ветра на данной территории.

Выводы по работе. Климатический фактор ветер оказывает большое влияние на работу ВЛ и её элементы. Разработка мероприятий с учетом изменяющихся климатических условий позволит снизить количество аварийных отключений, а также повысить надежность и безопасность ВЛ. При проектировании электрических сетей выбор оборудования должен осуществляться исходя из зоны с характерным для неё режимом ветра. Таким образом, выбор технологического оборудования должен осуществляться не только на основе карт климатических условий ПУЭ, но и с учетом известных характеристик и режимов ветра для конкретной территории.

Библиографический список

1. Вопросы влияния климатических факторов на воздушные линии электропередачи / О.Е. Кондратьева, О.А. Локтионов, Е.Г. Гашо, Е.М. Мясникова // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 6 (51). С. 70-73.
2. Сведения о техническом состоянии сетей ООО «Башкирэнерго», 2018 г. [Электронный ресурс]. URL: https://www.bashkirenergo.ru/upload/iblock/33f/Svedenia_o_tehnicheskom_sostoyanii_setei_Bashkirenergo_2018.7z.
3. Сведения о техническом состоянии сетей ООО «Башкирэнерго» (архив) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bashkirenergo.ru/consumers/standards-disclosure/>.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 год [Электронный ресурс] / Г.В. Груза, М.Ю. Бардин, Э.Я. Ранькова и др. М.: Росгидромет, 2016. 67 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/clim2015.pdf>.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год [Электронный ресурс] / Г.В. Груза, М.Ю. Бардин, Э.Я. Ранькова и др. М.: Росгидромет, 2017. 70 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/doc2016.pdf>.
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017 год [Электронный ресурс] / М.Ю. Бардин, Э.Я. Ранькова, Т.В. Платова др. М.: Росгидромет, 2018. 69 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2018/ClimatRF2017.pdf>.
7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год [Электронный ресурс] / М.Ю. Бардин, Э.Я. Ранькова, Т.В. Платова и др. М.: Росгидромет, 2019. 79 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2019/o-klimat-rf-2018.pdf>.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 0,4-10 КВ*

Канд. техн. наук **Мышкина Л.С.**

Магистрант **Сабадаш И.А.**

*Новосибирский государственный технический
университет, г. Новосибирск*

***Аннотация.** Статья посвящена изучению влияния режимных ограничений на функциональную надёжность распределительных сетей 0,4-10 кВ, которые во многом определяют значения индикативных показателей надёжности электроснабжения. На примере анализа надёжности электроснабжения двух энергорайонов доказана значимость влияния режимного фактора на бесперебойность электроснабжения потребителей. В силу сложности топологии и наличие вариативности потокораспределения предложено применение метода декомпозиции для расчетов показателей безотказности и восстанавливаемости узлов сети. Показана целесообразность расчета индикативных показателей надёжности электроснабжения на этапе проектирования сетей, так как экономическая эффективность функционирования территориальных сетевых компаний во многом определяется уровнем надёжности.*

***Ключевые слова:** бесперебойность, индикативные показатели надёжности электроснабжения, распределительная сеть, безотказность, восстанавливаемость.*

Миссией электросетевого комплекса является долгосрочное обеспечение надежного, качественного и доступного электроснабжения потребителей. Распределительная электрическая сеть является важным и протяженным звеном, в большей степени определяющим уровень надёжности и качества электроснабжения. Отказы в сетях 6 – 10 кВ являются причиной порядка 70 % всех нарушений электроснабжения потребителей [1], что снижает техническую эффективность данных сетей, что актуализирует задачи исследования надёжности сетей.

При этом, уровень тарифа на оказание услуги по передаче электрической энергии сетевыми организациями в России зависит, в том числе и от уровня функциональной надёжности электроснабжения, оцениваемой индикативными показателями надёжности электроснаб-

* Работа выполнена при поддержке Новосибирского государственного технического университета (проект С-19-26)

жения. Данные показатели, согласно Постановлению Правительства РФ от 31.12.2009 № 1220 «Об определении применяемых при установлении долгосрочных тарифов показателей надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг», применяются в России для стимулирования повышения уровня надежности и качества оказываемых сетевыми организациями услуг, используются в механизме установления тарифов на передачу электроэнергии. При достижении определенных значений показателей возможно увеличение тарифа на передачу электрической энергии до 2%, и снижение до -3%.

Однако при проектировании электрических сетей низкого и среднего классов напряжения, при принятии решений о проведении технического обслуживания и ремонта, реконструкции и перевооружения не предусмотрен расчет индикативных показателей надежности. Однако от их значений в последующем будет зависеть и экономическая эффективность сетевых компаний. Чем объясняется актуальность исследования и научная новизна работы.

Целью работы является оценка влияния режимных ограничений на функциональную надежность распределительной сети. Достижению поставленной цели способствует решение задач, направленных на анализ и оценку функциональной надежности на примере участка распределительной сети без учета режимных ограничений на выполнении функции взаиморезервирования и с их учетом.

Надежность распределительной сети.

В России, согласно Постановлению Правительства № 1220 (указанному выше) и соответствующим методическим указаниям, уровень надежности услуг по передаче электрической энергии потребителям, оказываемых территориальными сетевыми организациями (ТСО), имеющими сети не относящиеся к Единой национальной электрической сети, определяется по трем индикативным показателям, рассчитываемым на основе учета продолжительности и частоты прерываний электроснабжения, числу точек присоединения потребителей:

- средняя продолжительность прекращений передачи электрической энергии (Π_{Π});
- средняя продолжительность прекращения передачи электрической энергии потребителям на точку поставки (Π_{SAIDI});
- средняя частота прекращения передачи электрической энергии потребителям на точку поставки (Π_{SAIFI}).

Указанные показатели во многом совпадают с некоторыми, используемыми за рубежом, однако набор показателей, используемых там значительно шире [2]: SAIDI, SAIFI, CAIDI, ASAI, ASIDI, AENS и

другие [3], позволяющие более комплексно анализировать уровень надежности электроснабжения потребителей [4].

Расчет математического ожидания индикативных показателей надежности можно осуществить на основе информации о структуре сети, ее топологии, единичных показателях надежности основного оборудования, имеющемся резервировании, в том числе за счет средств автоматики, информации о количестве присоединенных потребителей. При помощи методики анализа надежности региональной электрической сети [5], основанной на [6] и базирующейся на методологии [7] рассчитываются показатели бесперебойности электроснабжения узлов нагрузки и далее рассчитываются индикативные показатели надежности электроснабжения анализируемой сети. В работе исследуются следующие:

$$P_{saidi} = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i t_{vi} N_i}{\sum_{i=1}^m N_i} \quad (1)$$

$$P_{saifi} = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i N_i}{\sum_{i=1}^m N_i} \quad (2)$$

где N_i – количество точек поставки потребителям услуг сетевой организации, в отношении которых произошло i -ое прекращение передачи электрической энергии в рамках технологического нарушения, шт.; m – число узлов нагрузки в анализируемой сети; ω_i , t_{vi} , – частота отказов, среднее время восстановления электроснабжения, соответственно, для узла i сети;

Допущением методики [5], справедливым для питающих сетей 110-220 кВ является то, что прерывание электроснабжения происходит только при отказе всех входящих в узел ветвей (оборудования). В данной работе, на примере двух районов сети 10 кВ, исследуются возможные режимные ограничения в условиях резервирования и их влияние на функциональную надежность сети.

Влияние режимного фактора на функциональную надежность сети.

Электроснабжение потребителей анализируемой сети 10 кВ осуществляется от двух независимых центров питания (ЦП – 1, ЦП – 2). Принципиальная схема электрических соединений распределительной сети изображена на рис. 1.

Участок распределительной сети представлен десятью узлами нагрузки с общим количеством присоединенных потребителей равном 925 шт. Под узлами нагрузки подразумеваем точки присоединения

потребителей – трансформаторные пункты (ТП), состояние которых позволяет характеризовать надежность электроснабжения. Полная мощность подключенной нагрузки первого энергорайона составляет 7,3 МВА, а второго – 3,6 МВА. Взаиморезервирование энергорайонов в сети осуществляется резервными линиями КЛ-3 и КЛ-7, включение которых обусловлено действием автоматики включения резерва.

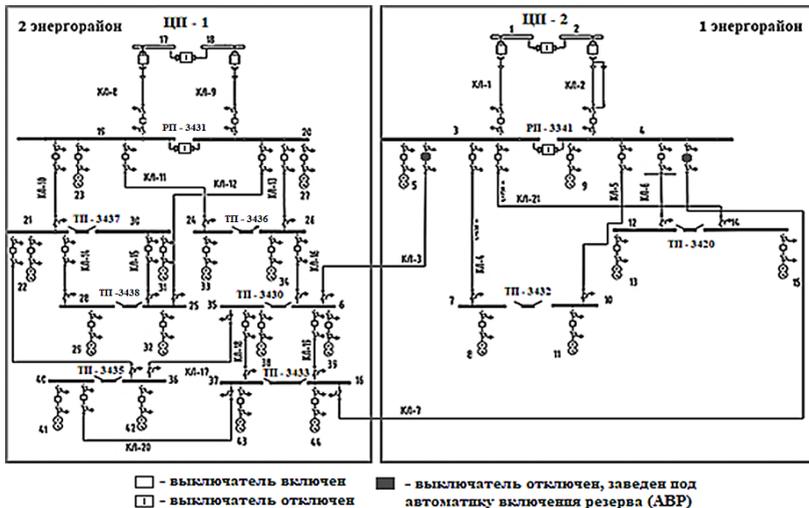


Рис. 1. Схема электроснабжения двух энергорайонов

Расчеты электрических режимов позволили выявить имеющиеся режимные ограничения на осуществление функции взаиморезервирования между энергорайонами. При нарушении питания ЦП-2, имеющегося резервирования в сети достаточно для сохранения электроснабжения всех потребителей обоих энергорайонов, при сохранении хотя бы одной из двух резервных линий в работоспособном состоянии.

Однако, при нарушении питания ЦП-1 и отказе одной из резервных линий, электроснабжение локального энергорайона ЦП-1 будет прервано из-за несоответствия режимных параметров – превышение максимально допустимого тока по резервной линии.

Для определения индикативных показателей надежности электроснабжения с использованием методики представленной в [5] предлагается определять узлы, отключение нагрузки в которых позволяет осуществить полное взаиморезервирование. Следовательно, для выбранных узлов эквивалентные показатели надежности будут определяться не только структурной надежностью, но и функциональной надежностью, что ведет к изменению частоты отказа и времени восстановления этих узлов.

Исходя из критерия минимизации количества отключаемых потребителей (что согласуется с механизмом стимулирования, указанным выше) выбраны точки присоединения потребителей РП-3431, ТП-3436, ТП-3438. На частоты отказа и время восстановления электроснабжения в данных узлах будут влиять показатели надежности резервных линий, в зависимости от пути резервирования. Указанное учитывается при составлении матрицы взаимосвязи [5], отражающей топологию и возможное потокораспределение.

В силу сложности топологии, определяющей потокораспределение, предложено использование метода декомпозиции и наложения матриц взаимосвязи. Его суть состоит в раздельном расчете показателей для каждого энергорайона с учетом возможного резервирования от соседнего центра питания, с последующим наложением результатов двух расчетов для определения показателей структурной и функциональной надежности узлов нагрузки.

В табл. 1 представлены показатели бесперебойности электроснабжения узлов нагрузки, где необходимо отключение нагрузки для осуществления взаиморезервирования при нарушении питания от ЦП-1.

Таблица 1

Показатели надежности узлов

Узел нагрузки		Без учета режимного фактора		С учетом режимного фактора	
Наименование	Номер	ω_i , 1/год	$t_{вi}$, ч	ω_i , 1/год	$t_{вi}$, ч
РП-3431	71	$4,259 \cdot 10^{-6}$	19,272	$5,168 \cdot 10^{-5}$	7,999
ТП-3436	47	$3,575 \cdot 10^{-6}$	21,684	$5,168 \cdot 10^{-5}$	7,999
ТП-3438	56	$3,575 \cdot 10^{-6}$	21,680	$5,168 \cdot 10^{-5}$	7,999

На основе показателей бесперебойности электроснабжения узлов нагрузки определены индикативные показатели надёжности электроснабжения, табл. 2.

*Таблица 2***Индикативные показатели надёжности электроснабжения**

Район	Без учета режимного фактора		С учетом режимного фактора	
	P_{SAIDI} , ч	P_{SAIFI} , о.е.	P_{SAIDI} , ч	P_{SAIFI} , о.е.
Первый	0,6658	0,0294	0,6658	0,0294
Второй	0,6847	0,0322	1,9400	0,2119
По всей сети	0,6791	0,0313	1,5577	0,1571

В результате выполненного расчета показателей, в случае допущения об отсутствии режимных ограничений на выполнение функции взаиморезервирования, можно утверждать о высоком уровне надежности, так как значения показателей не превысили 1, что соответствует 1 отключению в год не более чем на 1 час, и о среднем уровне надежности электроснабжения при учете влияния режимного фактора, так как значения показателей SAIDI и SAIFI не превышают 4, что соответствует 1 отключению в квартал не более чем на 1 час [8].

Однако влияние режимного фактора велико. При учете режимного фактора наблюдается увеличение обоих показателей. Показатель P_{SAIDI} увеличился в 2,83 раз, а P_{SAIFI} увеличился в 6,59 раза для второго энергорайона. Для сети, в целом, P_{SAIDI} увеличился в 2,29 раз, а P_{SAIFI} увеличился в 5,02 раза, по сравнению с расчетом, не учитывающим режимные ограничения.

Выводы по работе.

Исследована возможность взаиморезервирования электроснабжения двух локальных энергорайонов сети 10 кВ. Выявлено наличие режимных ограничений в случае прерывания электроснабжения от одного центра питания и отклазе одной резервной линии.

В силу сложности топологии и возможного потокораспределения предложено использование метода декомпозиции и наложения матриц взаимосвязи для расчета показателей надежности сети.

Сопоставление индикативных показателей надежности с учетом режимных ограничений и без показали значимость режимных ограничений на функциональную надёжность распределительной сети, что подтверждает гипотезу о необходимости учета режимных факторов в распределительных сетях 10-0,4 кВ.

Показана необходимость учета индикативных показателей надежности на стадии проектирования распределительных сетей и принятии решений о проведении мероприятия направленных на повышение надежности, что позволит повысить техническую и экономическую эффективность сети.

Библиографический список

1. **Батуева Д.Е.** Исследование интеллектуальных систем управления в распределительных сетях 10 кВ на основе реклоузеров ПСС-10 // Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам VI междунар. науч.-практ. конф. М.: Изд. «МЦНО», 2017. С. 181-196.

2. **Elkadeem, M.R., Alaam, M.A., Azmy, A.M.** Improving performance of underground MV distribution networks using distribution automation system: A case study // Ain Shams Engineering Journal. 2018. Volume 9, Issue 4. P. 469-481.

3. IEEE 1366-2012 «Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices» [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6209381/metrics>.

4. Reliability improvement of radial distribution system with distributed generation / G.V.K Murthy, Dr.S. Sivanagaraju, Dr.S. Satyanarayana, B. Hanumantha Rao // International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). 2012. Vol. 4, № 9. P. 4003-4011.

5. **Бык Ф.Л., Мышкина Л.С.** Технологическая и эксплуатационная надежность системы электроснабжения // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11, № 3. С. 200-207.

6. **Обоскалов, В.П.** Проблемы расчета структурной надежности систем электроснабжения с использованием метода вероятностного эквивалентирования // Электричество. 2015. № 13. С. 4-12.

7. **Billinton R., Allan R.N.** Reliability Evaluation of Power Systems. New York: Springer Science; Business Media, 1996. 514 p.

8. Getting Electricity methodology [Электронный ресурс]. URL: <http://www.doingbusiness.org/Methodology/Getting-Electricity>.

УДК 621.311.11

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЗОН СВОБОДНОГО ПЕРЕТОКА ЗА СЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ*

Канд. техн. наук **Мышкина Л.С.**

Магистрант **Терлыга Н.С.**

Ассистент **Фролова Я.А.**

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

***Аннотация.** В работе рассматривается возможность объединения зон свободного перетока за счет распределенной генерации. Актуальность темы обусловлена существующим состоянием сетевой инфраструктуры и высокой долей сетевой составляющей в конечной стоимости электроэнергии, изменением топливно-энергетического ландшафта в субъектах федерации, повышением экологических требований и необходимостью повышения энергетической эффективности производства электроэнергии. Объектом исследования в работе является вторая ценовая зона оптового рынка, располагаемая на территории Сибири, где в силу климатических условий задача повышения доступности электроэнергии сочетается с проблемой надежного теплоснабжения, что обуславливает наличие большого числа отопительных котельных. Показано, что перевод на когенерационный режим работы средних и крупных котельных в городах Алтайского края и Республики Алтай, помимо других значимых эффектов позволит объединить зоны свободного перетока «Алтай» и «Сибирь». Распределенная энергетика рассматривается как в эффективная альтернатива усилению межсистемных связей. Очевидно, что новое сетевое строительство ведет к росту тарифа на передачу электроэнергии, а переход к распределенной генерации к росту конкуренции на розничных региональных рынках, что снижает стоимость электроэнергии.*

***Ключевые слова:** зона свободного перетока, газификация, котельная, распределенная энергетика, малая генерация, газопоршневая установка, когенерация.*

Понятие зоны свободного перетока (ЗСП) появилось в 2010 году, когда Федеральная Антимонопольная Служба определила 29 ЗСП, в которых конкурентный отбор мощности проводится с использованием

* Работа выполнена при поддержке Новосибирского государственного технического университета (проект С-19-26)

предельного размера цены на мощность. Выделение ЗСП обосновано наличием технических ограничений на передачу мощности по межсистемным связям. В каждой ЗСП генерирующая мощность может быть перераспределена без каких-либо ограничений, что позволяет говорить о наличии внутренней конкуренции, при отсутствии внешней конкуренции из-за ограничений по сохранению загрузки внешних связей. Такие зоны могут являться как избыточными, так и дефицитными.

В настоящее время их 21, в том числе во второй ценовой зоне – 5, где самой крупной является ЗСП «Сибирь». Сокращение числа ЗСП за счет их объединения позволяет повысить конкуренцию среди поставщиков электроэнергии – участников ОРЭМ и обычно достигается за счет строительства и реконструкции сетевых объектов для снятия сетевых ограничений [1]. Этот подход требует крупных капиталовложений и оборачивается ростом тарифа на передачу на электроэнергию.

Для дефицитных ЗСП снятие сетевых ограничений возможно за счет ввода новых генерирующих мощностей. Строительство крупных электрических станций в последние годы осуществлялось по договорам поставки мощности (ДПМ) [2]. Однако этот механизм также оборачивался ростом стоимости электроэнергии для конечных потребителей, на которых через механизм оплаты потребляемой мощности возлагается возмещение инвестиций с доходностью 12,5%.

Рост конечной стоимости электроэнергии для потребителей, что для промышленности усугубляется наличием перекрестного субсидирования в пользу населения, потребовал от них искать альтернативу централизованной системе электроснабжения. В качестве решения проблемы крупные, энергоемкие потребители выбрали вариант создания собственных систем энергоснабжения на основе энергоустановок малой мощности.

Эффективность малой генерации позволяет ставить и решать проблему энергетического перехода, направленного повысить доступность, надежность и качество энергоснабжения. Созрели все предпосылки и условия для структурной перестройки энергосистемы России на основе сочетания централизованных и локальных систем энергоснабжения.

Цель работы исследовать возможность использования распределенной генерации для объединения ЗСП. До настоящего времени в литературе не встречалась такая постановка, что позволяет говорить о новизне полученных результатов решения рассмотренных в работе задач.

Границы зоны свободного перетока и эффекты их объединения

Согласно [2], ЗСП – часть Единой энергетической системы России, в пределах которой электрическая энергия и мощность, производимые или планируемые для поставок, могут перераспределяться между находящимися в ней электрическими станциями в соответствии с их техническими характеристиками при условии соблюдения ограничений перетока электрической энергии и мощности между такими зонами. В регламенте определения и актуализации параметров ЗСП ЕЭС указано, что их перечень определяется в соответствии с порядком определения ЗСП, где указано, что для объединения ЗСП необходимо снизить загрузку межсистемных связей на 1/3 от максимальной нагрузки в ЗСП.

Объединение ЗСП позволит разгрузить некоторые генераторы и вывести их в резерв, что увеличит надежность электроснабжения в зоне. При объединении ЗСП появляется большее количество конкурирующих участников поставки электроэнергии и мощности на ОРЭМ [3]. Соответственно, при проведении торгов на рынке на сутки вперед (РСВ) и конкурентном отборе мощности (КОМ) будут проходить те генераторы, у которых ниже цена на мощность и затраты на производство энергии в сравнении с другими. Также с повышением количества участников торгов на электроэнергию и мощность можно ожидать снижения цен на производство. Однако указанный положительный эффект будет снижен, если объединение ЗСП обеспечивается сетевым строительством, что влечет за собой большие эксплуатационные затраты, а, следовательно, и рост тарифа на передачу электроэнергии.

С появлением и развитием распределенной генерации появляется альтернатива сетевому строительству для решения задачи объединения ЗСП.

Локальные системы электроснабжения и эффекты от их интеграции с ЕЭС

В качестве основных предпосылок появления локальных систем энергоснабжения, прежде всего, следует указать не только на высокую техническую эффективность малой генерации (МГ), но и на наличие несовершенных рыночных отношений на розничных рынках, субъектами которых они являются.

С появлением МГ у предприятий малого и среднего бизнеса появляется возможность стать субъектами локальной системы электроснабжения, где МГ является основным источником электроэнергии.

Стоимость электроэнергии в таких системах обычно ниже, т.к. сетевая составляющая снижается за счет близости поставщика и потребителей.

Развитию локальных систем способствуют достижения по реализации программы газификация страны. На сегодняшний день уровень газификации в России достиг 68,6% [4], что говорит о радикальном изменении топливно-энергетического ландшафта на территории европейской части страны и частично в Сибири. Но с вводом трубопроводной системы газоснабжения «Сила Сибири» и «Сила Сибири 2» ситуация изменится. Данная программа способствует переводу котельных на экологический вид топлива и создает предпосылки для их перевода в когенерационный режим работы.

Очевидно, что рост доли МГ в балансах мощности и энергии регионов дефицитных ЗСП может привести к разгрузке межсистемных связей, а, следовательно, выполнению условий необходимых для их объединения. Но для этого нужно найти ответ на вопрос: Сколько и где нужно установить объектов распределенной генерации, чтобы обеспечить объединение ЗСП?

Объект исследования

В качестве объекта исследования выбрана вторая ценовая зона оптового рынка. Данная зона находится на территории Сибири, где есть потребность в доступной тепловой и электрической энергии. Поэтому здесь расположено большое количество котельных, работающих на различных видах топлива. Зачастую они дотируются из бюджета субъекта федерации, ввиду очень высокой себестоимости отпускаемого тепла. Единственным возможным способом снижения себестоимости является перевод котельной в когенерационный режим работы, что ведет к появлению мини-ТЭЦ.

Среди всех ЗСП второй ценовой зоны наилучшим образом подходит для исследования ЗСП «Алтай» – участок энергосистемы, расположенный на территории Алтайского края и Республики Алтай. В этой зоне ТЭЦ составляют 99% от всей генерации (это составляет 1163 МВт установленной мощности). Также в республике Алтай установлены 5 СЭС суммарной мощностью 40 МВт, которые не участвуют в балансе мощности. Это обуславливает покрытие пиков графика нагрузки за счет перетоков из ЗСП «Сибирь» и наличие межсистемных связей позволяет обеспечить надежность балансов мощности и энергии.

Следует отметить, что Алтай является санаторно-курортной зоной с большим количеством заповедников и наличием сельскохозяйственной промышленности, что предопределяет значимость экологии для региона. Перспектива строительства газопровода «Сила Сибири-2»

позволяет рассчитывать на изменения топливного ландшафта, где природный газ станет основным ресурсом. Кроме этого очевиден интерес исполнительной власти в повышении доступности электроэнергии, т.к. в ЗСП «Алтай» даже значение стоимости электроэнергии для населения [5] выше по сравнению с ближайшей ЗСП «Сибирь» [6] примерно в 1,5-2 раза. Установленной мощности станций в ЗСП «Алтай» не хватает для покрытия нагрузки, поэтому часть мощности поступает из других систем. В табл. 1 отображен баланс мощности для ЗСП «Алтай».

*Таблица 1***Баланс мощности для ЗСП «Алтай»**

Генерация, МВт	Нагрузка, МВт	Потери, МВт	Общее потребление, МВт	Переток из других систем, МВт
1163	1560	36	1596	433

Согласно порядку определения ЗСП [2] для объединения ЗСП «Алтай» и ЗСП «Сибирь» необходимо снизить переток на 1/3 (145 МВт). Это позволит снять сетевые ограничения, которые сдерживают социально-экономическое развитие регионов, входящих в ЗСП «Алтай».

Определение мест установки когенерационных установок.

Для определения установленной мощности, которую можно получить при установке когенерационных установок необходимо выявить котельные для перевода в мини-ТЭЦ. Выбор котельных осуществляется по следующим критериям:

- установленная мощность не менее 5 Гкал/ч и не более 50 Гкал/ч, что характеризует котельные средней мощности;
- выполнение отопительных функций.

Анализ схем теплоснабжения таких городов, как Барнаул, Бийск, Камень-на-Оби, Горно-Алтайск, Славгород, Белокуриха, показал, что в регионе 42 подходящих котельных с суммарной установленной мощностью 790 МВт. С учетом специфики региона, где отношение потребления тепловой энергии к электрической 2:1, и необходимостью аварийного резерва в 20%, возможно получить 280 МВт располагаемой мощности. Таким образом, пригодных для реконструкции котельных в регионе больше, чем необходимо для объединения ЗСП. Но, очевидно, что появятся известные проблемы, связанные с их присоединением к сетям высокого напряжения. Снять эти проблемы можно, если создать на их базе локальные энергосистемы сетью 10 кВ. Со-

гласно [7], такие системы должны работать на принципе самобаланса, но интегрированные в региональные системы электроснабжения, что эффективно с позиции повышения коэффициента полезного использования топлива, коэффициента использования установленной мощности, показателей надежности, качества и живучести электроснабжения.

Эффект от применения когенерационных установок.

Для анализа надежности электроснабжения были выбраны определенные когенерационные установки и проведены расчеты установившегося режима в соответствии с методическими указаниями по устойчивости энергосистем.

В качестве источников выбраны отечественные когенерационные установки фирмы GazEcos мощностью 1 МВт и 2 МВт. Согласно данным производителя, эти установки обладают наивысшим электрическим КПД – 44 %, а суммарный достигает 82%. Установки отличаются высокой маневренностью (70-80% сброса/наброса нагрузки за 2 сек.), возможностью работать на низком давлении газа (600 мбар) и их гарантийный срок службы составляет 20 лет [8].

Для анализа режимных параметров было определено сечение, соединяющее ЗСП «Алтай» и «Сибирь», и для более точной оценки было разделено на 4 отдельных сечения: Новосибирск – Алтай, Кузбасс – Алтай, Рубцовск – Алтай, Омск – Алтай. В ходе расчетов в ПВК RastrWin был определен переток по каждому из сечений и предел по статической устойчивости. Соответственно, был рассчитан максимально допустимый переток и определена загрузка каждого из сечений. При оценке загрузки сечений было выделено наиболее загруженное – Кузбасс – Алтай.

Расчет производился для зимнего максимума, и учитывались ограничения на мощность распределенной генерации в выделенных узлах схемы. В табл. 2 приведены полученные результаты, указывающие на снижение загрузки сети между ЗСП «Сибирь» и «Алтай», что согласно регламенту, позволяет рекомендовать вариант объединения ЗСП без дополнительного сетевого строительства.

Выводы по работе

Проведенные исследования указывают на эффективность применения распределенной генерации для объединения зон свободного перетока. Помимо объединения зон свободного перетока, использование распределенной генерации дает возможность создания локальных энергосистем, что приведет к повышению надежности и качества электроснабжения и к снижению затрат на строительство региональной распределительной сети.

Таблица 2

Результаты расчетов

Параметр	Значение до использования распределенной генерации, МВт	Значение при использовании распределенной генерации, МВт	Снижение, %
Переток из других систем	432,7	224,8	48
Загрузка сечения «Кузбасс – Алтай»	310,6	174	36

Также с использованием малой генерации ведет к повышению живучести, энергоэффективности и энергонезависимости электроснабжения потребителей в исследуемом регионе. Следует отметить, что появление распределенной малой генерации не ведет к росту тарифа на передачу. В целом было получено, что цена, определяемая для рынка мощности в долгосрочном периоде, за 1 МВт может снизиться в два раза (до 100 тысячи рублей). Вследствие этого можно ожидать снижения стоимости электрической энергии и мощности для конечных потребителей, находящихся в зоне свободного перетока «Алтай».

Библиографический список

1. Россети ФСК ЕЭС [Сайт]: ПАО «ФСК ЕЭС» [2019]. URL: <https://www.fsk-ees.ru> (дата обращения 01.10.2019).
2. Системный оператор Единой энергетической системы [Сайт]: АО «СО ЕЭС» [2019]. URL: <https://so-ups.ru> (дата обращения 01.10.2019).
3. **Карпов Ю.С.** Развитие сетей как важнейший фактор роста конкуренции на оптовом рынке электроэнергии и мощности [Электронный ресурс] // Вестник ГУУ, 2014. № 21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-setey-kak-vazhneyshiy-faktor-rosta-konkurentsii-na-optovom-rynke-elektroenergii-i-moschnosti>.
4. Газификация [Сайт]: ПАО «Газпром» [2019]. URL: <https://www.gazprom.ru/about/production/gasification/> (дата обращения 01.10.2019).
5. Алтайэнергосбыт [Сайт]: АО «Алтайэнергосбыт» [2019]. URL: <https://altaiensb.com> (дата обращения 01.10.2019).
6. Тарифы на электроэнергию для населения в России на 2019 год [Сайт]: energybase.ru [2019]. URL: <https://energybase.ru/tariff/electricity/2019> (дата обращения 01.10.2019).
7. **Byk F.L., Frolova Y.A., Myshkina L. S.** The efficiency of distributed and centralized power system integration // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 114. 05007.
8. Отечественные и импортные газопоршневые электростанции [Сайт]: ООО «GazEcos» [2019]. URL: <https://www.gazecos.ru> (дата обращения 01.10.2019).

УДК 620.9

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ С РЯДОВОЙ И ТРЕУГОЛЬНОЙ ПРОКЛАДКОЙ ЖИЛ

Канд. техн. наук, доц. **Олещук О.В.**

Канд. техн. наук, доц. **Сысун А.В.**

Канд. техн. наук, доц. **Тихомиров А.А.**

Аспирант **Соболев Н.В.**

*Петрозаводский государственный университет,
г. Петрозаводск*

***Аннотация.** Получены точные аналитические выражения для расчёта напряженности магнитного поля от трехфазной линии с рядовой и треугольной прокладкой жил. Приведены приближенные выражения при больших расстояниях от линии. Рассчитаны допустимые границы для выполнения требований электромагнитной безопасности и электромагнитной совместимости.*

***Ключевые слова:** электроэнергетика, магнитное поле, трехфазные линии.*

Сильноточные кабели электрической сети и систем электроснабжения являются источниками электромагнитных полей большой напряженности, что требует проведения расчётов для оценки электромагнитной безопасности и электромагнитной совместимости при конструировании систем [1-6]. При этом электрическим полем для кабельных сетей 0.4-10 кВ обычно можно пренебречь [7], в то время как магнитные поля промышленной частоты в ряде случаев могут превышать предельно допустимые, особенно при укладке фазных жил кабелей в “ряд” и “треугольник” [7-8].

Для трехфазной линии вектора магнитного поля от жил неодинаковы по амплитуде (из-за разных расстояний до точки наблюдения), и сдвинуты по углу в пространстве (из-за несовпадения радиус векторов по направлениям) и сдвинуты по фазе во времени. Это затрудняет их расчет и обычно используют приближенные численные и графические методы [7], что громоздко и приводит к большим погрешностям.

Целью работы являлось получение аналитических безразмерных выражений для распределения магнитного поля трехфазной линии с укладкой жил в ряд и треугольник.

1. Трехфазная линия с горизонтальным расположением жил в ряд.

Рассмотрим трехфазную линию с расположением жил в ряд. Оси координат взяты вдоль линии соединяющие жилы и перпендикулярно ей.

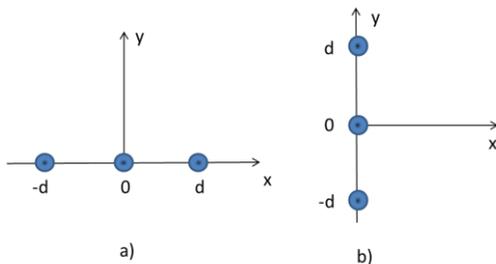


Рис. 1. Трехфазная линия с укладкой жил в ряд:
а) горизонтальная укладка б) вертикальная укладка.

На рис. 2 приведено расположение векторов магнитного поля каждой жилы варианта а. Вектора напряженности магнитного поля действуют вдоль линий H_A, H_B, H_C , перпендикулярных радиус – векторам от соответствующих жил.

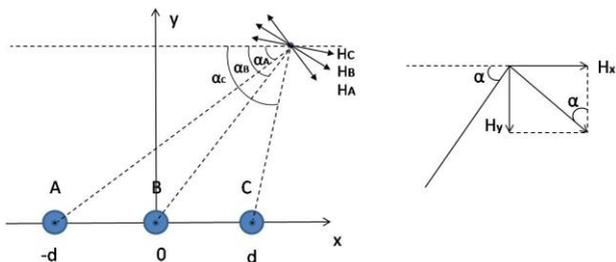


Рис. 2. Схема расположения векторов напряжённости магнитного поля для варианта а).

Напряжённость магнитного поля прямолинейного провода с током $I(t)$ определяется выражением $H(t) = \frac{I(t)}{2\pi r}$, где r расстояние от рассматриваемой точки до центра жилы. При этом её проекции и действующие значения равны: $H_x(t) = H(t)\cos\alpha$, $H_y(t) = H(t)\sin\alpha$. Тогда в

нашем случае для проекций векторов в точке с координатами x от жил согласно рис. 2 получим:

$$\begin{aligned}
 H_{Ax} &= \frac{I_0 \sin(\omega t - 120^\circ)}{2\pi\sqrt{y^2 + (x+d)^2}} \cdot \frac{y}{\sqrt{y^2 + (x+d)^2}}; \\
 H_{Ay} &= -\frac{I_0 \sin(\omega t - 120^\circ)}{2\pi\sqrt{y^2 + (x+d)^2}} \cdot \frac{(x+d)}{\sqrt{y^2 + (x+d)^2}}; \\
 H_{Bx} &= \frac{I_0 \sin(\omega t - 120^\circ)}{2\pi\sqrt{y^2 + x^2}} \cdot \frac{y}{\sqrt{y^2 + x^2}}; \\
 H_{By} &= -\frac{I_0 \sin(\omega t - 120^\circ)}{2\pi\sqrt{y^2 + x^2}} \cdot \frac{x}{\sqrt{y^2 + x^2}}; \\
 H_{Cx} &= \frac{I_0 \sin(\omega t + 120^\circ)}{2\pi\sqrt{y^2 + (x-d)^2}} \cdot \frac{y}{\sqrt{y^2 + (x-d)^2}}; \\
 H_{Cy} &= -\frac{I_0 \sin(\omega t + 120^\circ)}{2\pi\sqrt{y^2 + (x-d)^2}} \cdot \frac{(x-d)}{\sqrt{y^2 + (x-d)^2}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где I_0 – амплитуда тока. Проекции полного магнитного поля получим суммированием проекций от отдельных жил:

$$H_x = H_{Ax} + H_{Bx} + H_{Cx}, \quad H_y = H_{Ay} + H_{By} + H_{Cy}. \tag{2}$$

Квадрат действующего значения напряженности магнитного поля определяется из выражения:

$$H_d^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (H_x + H_y)^2 d\omega t \tag{3}$$

Суммируя выражения (1) в (2), и возводя в квадрат получим

$$\begin{aligned}
 H_x^2 &= \frac{I_0^2}{4\pi^2} \left\{ \frac{y^2 \sin^2(\omega t - 120^\circ)}{(y^2 + (x+d)^2)^2} + \frac{y^2 \sin^2(\omega t)}{(y^2 + x^2)^2} + \frac{y^2 \sin^2(\omega t + 120^\circ)}{(y^2 + (x-d)^2)^2} + \right. \\
 &+ \left. \frac{2y^2 \sin(\omega t) \sin(\omega t - 120^\circ)}{(y^2 + (x+d)^2)(y^2 + x^2)} + \frac{2y^2 \sin(\omega t) \sin(\omega t + 120^\circ)}{(y^2 + (x-d)^2)(y^2 + x^2)} + \frac{2y^2 \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(\omega t + 120^\circ)}{(y^2 + (x+d)^2)(y^2 + (x-d)^2)} \right\}, \\
 H_y^2 &= \frac{I_0^2}{4\pi^2} \left\{ \frac{(x+d)^2 \sin^2(\omega t - 120^\circ)}{(y^2 + (x+d)^2)^2} + \frac{x^2 \sin^2(\omega t)}{(y^2 + x^2)^2} + \frac{(x-d)^2 \sin^2(\omega t + 120^\circ)}{(y^2 + (x-d)^2)^2} + \right. \\
 &+ \frac{2x(x+d) \sin(\omega t) \sin(\omega t - 120^\circ)}{(y^2 + (x+d)^2)(y^2 + x^2)} + \frac{2x(x-d) \sin(\omega t) \sin(\omega t + 120^\circ)}{(y^2 + (x-d)^2)(y^2 + x^2)} + \\
 &+ \left. \frac{2(x-d)(x+d) I_0^2 \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(\omega t + 120^\circ)}{(y^2 + (x+d)^2)(y^2 + (x-d)^2)} \right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Подставляя полученные выражения в (3) и интегрируем по периоду, получаем

$$H_{\text{д}}^2 = \frac{I_0^2}{8\pi^2} \left[\frac{1}{y^2+(x+d)^2} + \frac{1}{y^2+x^2} + \frac{1}{y^2+(x-d)^2} - \frac{y^2+x(x+d)}{(y^2+(x+d)^2)(y^2+x^2)} - \right. \\ \left. - \frac{y^2+x(x-d)}{(y^2+(x-d)^2)(y^2+x^2)} - \frac{y^2+(x-d)(x+d)}{(y^2+(x+d)^2)(y^2+(x-d)^2)} \right]. \quad (5)$$

При интегрировании использовались следующие выражения:

$$\overline{\sin^2(\omega t)} = \frac{1}{2},$$

$$\overline{\sin^2(\omega t \pm 120^\circ)} = \frac{1}{2},$$

$$\overline{\sin(\omega t)\sin(\omega t \pm 120^\circ)} = \frac{1}{2}(\cos(\pm 120^\circ) - \cos(2\omega t \pm 120^\circ)) = -\frac{1}{4},$$

$$\overline{\sin(\omega t + 120^\circ)\sin(\omega t - 120^\circ)} = \frac{1}{2}(\cos(240^\circ) - \cos(2\omega t)) = -\frac{1}{4}.$$

Приводя к общему знаменателю (5) будем иметь:

$$H_{\text{д}} = \frac{I_{\text{д}}}{2\pi} \sqrt{\frac{d^2[3(y^2+x^2)+d^2]}{(y^2+(x-d)^2)(y^2+(x+d)^2)(y^2+x^2)}} \quad (6)$$

На рис. 3 приведены графики распределения напряженности магнитного поля при укладке трехфазной линии по варианту “а” в горизонтальной плоскости на высоте y .

Максимальное значение напряженности находится непосредственно под линией при $x=0$ и определяется выражением, легко проверяемым более простым непосредственным рассмотрением:

$$H_{\text{д}} = \frac{I_{\text{д}}}{2\pi} \frac{d\sqrt{3y^2+d^2}}{y(y^2+d^2)} \quad (7)$$

При $d \leq 0,1y$ с погрешностью менее 1% применима приближенная формула

$$H_{\text{д}} = \frac{I_{\text{д}}}{2\pi} \frac{d\sqrt{3}}{y^2} = 0,276I_{\text{д}} \frac{d}{y^2} \quad (8)$$

Погрешность приближения (8) относительно (7) составляет:

$$0,2\% \text{ при } \frac{d}{y} = 0,05;$$

$$0,8\% \text{ при } \frac{d}{y} = 0,1;$$

$$3,2\% \text{ при } \frac{d}{y} = 0,2.$$

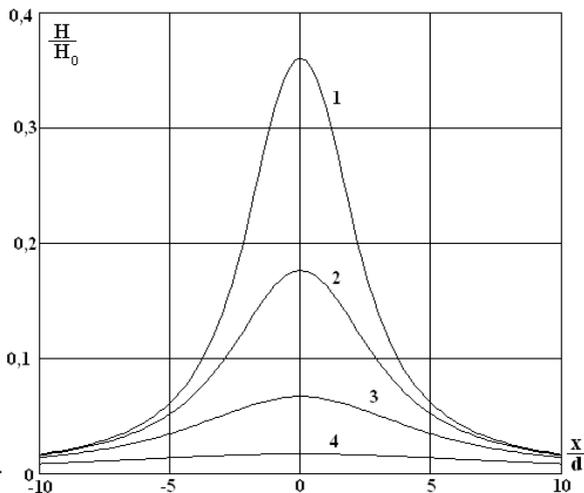


Рис. 3. Распределение напряженности магнитного поля при укладке трехфазной линии по варианту а):

$$1 - \frac{h}{d} = 10; 2 - \frac{h}{d} = 5; 3 - \frac{h}{d} = 3; 4 - \frac{h}{d} = 2$$

Радиус воздействия до значения $0,5H_{\text{дmax}}$ согласно (6) примерно равен $x \approx y$.

2. Трехфазная линия с вертикальным расположением жил в ряд

Данный случай (вариант б) получается из предыдущего путём поворота системы на 90° и замене координат x на y и y на x в выражении (6):

$$H_d = \frac{dI_d}{2\pi} \sqrt{\frac{3(x^2+y^2)+d^2}{(x^2+(y-d)^2)(x^2+(y+d)^2)(x^2+y^2)}} \quad (9)$$

Максимальное значение напряжённости поля будет над линией $x=0$. При $y>d$ будем получаем

$$H_d = \frac{\sqrt{3}I_d d}{2\pi} \frac{\sqrt{y^2 + \frac{1}{3}d^2}}{y(y^2 - d^2)} \quad (10)$$

На рис. 4 приведено распределение напряженности магнитного поля для варианта б) (рис. 1).

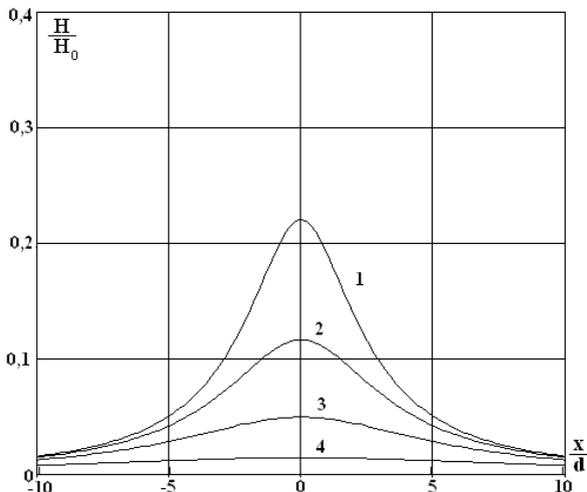


Рис. 4. Распределение напряженности магнитного поля для варианта б):

$$1 - \frac{h}{d} = 10; 2 - \frac{h}{d} = 5; 3 - \frac{h}{d} = 3; 4 - \frac{h}{d} = 2$$

При малых $d \leq 0,1y$ также применима приближенная формула (8)

$$H_d = \frac{I_d d \sqrt{3}}{2\pi y^2} \quad (11)$$

При больших отношения d/y вариант “б” дает большие значение H_d за счет меньшего расстояния до ближайшей жилы.

При любом направлении от линии и расстоянии $l \gg d$ можно пользоваться приближённым выражением

$$H_d = 0.276 \frac{I_d d}{l^2} \quad (12)$$

На основании формул (7) и (10) можно рассчитать необходимое расстояние до центра линии при обеспечении допустимого уровня (ПДУ) напряженности магнитного поля частотой 50 Гц согласно [1-3]. Так требования электромагнитной совместимости технических средств при четвертой степени жесткости испытаний определяют $H_d \leq 30 \text{ А/м}$, требование выполнения санитарных правил при восьми часовом рабочем дне $H_d \leq 80 \text{ А/м}$.

Используя формулу (7) при, $d \leq 0,1y$ получим:

$$y \geq \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{I_d d}{H_{dmax}}} \quad (13)$$

Для примера для кабеля ПвМ 1х240-10 кВ [6], $d=0,0724$ м при номинальном токе $I_d=762$ А, получим при $H_d=30$ А/м; ≥ 1 м.

3.Треугольная прокладка жил трехфазной линии

Рассмотрим магнитное поле трехфазной линии с треугольной прокладкой жил (рис. 5).

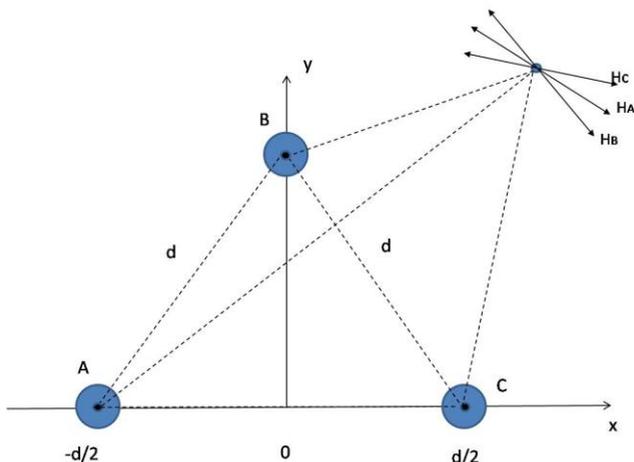


Рис. 5. Треугольная прокладка жил трехфазной линии

Расположим начало координат в середине нижней стороны треугольника. Расстояние между жилами “d”. Применяя ту же методику, что и для рядовой укладке жил, получим следующие выражения для действующего напряжения результирующей напряженности магнитного поля:

$$H_d = \frac{I_d d}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{3}{2}(x^2+y^2) - \frac{\sqrt{3}}{2}yd + \frac{5}{8}d^2}{\left(x^2 + \left(y - \frac{\sqrt{3}}{2}d\right)^2\right) \left(\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + y^2\right) \left(\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + y^2\right)}} \quad (14)$$

На рис. 6 показано распределение магнитного поля для различных h/d . Здесь h также отсчитывается от верхней жилы.

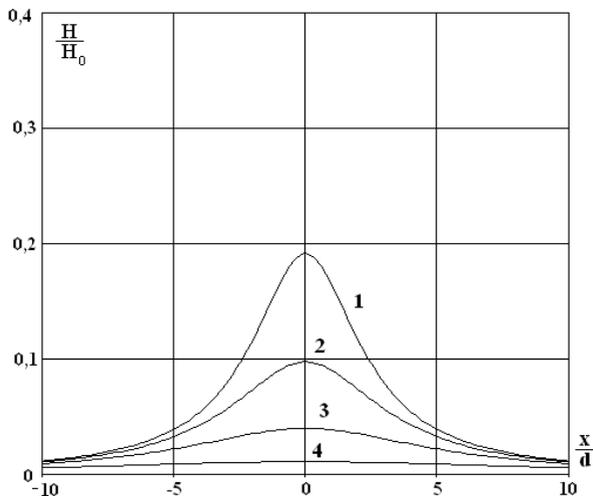


Рис. 6. Распределение магнитного поля для различных расстояний от верхней жилы:

$$1 - \frac{h}{d} = 10; 2 - \frac{h}{d} = 5; 3 - \frac{h}{d} = 3; 4 - \frac{h}{d} = 2$$

Рассмотрим частные случаи.

1. $x = 0$

$$H_d = \frac{I_d d \sqrt{\frac{3}{2}y^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}yd + \frac{5}{8}d^2}}{2\pi(y - \frac{\sqrt{3}}{2}d)(y^2 + \frac{d^2}{4})} = \frac{0,195 \frac{d}{l} \sqrt{1 + \frac{1}{2}(\frac{d}{l})^2}}{1(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{d}{l})^2 (1 - \sqrt{3}\frac{d}{l} + \frac{1}{3}(\frac{d}{l})^2)}, \quad (15)$$

где $l = \sqrt{x^2 + (y - \frac{\sqrt{3}}{6}x)^2}$ расстояние от центра линии до точки наблюдения.

2. $y = 0, x > d/2$

$$H_d = \frac{I_d d}{2\pi(x^2 - \frac{d^2}{4})} \sqrt{\frac{\frac{3}{2}x^2 + \frac{5}{8}d^2}{x^2 + \frac{3}{4}d^2}}. \quad (16)$$

При $d \ll l$ применима аппроксимирующая формула:

$$H_d \approx 0.195 \frac{I_d d}{l^2}, \quad (17)$$

что меньше, чем при рядовой укладке жил. Непосредственное точное рассмотрение этих частных случаев является более простым и подтверждает формулы (15), (16).

Отметим, что аналогичное рассмотрение для двухпроводной однофазной линии дает точное выражение:

$$H_d = \frac{I_d d}{2\pi \sqrt{\left(y^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2\right) \left(y^2 - \left(x - \frac{d}{2}\right)^2\right)}}. \quad (18)$$

При $d \ll y$ будем иметь

$$H_d = \frac{I_d d}{2\pi l^2} = 0.159 \frac{I_d d}{l^2}, \quad (19)$$

то есть меньшее значение, чем трехфазная линия при том же расстоянии между жилами. Непосредственное точное рассмотрение этих частных случаев является более простым и подтверждает формулы (15), (16).

Отметим, что аналогичное рассмотрение для двухпроводной однофазной линии дает точное выражение:

$$H_d = \frac{I_d d}{2\pi \sqrt{\left(y^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2\right) \left(y^2 - \left(x - \frac{d}{2}\right)^2\right)}}. \quad (18)$$

При $d \ll y$ будем иметь

$$H_d = \frac{I_d d}{2\pi l^2} = 0.159 \frac{I_d d}{l^2}, \quad (19)$$

то есть меньшее значение, чем трехфазная линия при том же расстоянии между жилами.

Выводы по работе

1. Получены точные аналитические выражения для значения напряженности магнитного поля при рядовой и треугольной укладке трехфазной линии.

2. При $d \ll l$ справедливы аппроксимации (12) и (19) с погрешностью менее 1% справедливы аппроксимации, показывающие пропорциональность напряженности магнитного поля расстоянию между жилами d и обратную пропорциональность квадрату расстояния до центра жилы.

3. Нарушения ПДУ $H_d=30\text{А/м}$, при $d \ll l$ возникает при

$$I \geq 100 \frac{l^2}{d}$$

при рядовой укладке жил, и

$$I \geq 140 \frac{l^2}{d}$$

при треугольной. Ток I в амперах, d и l в метрах.

Библиографический список

1. **Салтыков В.М., Безменова Н.В.** Электромагнитные поля промышленной частоты в электрических сетях и распределительных установках: Учеб. пособие. М.: Изд. Монограф, 2011. 206 с.

2. **Довбыш В.Н., Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М.** Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография. Самара: Изд. ООО «ИПК Содружество», 2009. 198 с.

3. **Салтыков В.М., Кирпичников И.В.** Исследование электромагнитной обстановки в системе электроснабжения офисного здания // Технологии ЭМС. 2011. № 1 (36). С. 19-24.

4. **Салтыков В.М., Сайдова Н.В.** Условия обеспечения электромагнитной совместимости по магнитным полям промышленной частоты // Технологии электромагнитной совместимости. 2009. № 4 (31). С 18-20.

5. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / И.П. Белоедов, Ю.В. Елисеев, Е.С. Колечицкий и др. М.: Издательство дом МЭИ, 2008. 198 с.

6. **Халилов Ф.Х., Гольдштейн В.Г., Кузнецов Д.В.** Электрические режимы и конструкции кабелей 6-110 кВ с полимерной изоляцией и повышение их надежности: Учеб. пособие. М.: Энергоатомиздат, 2015. 168 с.

7. Теоретическое и экспериментальное исследование уровней магнитных полей вблизи силовых кабельных линий, эксплуатирующихся в городских условиях / А.В. Коржев, А.И. Сидоров, Е.В. Томашева, Р.А. Шаипов // Десятая Всеросс. научн. конф. по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. Сб. науч. докл. С-Пб: Изд-во ВИТУ, 2008. С. 646-651.

8. **Кальчицкий Е.С., Романов В.А., Карташов В.Г.** Защиты биосферы от влияния электромагнитных полей Учеб. пособие. М.: Издательство МЭИ, 2008. 352 с.

УДК 621.311.001.57, 004.032.26

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОГРАММНО- АЛГОРИТМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА БАЗЕ АДАПТИВНЫХ МЕТОДОВ

Канд. техн. наук **Руцков А.Л.**¹

Директор **Сидоренко Е.В.**²

Д-р техн. наук, проф. **Бурковский В.Л.**¹

Канд. экон. наук, доц. **Фёдоров Я.П.**¹

¹Воронежский государственный технический
университет, г. Воронеж

²Нововоронежское представительство
Корпорации АК «ЭСКМ», г. Нововоронеж

***Аннотация.** В статье рассматривается возможность оптимизации сложных технологических процессов передачи и потребления энергетических ресурсов. Отмечена важность учёта слабоформализуемых и неопределённых факторов, влияющих на качество функционирования описываемых классов объектов. Предложено использование нечётких нейронных сетей и регуляторов на их основе для осуществления оптимизации технологических процессов передачи и потребления энергетических ресурсов. Приведена алгоритмическая реализация, сконфигурированная в дальнейшем в имитационной среде Matlab. Получены количественные и качественные параметры, характеризующие качество использования нечётких нейронных регуляторов. В дальнейшем производится описание элементов программной среды на базе предложенных адаптивных подходов к оптимизации сложных технологических процессов. Отмечены возможности проведения сравнительного анализа, а также осуществления имитационного моделирования посредством представленных решений.*

***Ключевые слова:** оптимизация сложных технологических процессов, электроэнергетические системы, минимизация потерь электрической энергии, нечёткие нейронные сети, точность прогнозирования, элементы программного комплекса.*

Содержательная часть.

Оптимизация сложных технологических процессов в электроэнергетических системах (ТП ЭЭС), в наиболее общем случае, осуществляется по критерию минимума потерь мощности и представима в виде выражения:

$$F_j = \sum_{i=1}^k W_i = \sum_{i=1}^k \left[\frac{\left(\sqrt{P_i(U)^2 + Q_i(U)^2} \right) \times R_{\Xi i}}{U_i^2} \times \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta U_{\%i}}{100} \right)^2} - 1 \right) + \Delta P_{xxi} \times T_{pi} \times \left(\frac{U_i}{U_{номi}} \right)^2 + \Delta p_{кори} \times L_i \times k_{Укори} \right] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где W – общие потери электроэнергии в ТП ЭЭС; R_{Ξ} , L – эквивалентные активное сопротивление и длина элементов передачи энергоресурсов; $\Delta U_{\%i}$ – изменение величины питающего напряжения в процентном выражении от номинального значения; ΔP_{xxi} – мощность потерь холостого хода элементов ТП ЭЭС; T_{pi} – число часов работы ТП ЭЭС; $\Delta p_{кори}$ – средние удельные потери на корону в элементах передачи энергоресурсов ТП ЭЭС; $k_{Укори}$ – коэффициент потерь на корону.

Методы

Оптимизация производственных показателей ТП ЭЭС зачастую производится на основе метода Лагранжа применительно к выражению (1) с ограничениями (2). Недостатком данного решения является фактический неучёт неопределённых составляющих, оказывающих существенное влияние на распределение потоков энергоресурсов [1, 2-7].

В качестве альтернативного варианта применяются градиентных методов с постоянным и переменным шагом (в частности, на основе алгоритма Ньютона-Рафсона).

Для оптимизации производственных показателей ТП ЭЭС с учётом неопределённых составляющих целесообразно использовать модернизированный алгоритм Ньютона-Рафсона с включением в его структуру нечётких нейронных регуляторов (ННР) [8, 9]. Реализация отмеченного подхода имеет последовательность шагов, представленных в алгоритме, приведённом на рис. 1 [9].

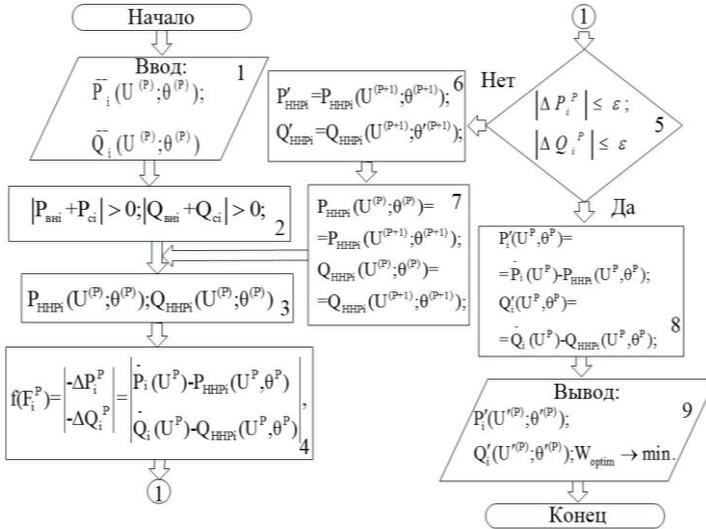


Рис. 1. Модифицированный алгоритм Ньютона – Рафсона для оптимизации ТП ЭЭС с включением ННР

На рис. 1 введены следующие обозначения: $P_{\text{HNR}i}(U^{(P)}; \theta^{(P)})$, $Q_{\text{HNR}i}(U^{(P)}; \theta^{(P)})$ – прогноз активной и реактивной мощности с применением ННР; $f(F^P)$ – вектор небалансов на n -ой итерации; $\bar{P}(U^P)$, $\bar{Q}(U^P)$ – задание активной и реактивной мощности в узле ТП ЭЭС; ΔP^P , ΔQ^P – невязки по активной и реактивной мощности; $P'_{\text{HNR}i}$, $Q'_{\text{HNR}i}$ – скорректированные векторы активной и реактивной мощности; $U^{(P+1)}$, $\theta^{(P+1)}$ – амплитуда напряжения и сдвиг по фазе при осуществлении итераций.

Сравнительный анализ функционирования системы управления ТП ЭЭС с использованием модифицированного алгоритма Ньютона – Рафсона реализован в рамках ANFIS структуры программного комплекса Matlab.

Наилучшие результаты продемонстрировал вариант ННС на основе алгоритма Мамдани при используемой конфигурации входных термов ($9 \times 3 \times 3$) и функцией принадлежности – psigmf .

Результаты

Полученные в ходе функционирования отмеченного алгоритма оптимизации ТП ЭЭС результаты реализованы в виде элементов программного комплекса [7]. Пользователю при этом предоставляется возможность осуществления как оперативного (до суток), так и среднесрочного управления (недельные, месячные колебания) параметров технологического цикла преобразования, передачи и потребления энергоресурсов. При построении необходимых зависимостей требуется выбрать интересующий период, для которого необходим анализ перетоков мощности в ТП ЭЭС. Реализованный программный комплекс позволяет также производить совместные вычисления по нормативному методу распределения энергоресурсов и осуществлять сравнительный анализ с функционированием системы на базе ННР.

Вид графика совместного анализа результатов нормативного (классического) процесса управления энергоресурсов и ННС системы приведён на рис. 2. Можно видеть, что в данном блоке программного комплекса реализована также функция «Сравнить прогноз управления с реальными значениями», которая предоставляет возможность в графическом виде вывести совмещенные графики прогнозных выборов управления и реальных значений для аналогичных периодов.

Интерфейс разработанных элементов программного обеспечения содержит взаимосвязанные формы, в первой из которых организована область автоматического или ручного заполнения пользовательской информации.

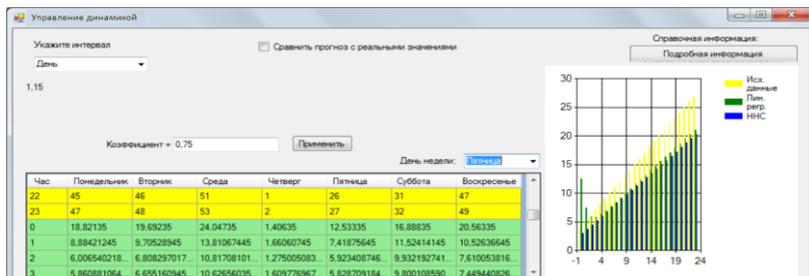


Рис. 2. Вид блока совместного анализа реальных и управляемых в оперативном и среднесрочном периоде показателей

По окончании формирования соответствующих баз данных открывается возможность заполнения параметров настройки как классического метода, так и реализации на базе ННС (ННР). Стоит отметить, что в рамках рассматриваемого подхода возможен не только анализ данных по мощности, но и по объёмам переданной электроэнергии.

В элементах программного комплекса также организована возможность просмотра справочных данных об алгоритмах, применяемых для управления перетоков энергоресурсов в ТП ЭЭС.

В разработанном решении также предусмотрены проверки корректности введенных данных на различных этапах, в том числе, для баз данных предыдущих периодов. Так, перед началом работы алгоритма оптимизации ТП ЭЭС производится проверка корректности и полноты введенных данных, которые при необходимости могут быть дополнены.

Разработанный интерфейс программного комплекса является удобоваримым для использования как в автоматическом, так и в ручном режиме, что подтверждено результатами апробации.

Анализ функционирования модели оптимизации ТП ЭЭС по показателю минимума потерь энергоресурсов, построенной на основе ННР позволяет говорить о её высоких точностных характеристиках, значительно превосходящих точность существующих классических реализаций (порядка 3-6%), что подтверждается данными рис. 3, 4.

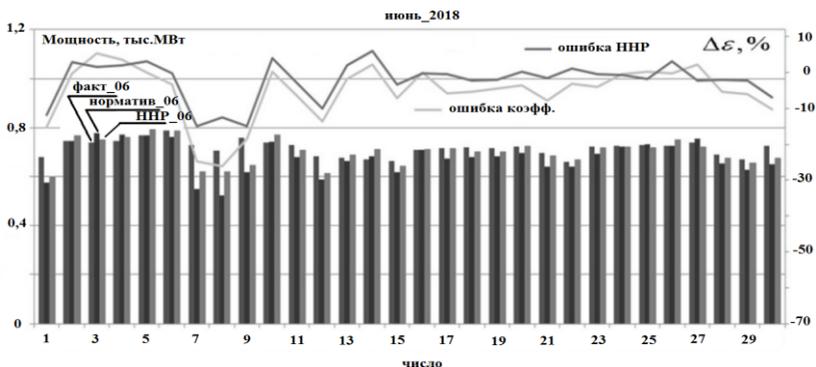


Рис. 3. Прогнозирование оптимизации ТП ЭЭС Воронежского узла нагрузки (июнь 2018 года):

факт, норматив, ННР – тыс. МВт; ошибка функционирования систем прогноза на основе нормативного метода и применения ННС – %

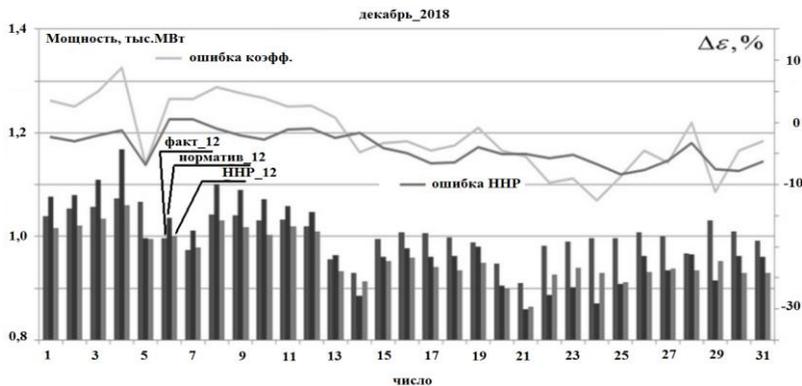


Рис. 4. Прогнозирование оптимизации ТП ЭЭС Воронежского узла нагрузки (декабрь 2018 года):
 факт, норматив, ННР – тыс. МВт; ошибка функционирования систем прогноза на основе нормативного метода и применения ННС – %

Выводы по работе

1. Осуществлена оптимизация сложных ТП ЭЭС с учётом слабоформализуемых факторов посредством применения нечётких нейронных сетей и регуляторов на их основе. Представлен алгоритм, позволяющий реализовать корректировку параметров управления в режиме реального времени.

2. Ошибка прогноза в оперативном и среднесрочном периоде находится в диапазоне от 1,6 % до 3,5 %, что позволяет говорить о высоком потенциале использования описанного подхода в существующих узлах энергетической нагрузки (в частности, в сфере электроэнергетики).

3. Разработанные элементы программного комплекса оптимизация ТП ЭЭС позволяют осуществлять автоматизированный контроль и управление параметрами нагрузки на основе оценки динамики реальных и прогнозных графиков распределения потоков мощности.

4. Возможна организация обратной связи с исполнительными механизмами ТП ЭЭС и их оптимизация на базе предварительно проведённого имитационного моделирования.

5. Полученные в рамках разработанных элементов программного комплекса результаты функционирования ТП ЭЭС Воронежского узла нагрузки свидетельствуют о достоверности выводов, касающихся актуальности применения ННС (ННР) в качестве адаптивных структур, позволяющих учитывать слабоформализуемые факторы.

Библиографический список

1. **Крысанов В.Н., Шарапов Ю.В., Руцков А.Л.** Анализ программно-аппаратного обеспечения сетей Smart Grid // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т.11, № 4. С. 97-101.
2. **Migliore M. et al.** Parallel network simulations with NEURON // Journal of computational neuroscience. 2006. Vol. 21, № 2. P. 119-129.
3. **Berenji H.R.** A Reinforcement Learning-Based Architecture for Fuzzy Logic Control // International Journal of Approximate Reasoning. 1992. № 6. P. 267-292.
4. An Algorithm for Fast Convergence in Training Neural Networks / **В.М. Wilamowski, S. Iplikci, М.О. Kayank, М.О. Efe** // International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'01), Washington DC, July 15-19. 2001. P. 1778-1782.
5. **Xie T.T., Yu.H., Wilamowski B.M.** Replacing fuzzy systems with neural networks // IEEE Conf. on Human System Interaction. Rzeszow, Poland. 2010. P. 189-193.
6. **Yu H., Wilamowski B.M.** Efficient and reliable training of neural networks // 2nd IEEE Human System Interaction. Catania, Italy. 2009. P. 109-115.
7. **Крысанов В.Н., Руцков А.Л., Махмуд Шукур Омар Махмуд** Системная оптимизация экономических показателей функционирования системного оператора в Воронежской энергосистеме // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 3. С. 62-67.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ СУБЪЕКТОВ ОРЭМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЁТКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Канд. экон. наук, доц. **Фёдоров Я.П.**

Д-р техн. наук, проф. **Бурковский В.Л.**

Канд. техн. наук **Руцков А.Л.**

*Воронежский государственный технический
университет, г. Воронеж*

***Аннотация.** В статье подробно рассматриваются основы функционирования балансирующего рынка электроэнергии РФ с учётом существующих экономических стимулов. Отмечена особая роль процесса прогнозирования потребления энергоресурсов, напрямую влияющего на формирование затрат в рамках отмеченной торговой площадки.*

Проведён анализ влияния различных факторов на точность реализации модели на сутки вперёд. Проблему слабоопределённых и неизвестных составляющих, оказывающих влияние на функционирование балансирующего рынка электроэнергии, предложено решить посредством применения нечёткого нейронного регулятора. Приведена его структура, настройки, а также отмечены возможности масштабирования для применения в качестве как анализатора, так и исполнительного элемента в подсистемах электроэнергетических систем.

Отмечена высокая точность функционирования нечёткого нейронного регулятора – порядка (0,5-3) %, что существенно превосходит применяемые методы (в частности, на базе коэффициента спада/роста потребления мощности).

***Ключевые слова:** оптовый рынок электроэнергии и мощности; экономические стимулы; прогнозирование электропотребления, нечёткие нейронные сети, имитационное моделирование.*

Введение

Оптовый рынок электроэнергии и мощности (ОРЭМ) РФ является технико-экономической площадкой, обеспечивающей конкурентные условия для выработки, транспортировки и потребления энергоресурсов в масштабах 75 территориальных регионов.

ОРЭМ состоит из следующих элементов (рис. 1):

– рынок электроэнергии (в состав которого входят три сегмента: регулируемые договоры (РД); «рынок на сутки вперёд» (РСВ); а также

балансирующий рынок (БР)) – производство и продажа электрической энергии;

– рынок мощности – торги на предоставление резерва присоединённой мощности;

– рынок системных услуг – обеспечение качественных и количественных характеристик энергоресурсов;

– системный оператор единой энергетической системы (СО «ЕЭС») – технический регулятор рынка;

– некоммерческой партнёрство администратор торговой сети (НП «АТС») – экономический орган управления.

– федеральная антимонопольная служба (тарифное регулирование в части РД); министерство энергетики РФ (законодательное обеспечение, надзорные функции) – на рис. опущены.

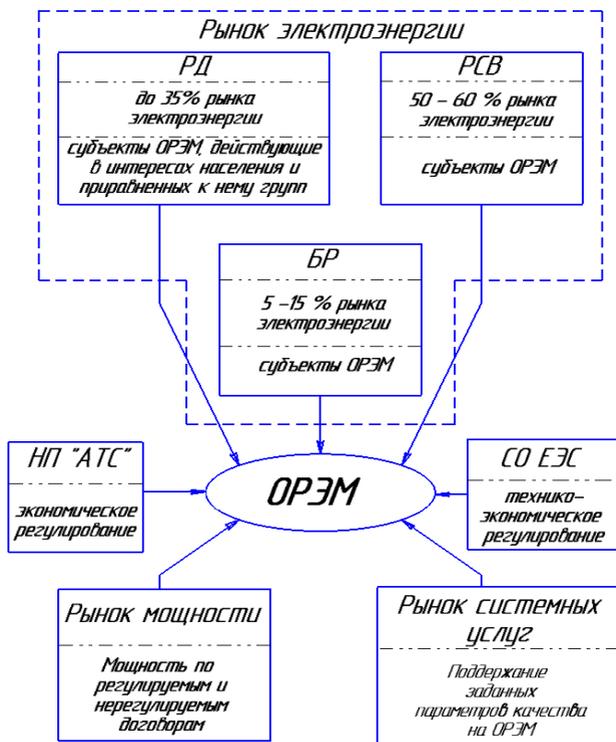


Рис. 1. Структурная схема ОРЭМ

Методы

Особенностью энергетических ресурсов является невозможность их существенного накопления, и, как следствие, необходимость соблюдения баланса их выработки и потребления в режиме реального времени. Последнее обстоятельство является основным техническим фактором необходимости обеспечения минимизации ошибки прогноза электропотребления.

ОРЭМ содержит экономический стимул повышения точности прогноза, заключающийся в том, что все отклонения электропотребления от плановых значений (предварительно поданных субъектами заявок при формировании РСВ) покупаются или продаются по ценам БР. Особенностью балансирующего рынка является разнонаправленная динамика формирования цены покупки/продажи недостаточно/излишнего объёма энергоресурсов:

$$C_{БР_ПОК} = \max(C_{РСВ}; C_{БР});$$

$$C_{БР_ПРОД} = \min(C_{РСВ}; C_{БР});$$

где $C_{РСВ}$ – цена на объём электроэнергии на РСВ; $C_{БР}$ – цена на объём электроэнергии на БР.

Механизм формирования РСВ предполагает нахождение равновесной цены и объёмов поставки(потребления) – отобранные заявки, учитываемых в данном сегменте рынка электроэнергии за сутки до наступления расчётного периода. Не отобранные объёмы либо торгуются на БР, либо должны быть исключены по собственной инициативе субъекта рынка (отказ от производства/потребления электроэнергии).

Таким образом, отклонения от прогнозных значений заявок, попавших в отбор на РСВ, в рамках расчётных суток фактического потребления энергоресурсов ведёт к убыткам субъекта, допустившего данные отклонения в случае, если они ведут к нарушению планового графика [1,2]. Так реализуется механизм своеобразной штрафной надбавки, которая компенсирует затраты производителей и инфраструктурных участников на непредвиденные режимы работы (характеризуются повышением издержек). Отметим, что в случае того же дефиците предложения, при продаже потребителем ОРЭМ объёмов энергоресурсов, он реализует данную инициативу по цене – $C_{РСВ}$ (т.к. способствует восстановлению баланса, приближая его к равновесному объёму).

Анализ данных сайта ОРЭМ [3] свидетельствует о том, что средняя величина абсолютных отклонений Δ_{PCB} от Δ_{BP} за период 6 месяцев 2019 года для первой ценовой зоны РФ лежит в диапазоне $\pm(17 \div 35) \%$; усреднённый объём балансирующего рынка за аналогичный период – 47,468 млрд. кВт·ч (или 12,25 % от рынка электроэнергетики).

Снижение доли БР возможно за счёт повышения точности прогноза электропотребления. Для этой цели обоснованным является применение методов нечётких нейронных сетей (ННС) [2,4] и нечётких нейронных регуляторов (ННР) на их основе.

На рис. 2 представлена обобщённая структурная схема ННР, использующая текущее значение вектора задания в i -ый момент времени – $g_3(i)$ – входные параметры для оценки прогноза электропотребления в будущих периодах; а также выхода эталонной модели объекта – $y_2(i+k)$ – значение прогноза. Эталонная модель на основе ИНС (является эталонной моделью объекта управления (ОУ), в данном случае – рынка электроэнергии ОРЭМ) описывает динамику рассматриваемой системы в соответствующих временных периодах, обучаясь по прогнозу ошибки – $e_2(i+k) = y_2(i+k) - y_{OY}(i)$, и управляющему сигналу – $y_1(i+k)$. Вектора настройки – w_1, w_2 дают возможность осуществлять параметрирование входных термов (для ННС) и активационных функций (для ИНС).

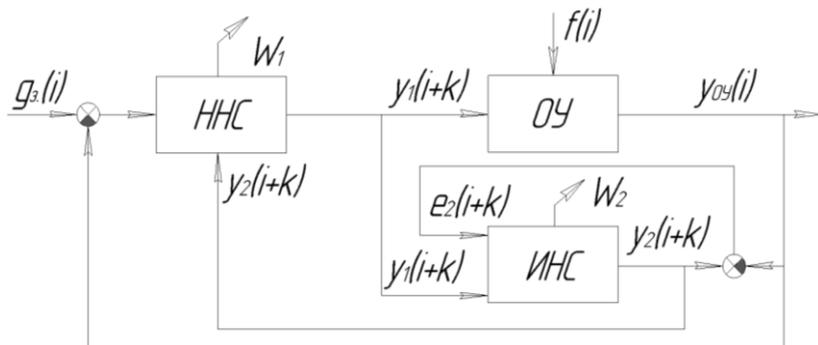


Рис. 2. Структурная схема ННР для осуществления прогноза электропотребления субъектов ОРЭМ

Вектора $g_3(i)$ и $y_2(i+k)$ в качестве входных используют следующие базы данных (БД):

– распределения объёмов потребления субъекта ОРЭМ в предыдущих периодах $P(i)$;

– циклические и случайные факторов (воздействие окружающей среды, режимы работы, связанные с календарной периодичностью)- $M(i)$;

– планируемая структура энергоприёмников – $S(i)$.

Результаты

При помощи настроек, приведённых выше, ННР реализует инверсную модель ОУ, и является управляющим контроллером с высокими адаптивными свойствами, обусловленными полноценным учётом неопределённых факторов.

Следует отметить особенности подобной организации [5,6]:

– нечёткая нейронная сеть (ННС), входящая в состав нечёткого регулятора, имеет свободно масштабируемую структуру, а, следовательно, возможности применения к субъектам ОРЭМ произвольной структуры;

– искусственная нейронная сеть (ИНС), реализующая эталонную модель ОУ, повышает эффективность принимаемых решений при оценке текущего состояния оборудования энергоприёмников.

Наилучшие результаты в рамках исследований показали П-образная и гауссовская функции принадлежности термов входных переменных. Выход ННР выполнен в виде линеаризованной величины.

Структура эталонной модели (ИНС) представлена с помощью многослойного персептрона, обученного на алгоритме скоростного обратного распространения ошибки. Структура сети переменная, и зависит от ОУ. Тип функции активации – сигмоида.

Общая структура ННР, реализованного для процесса управления динамикой прогнозного электропотребления субъектов ОРЭМ в краткосрочном и среднесрочном периодах (для случая распределения входных термов – $9 \times 3 \times 3 : P(i) \times M(i) \times S(i)$) приведена на рис. 3.

В качестве алгоритма обучения использовано сочетание метода наименьших квадратов и метода убывания обратного градиента (hybrid).

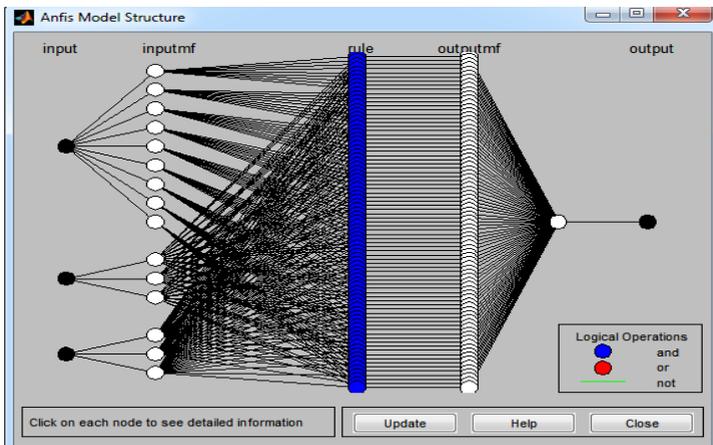


Рис. 3. Структура базовой ННС в рамках разработанного ННР

Анализ функционирования ННР [7] прогнозирования электропотребления на ОРЭМ позволяет говорить о её высоких точностных характеристиках. Погрешность по результатам оценки тестовой выборки не превышает 3,2 %. Исходя из этого, а также, пользуясь оценкой объёмов БР и средневзвешанной величины отклонения Π_{PCB} от Π_{BP} за период 6 месяцев 2019, можно получить качественную оценку возможной экономии от применения ННР субъектами ОРЭМ на уровне 4,231 млрд. кВт·ч.

В качестве экспертной рекомендации, авторы [1] указывают на целесообразность корректировки графика прогноза потребления на величину, не превышающую ошибку прогноза по технологическим факторам. Однако, в реальности, ввиду отсутствия (существенной недостаточности) сведений о конкурирующих компаниях, более выгодным видится повышение точности собственного объёма потребления при возможности корреляции данного показателя после поступления информации о смежных потребителях с высокой степенью достоверности.

Заключение

1. Применение моделей управления динамикой распределения потоков мощности в составе АСДУЭ на основе ННР (ННС) позволяет добиться погрешности порядка (0,5 – 3) %, что существенно превосходит применяемый в существующих системах метод коэффициента спада/роста потребления мощности с погрешностью (3 – 6) %.

2. Отмеченное снижение погрешности управления динамикой потоков мощности в оперативном и среднесрочном периодах в моделях на основе ННР(ННС) возможно за счёт комплексного учёта как внешних (метеоусловия, цикличности функционирования предприятий), так и внутренних (изменение режимов функционирования) неопределённых факторов, влияющих на элементы ЭЭС.

3. Разработанная модель управления динамикой мощности на базе ННР (ННС) является легко масштабируемой, что позволяет применять её как для оперативного применения в рамках блока планирования, так и для среднесрочного анализа распределения энергоресурсов.

4. Следует отметить возможность разработки оптимальной стратегии в соответствии с подходами, изложенными в статье, правомерна для генерирующих компаний и рынка энергоресурсов в целом.

Библиографический список

1. **Соловьева И.А., Дзюба А.П.** Прогнозирование электропотребления с учетом факторов технологической и рыночной среды // Научный диалог. 2013. № 7(19). С. 97-113.

2. **Крысанов В.Н., Руцков А.Л., Махмуд Шукур Омар Махмуд** Системная оптимизация экономических показателей функционирования системного оператора в Воронежской энергосистеме // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 3. С. 62-67.

3. Данные оптового рынка электроэнергии и мощности x[Электронный ресурс]. URL: <https://br.so-ups.ru/>.

4. Neural model with particle swarm optimization kalman learning for forecasting in smart grids / A.Y. Alanis, L.J. Ricalde, C. Simetti, F. Odone // Mathematical Problems in Engineering. 2013. 197690.

5. Forecasting electrical energy consumption of equipment maintenance using neural network and particle swarm optimization / X. Jiang, H. Ling, J. Yan et al. // Mathematical Problems in Engineering. 2013. 194730.

6. **Shi B., Yu-Xia L.L., Xin-Hua Y.U.** Short-term load forecast based on modified particle swarm optimizer and back propagation neural network model // Journal of Computer Applications. 2009. № 29(4). P: 1036-1039.

7. **Бурковский В.Л., Крысанов В.Н., Руцков А.Л.** Реализация программного комплекса прогнозирования уровня регионального энергопотребления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т.12, № 3. С. 41-47.

САПР РАСЧЕТА РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Д-р техн. наук, доц. **Фролов В.В.**¹

Канд. техн. наук, доц. **Приходько О.Ю.**²

Ст. преп. **Слипченко С.Е.**³

Канд. техн. наук, доц. **Матюшенко Н.В.**³

¹*Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина, г. Харьков*

²*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

³*Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт», г. Харьков*

***Аннотация.** Разработана система автоматизированного проектирования (САПР), решающая задачи проектного и проверочного расчета обычных и связанных линейных размерных цепей. В основу САПР для проектного расчета положены метод генетического поиска и метод имитационного моделирования. При реализации этих методов применяется генетический алгоритм, который позволяет находить решение в задачах большой размерности. Для оценки эффективности САПР выполнен сравнительный анализ проектного решения, выполненного методом регулировки и автоматизированным способом.*

***Ключевые слова:** звено размерной цепи, размерная цепь, САПР, генетический алгоритм, имитационное моделирование.*

Введение.

В общем объеме проектных расчетов размерных цепей, основное место занимают размерные цепи с линейными размерами. Эффективность проектного расчета размерных цепей можно охарактеризовать двумя группами параметров: параметры, касающиеся самого процесса проектирования; параметры проектных решений, которые влияют на производство и эксплуатацию конструкций. Первая группа параметров включает в себя: трудоемкость подготовки исходных данных и самого проектирования, сложность корректировки результатов расчета с целью повышения качества проектного решения. Вторая группа характеризуется степенью экономического обоснования параметров точности звеньев (кавалитет точности, отклонение) с точки зрения изготовления и эксплуатации конструкции. Для повышения эффективности расчетов

размерных цепей в современных САПР используются: специальные библиотеки для проверочного расчета [1]; программные модули для проверочного расчета типа механического калькулятора допуска [2]; имитационное моделирование проектного расчета [3]; размерный анализ на основе параметрических моделей [4]; объединение в единую вычислительную среду через API конструкторских САПР и математических пакетов для повышения эффективности вычислений [5]. Классические методы расчета размерных цепей, такие как метод расчета на максимум-минимум [6] и вероятностный наиболее удачно применяются в автоматизации проектного расчета с использованием методов имитационного моделирования. Сейчас наблюдаются широкое применение в машиностроении искусственных нейронных сетей (ИНС) для проектирования и управления в технологических системах [7].

Анализ рынка программного обеспечения показывает, что доля автоматизации проверочного расчета размерных цепей значительно превышает долю проектного, в связи с трудоемкостью ее автоматизации, поэтому разработка САПР для проектного расчета линейных размерных цепей является актуальной задачей.

Цель работы – повышение эффективности решения задачи проектного расчета линейных размерных цепей, за счет применения САПР, основанной на методе генетического поиска с применением ИНС. При этом необходимо решить задачи связанные с разработкой архитектуры САПР и ее реализацией на платформе .NET, а также проверить на практике качество проектных решений в этой системе.

Архитектура и основные характеристики САПР.

САПР расчета размерных цепей разработана на основе двух подходов к расчету размерных цепей: метода генетического поиска [8]; имитационного моделирования с использованием генетического алгоритма. Система обеспечивает связь с внешней конструкторской САПР через API, в данной реализации это Компас и SolidWorks. В основу САПР положена объектная модель предметной области (DDD в международной аббревиатуре), которая позволяет с минимальными доработками добавлять новые программные модули в систему. В связи с этим привязка к новой конструкторской САПР, не представляет затруднений. Для передачи и хранения данных в формате XML, разработана информационная модель размерных цепей – Chains Model, которая представлена на рис. 1. Корень модели chains предоставляет информацию о дате и времени создания документа для расчета размерных цепей, а также информацию об использовании таблицы предпочтительных допусков и отклонений стандарта ISO при расчете.

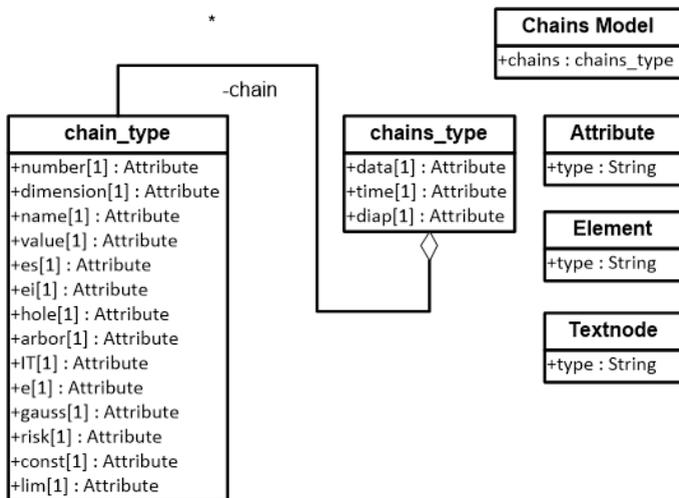


Рис. 1. Информационная модель расчета размерных цепей

Основными элементарными единицами модели являются звенья размерной цепи – chain. Звенья размерной цепи имеют сложный тип данных, который учитывает особенности математических моделей двух выше указанных подходов. САПР позволяет рассчитывать как простые, так и связанные размерные цепи. Поэтому в расчетном документе необходимо размещать информацию сразу о нескольких размерных цепях, что выражается в наличии атрибута number, описывающего к какой размерной цепи относится звено. Технические ограничения, которые задаются в математической модели из [8], реализуются в атрибутах: IT – множество допустимых значений при расчете; e – множество допустимых отклонений; const – ограничение, предполагающее неизменяемость параметров размера при проектном расчете размерных цепей; lim – ограничение, указывающее на эквивалентность параметров звеньев размерной цепи при расчете. Информационная модель (рис. 1) является основой для всех действий, выполняемых при расчете: хранение данных в файле расчета; копирование данных через буфер обмена; передача данных из внешней конструкторской САПР и обратно; вывод данных на печать и в текстовый файл, импорт данных из внешних файлов.

Для оптимизационных расчетов данная информационная модель преобразуется в тип Dimension (см. рис. 2) на языке платформы .NET, который является основой всех расчетов в системе.

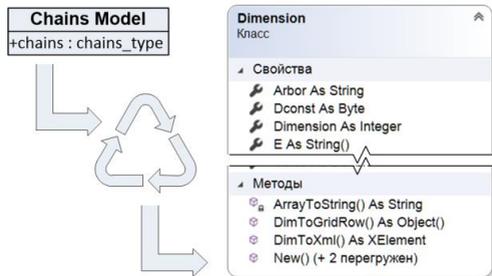


Рис. 2 Схема преобразования модели в тип Dimension

При разработке архитектуры САПР был реализован подход отделения бизнес логики от интерфейса, что наглядно продемонстрировано на схеме (см. рис. 3).

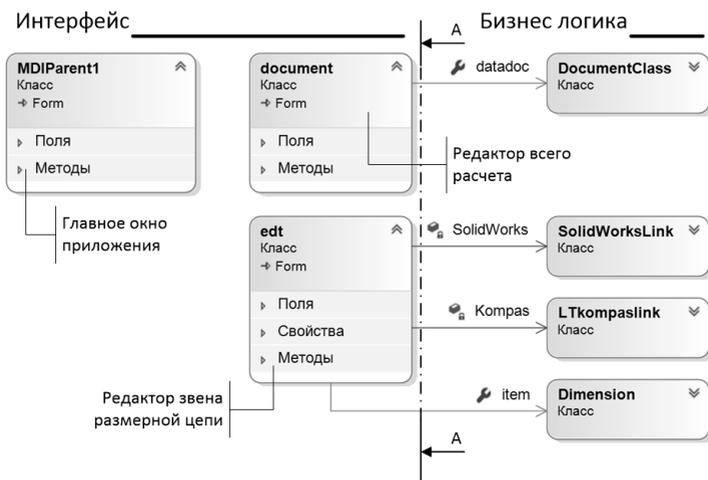


Рис. 3. Обобщенная схема САПР расчета размерных цепей

Основой интерфейса являются два редактора: редактор расчета (document), который используется для выполнения действий на уровне размерной цепи; редактор звена (edt), необходимый для изменения параметров отдельного звена. В системе реализован асинхронный интерфейс, поэтому в главном окне приложения можно запустить сразу несколько редакторов расчета для параллельных вычислений. Все оп-

тимизационные расчеты выполняются с помощью параллельного генетического алгоритма, реализованного в модели предметной области. Точкой доступа к методам и типам модели предметной области служит тип DocumentClass. Доступ к внешней САПР реализуется с помощью классов SolidWorksLink, LTkompaslink.

Практическое применение САПР для расчета размерной цепи пиноли задней бабки токарного станка. Задача расчета размерных цепей пиноли задней бабки токарного станка и анализ результатов для ручного способа методом регулировки приведены в [9 с. 99-104]. Данные для расчетов размерной цепи «А» в САПР возьмем из таблицы [9 с. 102 таб. 3.1]. Расчет будем производить эволюционным методом, который используется в САПР. Результаты расчета, для методов полной и неполной взаимозаменяемости приведены на рис. 4.

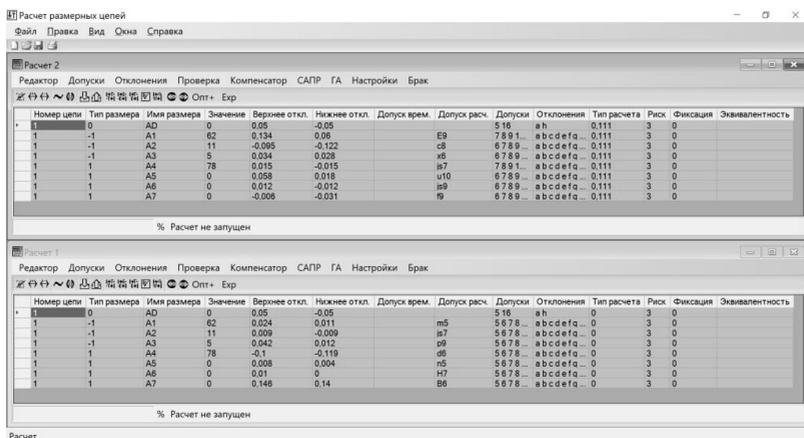


Рис. 4. Результаты расчетов по методам полной и неполной взаимозаменяемости с помощью эволюционных вычислений

Здесь в окне «Расчет 1» получены результаты по методу полной взаимозаменяемости с ограничениями: качества изменяются от 5 до 16; отклонения подбираются из всего множества отклонений допустимых в системе для валов и отверстий. Результаты расчета по методу неполной взаимозаменяемости с вероятностью 0,27 и ограничениями на диапазоны качеств от 6 до 16, приведены в окне «Расчет 2». Выбор отклонений выполнялся для всех отклонений допустимых стандартом, чтобы получить точное решение без необходимости расчета значений компенсатора. Расчеты показывают, что точное решение за-

дачи существует, но для метода полной взаимозаменяемости предъявляются очень высокие требования к точности звеньев размерной цепи, о чем говорит наличие 5 квалитета при расчетах, причем для размера А1 это практически невыполнимо из экономических соображений. При методе неполной взаимозаменяемости система находит достаточно приемлемое решение, также без использования компенсатора и трудоемких расчетов методом регулировки. Здесь очень высокие требования по точности предъявляются к размеру А3, но поскольку это промежуточное кольцо с номинальным размером 5 мм, их вполне возможно выполнить на шлифовальном станке по нужному квалитету. Остальные точности размеров находятся в диапазоне от 7 до 10 квалитета, что позволяет применять для их обеспечения экономически обоснованные методы обработки.

Сведя в табл. 1 данные расчетов в САПР и других авторов, наглядно можно увидеть за счет чего было найдено точное решение Адр для замыкающего звена Ад.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов

Звено	Знач.	Ручной расчет [8]			САПР			К
		es	ei	T	es	ei	T	
A1	62	0	-0,14	0,14	0,134	0,06	0,074	0,53
A2	11	0	-0,1	0,1	-0,095	-0,122	0,027	0,27
A3	5	0	-0,01	0,01	0,034	0,028	0,006	0,6
A4	78	0,04	-0,04	0,08	0,015	-0,015	0,03	0,38
A5	0	0,005	-0,005	0,01	0,058	0,018	0,04	4
A6	0	0,005	-0,005	0,01	0,012	-0,012	0,024	2,4
A7	0	0,01	-0,01	0,02	-0,006	-0,031	0,025	1,25
Адр	0	0,3	-0,06	0,36	0,05	-0,05	0,1	
Ад	0	0,05	-0,05	0,1				
ERR		0,25	0,01		0	0		

Коэффициент К в последнем столбце табл. 1 показывает во сколько раз увеличивается допуск каждого звена при расчете в САПР. Решение проектной задачи в САПР, было получено путем ужесточения допусков звеньев А1–А4 и расширением допусков А5–А7 в разы.

Выводы по работе. Путем перераспределения доли допуска замыкающего звена между составляющими звеньями, определенным образом, можно получать точные решения проектной задачи расчета размерных цепей с погрешностью ERR=0, тогда как эта погрешность в

классических методах устраняется обычно применением метода регулировки. САПР расчета размерных цепей, реализует подход, который невозможен в классических методах расчета (метод равных допусков, метод равных квалитетов и т.д.), поскольку они ориентированы на снижение размерности задачи, а перераспределение, за счет введения большего диапазона варьирования, повышает ее размерность. Но именно за счет этого и получаются точные решения. В случае возникновения погрешности расчета, есть возможность выбрать наиболее приемлемое решение из некоторого множества вариантов, которые предоставляет САПР.

Библиографический список

1. АСКОН Приложение Размерные цепи. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. URL: https://kompas.ru/source/info_materials/user-manuals/rukovodstvo-polzovatelya-razmernye-cepj.pdf.
2. Inventor 2016 Справка: Механический калькулятор допуска [Электронный ресурс]. URL: <http://help.autodesk.com/view/INVENTOR/2016/RUS/?guid=GUID-A447C0F3-17E4-4A49-9D7F-4F6329ACE7B9>.
3. **Бирбраер Р., Космачев Ю.** SETOL 6 Сигма: Осознанная целесообразность точности [Электронный ресурс] // Умное производство. 2017. № 40. URL: http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=212&group_id_4=68.
4. **Абзалов А.Р., Иванова В.Н., Хабаров А.Е.** Размерный анализ на основе параметрических моделей с использованием электронных таблиц [Электронный ресурс] // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 12. С. 9-13. URL: <https://www.top-technologies.ru/pdf/2016/12-1/36467.pdf>.
5. **Анкин А.В., Кузьминский Д.Л.** Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 2. С. 106-110.
6. **Тетерина И.А., Любимый Н.С., Чепчуров М.С.** Оценка возможности обеспечения точности получаемых изделий на примере анализа размерной цепи детали «ЗВЕЗДОЧКА» // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 7. С. 140-145.
7. **Баранов Д.С., Дуюн Т.А.** Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования шероховатости при чистовом и получистовом точении // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 7. С. 128-134.
8. **Фролов, В.В.** Метод генетического поиска для проектного расчета размерных цепей // Информатика. 2019. Том 16, № 1. С. 103-114.
9. Проектирование технологии автоматизированного машиностроения: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / И.М. Баранчукова, А.А. Гусев, Ю.Б. Крамаренко и др.; Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Высш. шк., 1999. 416 с.

СИСТЕМНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕРНИЗАЦИИ ГЛАВНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ АЭС С ВВЭР ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПРИВОДАМИ*

Д-р техн. наук, проф. **Хрусталева В.А.**¹

Науч. сотр. **Гариевский М.В.**²

¹*Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов*
²*Саратовский научный центр РАН, г. Саратов*

Аннотация. Современное состояние исследований по адаптации действующих АЭС с ВВЭР в РФ к требованиям энергосистем можно назвать недостаточным. Одной из наиболее эффективных технологий, позволяющих принципиально решить проблему маневренности водородных реакторных установок, является модернизация главных циркуляционных насосов путем установки частотно-регулируемых приводов. При их использовании мощность блока можно увеличивать до сверхноминального значения для повышения эффективности, регулирования частоты в энергосистеме и ликвидации системных аварий. Предложена методика оценки системной эффективности оснащения ГЦН мощных энергоблоков АЭС с ВВЭР частотно-регулируемыми приводами. Показано, что повышение мощности, маневренности и приёмистости энергоблока с ВВЭР установкой частотно-регулируемых приводов ГЦН приводят к росту системной конкурентоспособности АЭС, особенно в энергосистемах, где их доля высока.

Ключевые слова: атомная электростанция, энергосистема; частота; противоаварийное регулирование; главный циркуляционный насос; частотно-регулируемый привод.

Проблема маневренности АЭС сегодня актуализируется прежде всего в тех ОЭС, где их доля уверенно растёт, например, в центре Европейской части РФ. Ранее эта задача обозначилась в атомной энергетике Франции и Германии, где АЭС относительно давно работают в режиме участия в регулировании частоты [1]. При росте доли возобновляемых источников энергии (ветра, солнца и др.) и/или значительной доле ядерной генерации в общем производстве электроэнергии АЭС вынуждены работать в переменном режиме, несмотря на очевид-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00220 А

но невыгодное снижение КИУМ [2]. Хотя средняя доля атомной генерации в энергобалансе России в 2018 г. составляла 19,1%, в некоторых частях энергосистемы страны вклад АЭС значительно выше (в ОЭС Центра – 41,0%, Северо-Запада – 34,5%, Средней Волги – 28,1%) [3]. В ЕЭС России доля ВЭС и СЭС в 2018 г. составляла соответственно 0,02% и 0,07% (по выработке) и, таким образом, эта фактор пока не является значимым.

Цель работы – разработка научных основ адаптации АЭС с ВВЭР к перспективным требованиям российских и зарубежных энергосистем на основе модернизации системы регулирования первого контура. Одной из наиболее эффективных технологий, позволяющих принципиально решить проблему маневренности водо-водяных реакторных установок, является плавное изменение расхода теплоносителя в главных контурах реактора регулированием частоты вращения электроприводов главных циркуляционных насосов (ГЦН) [4]. Отметим, что регулирование частоты приводов ГЦН в РФ уже выполнено на АЭС с БН реакторами с целью стабилизации работы петель натриевых контуров [5].

Работа АЭС при дефиците активной мощности вызывает снижение числа оборотов ГЦН и уменьшение расхода теплоносителя. Это приводит к противоречию, которое может быть преодолено использованием спецпреобразователей частоты электроприводов ГЦН, так как работа тиристорных преобразователей не зависит от частоты питания сети [6]. При их использовании мощность блока можно увеличивать до сверхноминального значения для регулирования частоты в энергосистеме и ликвидации системных аварий, без уменьшения запаса до кризиса теплообмена в активной зоне реактора [7]. Недостатки атомных электростанций при ликвидации системных аварий с падением частоты рассмотрены в [8]. В частности, проанализирована работа АЭС с ВВЭР-440 в Кольской энергосистеме, имеющей сравнительно слабые пропускные способности с соседними крупными энергосистемами.

Исследования показали, что плавное изменение расхода теплоносителя регулированием частоты вращения электроприводов ГЦН позволяет получать спецификационные параметры пара и за счет этого эффективные энергетические характеристики турбин в режимах частичной мощности, пуска и останова энергоблока АЭС, значительно снизить колебания температур и давлений в главных контурах [9]. Это приводит к снижению диапазонов изменения средней температуры активной зоны и смягчению нейтронно-физических возмущений в активной зоне [10]. При этом достигается ресурсная экономия внутри-

корпусных устройств, повышается надежность, долговечность и экономичность за счет снижения малоцикловой усталости металла энергооборудования и роста КПД нетто блока в диапазоне мощности 60–100% $N_{\text{ном}}$ и выше номинальной [11]. Принципиально важным является вопрос обеспечения условий электромагнитной совместимости преобразователей частоты как с системой электроснабжения собственных нужд АЭС, так и с приводными асинхронными двигателями [12].

Схема анализа системной эффективности применения частотно-регулируемых приводов (ЧРП) ГЦН АЭС с ВВЭР-1000 с учетом всех трудностей и преимуществ показана на рис. 1.

При технико-экономическом обосновании установки ЧРП ГЦН необходимо принимать во внимание следующие основные факторы: экономию электроэнергии на привод ГНЦ при использовании частотно-регулируемого привода (на пониженных нагрузках), соответственный перерасход энергии на привод ГЦН в режиме нагрузок выше номинальной, дополнительную выручку от продажи электроэнергии, изменение затрат на топливо при изменении КИУМ и затраты в модернизацию ГЦН. Расчетная формула для суммарной выручки:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} = \tau_{>1} \cdot (N_{>1} + \Delta N_{\text{ГЦН}>1}) \cdot T_{>1}^{\text{эп}} + \\ + \tau_{<1} \cdot (N_{<1} + \Delta N_{\text{ГЦН}<1}) \cdot T_{<1}^{\text{эп}} - \frac{(\Delta N_{>1} + \Delta N_{\text{ГЦН}>1}) \cdot \Pi_{\text{я}}}{24 \cdot V \cdot \eta_{\text{АЭС}}} - \Delta \mathcal{Z}_{\text{ГЦН}}.$$

Здесь $\tau_{>1}$, $\tau_{<1}$ – число часов, осредненное по годам с выработкой мощности более и менее номинальной в исследуемых графиках нагрузок, соответственно; $T_{>1}^{\text{эп}}$, $T_{<1}^{\text{эп}}$ – отпускные тарифы для этих графиков нагрузки; $N_{>1}$, $N_{<1}$ – отпускаемые по графикам нагрузки дополнительная мощность выше номинальной и мощность ниже ее; $\Delta N_{\text{ГЦН}>1}$, $\Delta N_{\text{ГЦН}<1}$ – соответственно потери и выигрыш мощности ГЦН на этих же режимах; $\Pi_{\text{я}}$ – цена ядерного топлива; V – глубина выгорания ядерного топлива; $\Delta \mathcal{Z}_{\text{ГЦН}}$ – затраты в модернизацию ГЦН.

Следует учитывать также увеличение приемистости энергоблоков АЭС, экономию от замещения нового строительства, вытеснение газового топлива как ценного экспортного ресурса и возможность участия энергоблока АЭС в противоаварийном и частотном регулировании. Результаты расчетов выполнены при глубине выгорания 55 МВт·сут/кг UO_2 , цене ядерного горючего 70 000 руб/кг и представлены на рис. 2.

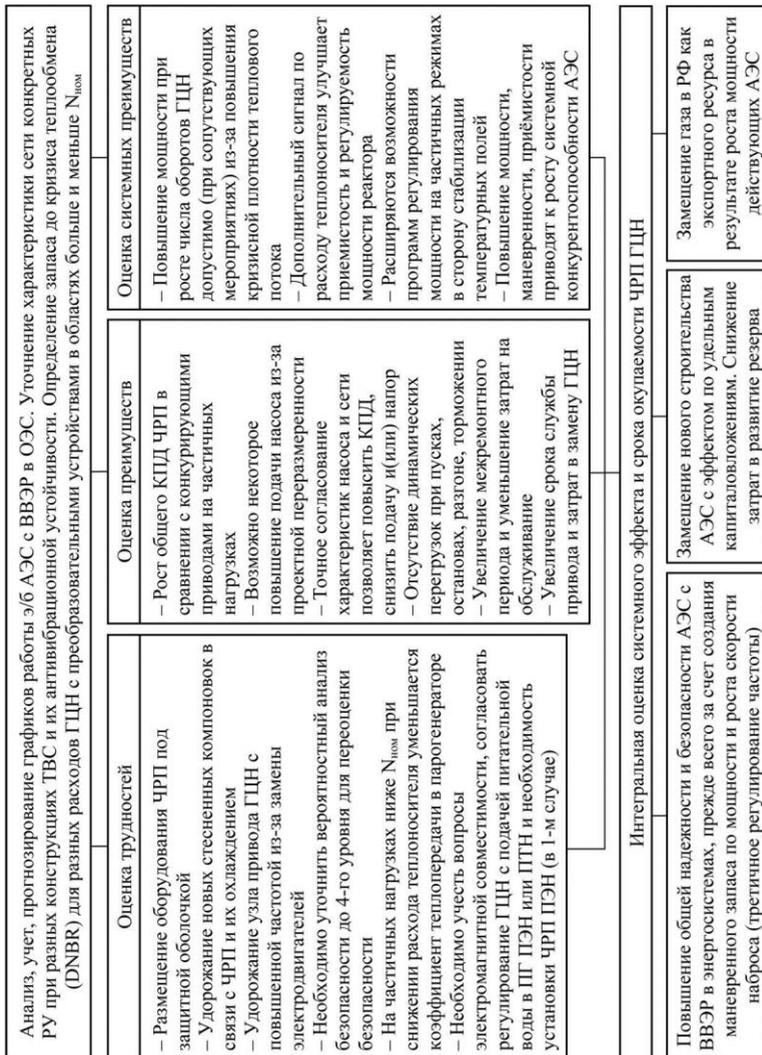


Рис. 1. Схема анализа системной эффективности модернизации ГЦН АЭС с ВВЭР с частотно-

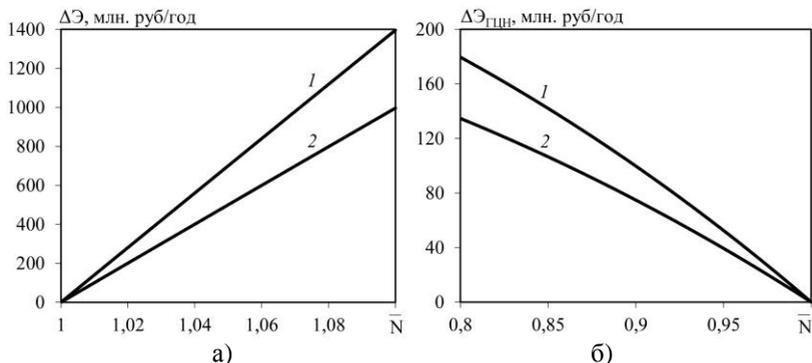


Рис. 2. Годовая выручка от реализации дополнительной электроэнергии при повышении мощности (а) и экономия затрат электроэнергии на ГЦН при понижении мощности АЭС (б) при ЧРП ГЦН ($\tau=8000$ ч/год):

1 – при тарифе 2000 руб/МВт·ч; 2 – 1500 руб/МВт·ч

Выводы:

1. Предложена методика оценки системной эффективности оснащения ГЦН мощных энергоблоков АЭС с ВВЭР частотно регулируемые приводами.

2. Показано, что установка частотно-регулируемых приводов ГЦН на АЭС с ВВЭР целесообразна в перспективе не только для экономии расхода энергии на их привод на частичных режимах, но и для повышения мощности энергоблоков АЭС выше номинальной (без уменьшения запаса до кризиса теплообмена в активной зоне реактора) для ликвидации системных аварий, а значит и для повышения безопасности входящих в ОЭС энергоблоков АЭС.

3. В запас эффективности можно положить социальный эффект из-за роста продажи газа, как ценного экспортного ресурса в связи с дополнительным его высвобождением и замещением при этом на АЭС выработки на электростанциях, потребляющих природный газ.

4. Требуется дополнительная проработка вопроса электромагнитного совмещения преобразователей частоты с сетями электроснабжения и электродвигателями.

Библиографический список

1. Non-baseload Operation in Nuclear Power Plants: Load Following and Frequency Control Modes of Flexible Operation [электронный ресурс] / Nuclear

Energy Series, No. NP-T-3.23. Vienna: IAEA, 2018. 173 p. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1756_web.pdf.

2. **Панов С. АЭС научат маневрировать** // Атомный эксперт. 2016. № 9 (51). С. 26–29.

3. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2018 году [Электронный ресурс]. URL: https://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2019/ups_rep2018.pdf.

4. **Башарат А., Лошаков И.И.** Регулирование энергоблоков АЭС с ВВЭР при изменении производительности ГЦН // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2002. № 1. С. 53-60.

5. **Черемисин В.В., Шилов Е.А., Анишев Е.Ю.** Опыт эксплуатации регулируемых электроприводов главных циркуляционных насосов реактора БН-600 // Электрические станции. 2005. № 5. С. 19-21.

6. **Лазарев Г.Б., Новаковский А.Н., Султанов А.Т.** Энергоэффективное управление расходом теплоносителя в главных контурах реакторных установок энергоблоков АЭС // Энергия единой сети. 2015. № 4 (21). С. 70–88.

7. **Хрусталеv В.А., Гариевский М.В.** Повышение мощности действующих энергоблоков с водо-водяными реакторами: состояние, проблемы и перспективы // Труды Академэнерго. 2017. № 4. С. 77-88.

8. **Башарат А., Королев В.И., Лошаков И.И.** Система управления энергоблоком АЭС с регулированием производительности главных циркуляционных насосов // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 5. С. 120-130.

9. **Хрусталеv В.А., Башлыков Д.О., Гариевский М.В.** Вопросы эффективности высоковольтных частотно-регулируемых приводов ГЦН энергоблока АЭС с ВВЭР // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. №7-8. С. 94-104.

10. Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000 / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2010. Т. 109, вып. 4. С. 198-201.

11. Работа ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров и др. // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 5. С. 247-252.

12. **Анишев Е.Ю., Роцин Е.В.** Проблемы электромагнитной совместимости регулируемых электроприводов главных циркуляционных насосов АЭС // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 4 (83). С. 211-218.

3. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 620.9

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ ЗДАНИЙ И МИКРОРАЙОНОВ В ПРОЦЕССЕ РЕНОВАЦИИ

Д-р техн. наук, доц. **Гашо Е.Г.**

Магистрант **Булгаков Н.С.**

Магистрант **Шкуро Ю.Д.**

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

***Аннотация.** Программа реновации жилья в Москве – это комплексный проект Правительства Москвы, направленный на расселение и снос ветхого малоэтажного жилого фонда, построенного в 1957-1968 годах, и строительство новых, энергоэффективных домов на освободившихся территориях. Данная программа рассчитана на 15-20 лет и в неё войдёт более 5 тысяч московских домов, ежегодно планируется возводить около 340 новых жилых зданий.*

***Ключевые слова:** реновация, модернизация, энергоэффективность.*

Введение. Основными задачами программы реновации являются: снос старых зданий, не подходящих под современные требования жилья; возведение новых современных зданий; перераспределение земельных ресурсов кварталов путём высадки крупномерных деревьев; создание безопасной среды за счет отсутствия транзитного движения автомобильного транспорта во дворах.

Расчет энергетических нагрузок новых зданий. Рассмотрим энергетические последствия возведения новых современных зданий взамен старых по программе реновации. Расчет произведен для реального квартала 100*200 м, состоящего из 4 зданий 1605 серии, в котором планируется разместить 2 новых здания по программе реновации.

Жилые здания 1605 серии – строились преимущественно в 60-х годах прошлого столетия. На данный момент дома находятся в состоянии сильного износа, заключающегося в преждевременном изнашивании кровель, балконов, инженерного оборудования и т.д. В большин-

стве случаев наблюдаются серьезные дефекты стеновых панелей, такие как коррозия бетона, разрушение стыков и трещины, что приводит к существенному (в 2-3 раза) росту теплопотерь.

Расчет тепловых потерь зданий будем производить по формуле:

$$q = (t_{в} - t_{н}) \cdot \left(\frac{1}{R_0}\right) \quad (1)$$

Для здания типа 1605 серии, сопротивление теплопередачи R_0 около $0,72 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$. Проектное сопротивление теплопередачи R_0 зданий, построенных в ходе программы реновации, составляет $3,05 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$, что выше более чем в 4 раза по сравнению со старыми домами. Такое большое значение удельного термического сопротивления достигается за счет использования минераловатных плит, состоящих из новейших материалов и имеющих низкие значения теплопроводности ($\sim 0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$). Сравнение теплопотерь зданий до и после реновации, рассчитанных по формуле (1), приведено ниже на рис. 1:

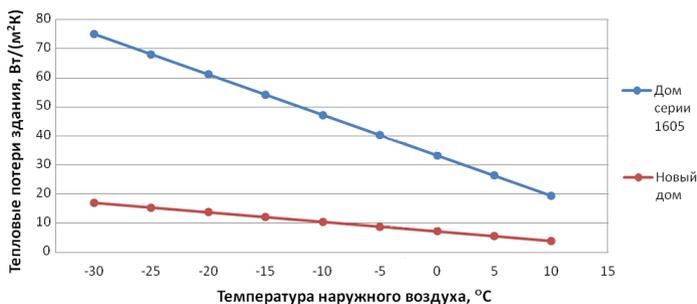


Рис. 1. Сравнение тепловых потерь новых домов и домов 1605 серии в зависимости от температуры наружного воздуха

Удельные трансмиссионные тепловые потери в новых зданиях снижаются в 2-2,5 раза по сравнению с существующими сериями постройки 60-ых годов.

Сравнение старой и новой застройки можно проиллюстрировать на примере квартала в районе Северное Тушино, где пунктирными линиями изображены старые дома серии 1605, и прямыми линиями показана новая застройка по программе реновации (рис.2). В результате такой застройки мы получаем рост жилой площади и числа жителей практически на 80-90%. Каков будет рост энергетических нагрузок и энергозатрат нового микрорайона в этом случае?

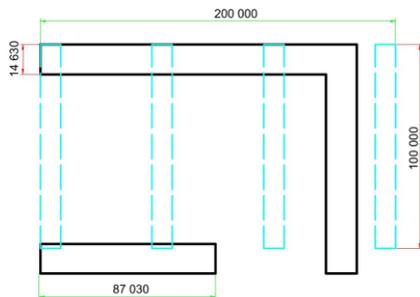


Рис. 2. Сравнение застройки старого и нового квартала

В процессе реновации на данной площади в 2 га планируется к размещению два жилых здания 9 и 17 этажности. Тепловые и электрические нагрузки новых зданий в значительной степени определяются применяемыми архитектурно-строительными, теплотехническими решениями, иными факторами. Эти мероприятия включают в себя помимо улучшенных показателей теплозащиты, устройства автоматизированного регулирования тепло- и водопотребления, системы рекуперации сбросного тепла стоков, вентиляционных выбросов, иных вторичных ресурсов. Как видно из рис. 2, в этом случае существенно растет компактность микрорайона, и большее пространство можно отдать под общественные пространства, зеленые насаждения, детские и спортивные площадки.

В табл. 1 приведено сравнение различных показателей зданий до и после реновации: рост жилой площади практически в 2,5 раза, количества жильцов в 1,9 раза. Тем не менее, расчетные нагрузки на отопление не вырастут, а даже снизятся на 7,5 %. Более того, тепла стоков и вентиляционных выбросов двух новых зданий будет достаточно для полного покрытия с помощью тепловых насосов отопительных нагрузок меньшего 9-этажного здания в микрорайоне и находящихся внутри микрорайона небольших бюджетных учреждений (детский сад).

Дополнительные мероприятия по утилизации сбросного тепла стоков, вентиляционных выбросов зданий приведут к еще более значительному сокращению тепловых нагрузок. Конечно, несколько вырастет потребление горячей и холодной воды, но не в 2 раза, так как современная сантехническое оборудование и установка счетчиков воды также приводят к существенному сокращению расходов воды населением (в среднем до 90-115 л/чел в сутки). С помощью тепловых насосов можно реализовать и систему холодоснабжения зданий.

Таблица 1

Сравнение энергетических показателей зданий

Тип здания	Здания серии 1605	Новые дома	Изменение, %
Общая площадь здания	19,5 тыс м ²	51,95 тыс м ² – 17 эт. 12,93 тыс м ² – 9 эт.	353 %
Площадь квартир	16,9 тыс м ²	35,13 тыс м ² – 17 эт. 8,6 тыс м ² – 9 эт.	259%
Объем зданий	60 тыс м ³	129,4 тыс м ³ – 17 эт. 32,99 тыс м ³ – 9 эт.	271 %
Количество жильцов (суммарное)	~1100 человек	~2094 человек	190 %
Количество квартир (суммарное)	400 кв.: Однокомнатных: 200 Двухкомнатных: 100 Трехкомнатных: 100	764 кв.: Однокомнатных: 260 Двухкомнатных: 356 Трехкомнатных: 148	191%
Тепловая нагрузка отопления зданий суммарно	0,804 Гкал/ч	0,748 Гкал/ч	Снижение на 0,056 Гкал/ч (7,5%)

Выводы. Комплексный подход к сооружению кварталов реновации изначально может обеспечить существенную экономию топливно-энергетических ресурсов, воды, мощности присоединяемых объектов. Установка современных автоматизированных систем управления тепло- и энергопотреблением позволит на следующем этапе использовать преимущества «smart» систем в рамках решений «умного города» для роста надежности и эффективности систем жизнеобеспечения в целом. Реализация централизованной системы холодоснабжения новых зданий с помощью обратимых тепловых насосов также позволит существенно снизить электрическую нагрузку в летнее время и общее потребление электроэнергии.

Библиографический список

1. **Гашо Е.Г.** Повышение эффективности систем теплоэнергоснабжения городов и регионов. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013. 311 с.
2. Возобновляемая энергетика: будущее рядом / Под ред. А.О. Кульбачевского, Е.Г. Гашо и Р.Н. Разоренова. М.: Деп-т природопользования и охраны окр. среды г. Москвы, 2018. 40 с.
3. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре / Е.Г. Гашо, С.А. Козлов, В.С. Пузаков и др. М., 2017. 204 с.
4. **Гашо Е.Г., Разоренов Р.Н.** Возобновляемая энергетика: отечественные реализованные проекты // СОК. 2019. № 4. С. 60-73.

АНАЛИЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ПАРΟΣНАБЖЕНИЯ

Аспирант **Киселева А.И.**

Д-р техн. наук, доцент **Гашо Е.Г.**
Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва

***Аннотация.** Статья посвящена оценке и анализу энергосберегающих мероприятий систем промышленного пароснабжения на примере промышленного паропровода от Смоленской ТЭЦ-1. Рассмотрены основные мероприятия для снижения тепловых потерь в паровых сетях и проведен их расчет. На основе полученных результатов был сделан выбор самого эффективного энергосберегающего мероприятия и рассчитан срок его окупаемости.*

***Ключевые слова:** пароснабжение, паропроводы, энергосбережение.*

В системах промышленного пароснабжения основную долю потерь составляют потери тепла в паровых сетях по ряду причин:

- неудовлетворительное техническое состояние и обслуживание тепловых сетей;
- нарушение тепловой изоляции;
- длительный срок эксплуатации трубопроводов.

Эти факторы приводят к снижению надежности теплоснабжения, несоответствию параметров теплоносителей договорным, росту тепловых потерь и снижению качества теплоснабжения в целом [1]. В связи с этим были рассмотрены энергосберегающие мероприятия, направленные на снижение потерь тепла и теплоносителя в паровых сетях.

В качестве объекта исследования была рассмотрена паровая система теплоснабжения города Смоленска, обеспечивающая нужды в паре промышленных предприятий. Схема паропровода с нагрузками потребителей представлена на рис. 1.

В качестве энергосберегающих мероприятий рассмотрены: изменение диаметра трубопровода и увеличение толщины изоляции. Результаты расчета для зимнего периода представлены в табл. 1.

В зимнем режиме работы паропровод от ТЭЦ-1 полностью справляется с технологической нагрузкой. За счет экономически целесообразной скорости движения теплоносителя и большого расхода пара, все потребители получают пар заданных параметров.

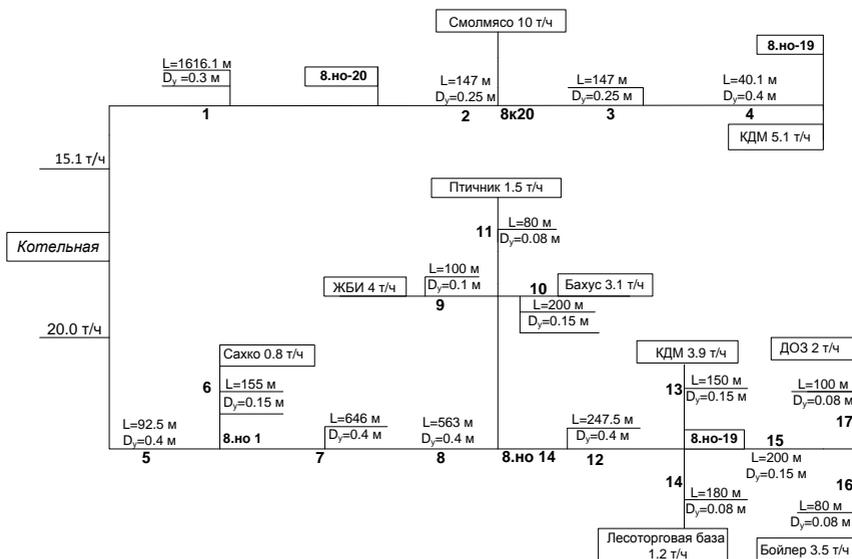


Рис. 1. Схема подключения потребителей тепла к Смоленской ТЭЦ-1

Таблица 1

Результаты расчета тепловых потерь при применении энергосберегающих мероприятий в зимнем режиме

Участок 9, L=200 м	Техническая конструкция	Энергосберегающие мероприятия		
	$D_y=0,15\text{ м},$ $\delta_{из}=0,12\text{ м},$	Изменение диаметра $D_y:$ 0,15 м \rightarrow 0,1 м	Увеличение толщины изоляции $\delta_{из}:$ 0,12 м \rightarrow 0,17 м	Увеличение толщины изоляции и диаметра трубопровода
Q, Вт	15851,22	15847,41	13328,19	4161,52
q, Вт/м	79,26	79,24	66,64	20,81

Поэтому проведение энергосберегающих мероприятий возможно только с целью уменьшения полных, а, следовательно, и удельных потерь. Выберем произвольный участок паропровода и сравним эффективность примененных энергосберегающих мероприятий.

Таким образом, рассматриваемые энергосберегающие мероприятия как изменение диаметра и увеличение толщины изоляции по от-

дельности, не сильно сказываются на величине удельных потерь на участке [2]. Однако, при изменении этих параметров (D_y , $\delta_{из}$) совместно, можно увидеть, что величина удельных потерь значительно уменьшается и составляет всего лишь 26,25% от потерь при первоначально заданной конструкции паропровода. Но проведение данных мероприятий требует капитальных затрат и может быть экономически невыгодно, поэтому первоначально необходимо оценить будут ли эти меры экономически оправданы и целесообразны при данной конструкции.

В летнем режиме работы, несмотря на высокие параметры пара, часть потребителей не получает теплоноситель требуемых параметров. Поэтому проведение энергосберегающих мероприятий в данном режиме является необходимым условием [3].

Аналогично для летнего режима был выбран участок паропровода и рассчитана эффективность проведения энергосберегающих мероприятий (табл. 2)

Таблица 2

Результаты расчета тепловых потерь при применении энергосберегающих мероприятий в летнем режиме

Участок № 13, L=150 м	Техническая конструкция	Энергосберегающие мероприятия		
	$D_y = 0,15$ м, $\delta_{из} = 0,12$ м	Изменение диаметра D_y : 0,15 м → 0,1 м	Увеличение толщины изоляции $\delta_{из}$: 0,12 м → 0,17 м	Увеличение толщины изоляции и диаметра трубопровода: D_y : 0,15 м → 0,1 м $\delta_{из}$: 0,12 м → 0,17 м
Q, Вт	8308,64	6780,12	7651,37	6460,65
q, Вт/м	55,39	45,20	51,01	43,07

В отличие от зимнего режима, увеличение толщины изоляции при неизменном диаметре является не самым эффективным мероприятием по сбережению тепловой энергии. Увеличение толщины слоя тепловой изоляции на 42% дает уменьшение удельных тепловых потерь всего на 8%, что показывает низкую эффективность влияния толщины изоляции в летнем режиме работы, и при этом часть потребителей получает

влажный пар вместо перегретого [4]. При данном режиме работы конструктивно можно выполнить только изменение диаметра трубопровода без изменения толщины теплоизоляционного слоя, как тепловые потери при данных случаях фактически равны, а увеличение теплоизоляции требует наибольших капитальных затрат.

Исходя из специфики рассматриваемого объекта из всех энерго-сберегающих мероприятий применимо только усиление теплоизоляции паропровода.

Для этого был рассчитан срок окупаемости. Расчет был проведен исходя из следующих условий:

1) увеличение толщины изоляции с 0,12 до 0,17 м

2) расчет проводился для ответвлений паропровода, в которых пар к потребителям приходит влажным.

В качестве исходных данных было принято следующее: материал теплоизоляции – минеральная вата; стоимость 1 м³ изоляции ($C_{из}$) – 1470 рублей.

Проведем расчет для участка № 5, $L = 92,5$ м; $D_y = 0,4$ м; $\delta_{ст} = 0,008$ м.

Объем необходимой изоляции рассчитывается по следующей формуле:

$$V_{из} = L \cdot \Pi \cdot (D_{н.из} - D_{вн.из}), \text{ м}^3$$

где $D_{н.из}$ – наружный диаметр трубопровода при конечной толщине изоляции, м; $D_{вн.из}$ – внутренний диаметр трубопровода с первоначальной толщиной изоляции, м.

Так как происходит увеличение толщины изоляции стенки трубы на 0,05 м, то можно считать, что величина $(D_{н.из} - D_{вн.из}) = 0,1$ м, и она остается постоянной на всех участках паропровода.

Стоимость данного объема теплоизоляционного материала вычисляется как:

$$C = V_{из} \cdot C_{из}, \text{ руб.}$$

Результаты расчета представлены в табл. 3.

Окончательная стоимость проведения данного мероприятия будет складываться из стоимости материала C_m и затрат на проведение работ C_p (проектных, монтажных, пуско-наладочных и т.д.). Принимаем, что стоимость проведения таких работ составляет около 150% от стоимости материала. Тогда, затраты на увеличение теплоизоляции на 0,05 м будут равны:

$$C = C_m + C_p \quad C = 1\,182\,158 + 1,5 \cdot 1\,182\,158 = 2\,955\,395 \text{ руб.}$$

Таблица 3

Расчет стоимости увеличения тепловой изоляции

№ участка	Длина участка, м	Объем изоляции, м ³	Стоимость, руб.
5	92,5	29,1	42696
6	155	48,7	71589
7	646	202,8	298181
8	563	176,8	259896
9	100	31,4	46158
10	200	62,8	92316
11	80	25,1	92316
12	274,5	86,2	126714
13	150	47,1	69237
15	200	62,8	92316
17	100	31,4	46158
ИТОГО:		804,2	1 182 158

Определим тепловые потери с паропровода с увеличенной теплоизоляцией. Принимаем, что продолжительность отопительного периода (зимний режим) составляет 210 суток, а летнего – 155:

1) потери тепла при изоляции 0,12 м

$$Q = (558642,6 \cdot 24 \cdot 210 + 269273,8 \cdot 24 \cdot 155 \cdot 3600) / 10^6 = \\ = 13\,742\,126 \text{ МДж};$$

2) потери тепла при изоляции 0,17 м

$$Q = (494351,8 \cdot 24 \cdot 210 + 243815 \cdot 24 \cdot 155) / 10^6 = 3398,5 \text{ МВт}.$$

При средней стоимости 1 Гкал = 1485,5 руб. было получено, что экономия тепла при увеличении толщины изоляции трубопровода составляет 363,1 Гкал/ч или 539385,1 рублей в год. При работе Смоленской ТЭЦ-1, получим, что окупаемость проведения такого энергосберегающего мероприятия составляет около 2,2 лет. Таким образом, можно рекомендовать данное мероприятие как энергосберегающее.

Несмотря на то, что тепловые потери уменьшаются фактически на 13%, конечные потребители (2 из 8) все равно не получают пар заданных параметров.

Ниже представлены расчеты по экономии тепла при увеличении толщины изоляции на 0,1 м (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение эффективности и экономической целесообразности увеличения толщины изоляции

Толщина теплоизоляционного слоя $\delta_{из}$, м		Изоляция при конструкции 0,12	Толщина изоляции	
			0,17	0,22
Тепловые потери, Q, ГДж	Летний режим	3 606,11	3 165,00	2 978,50
	Зимний режим	10 136,01	8 087,45	7 444,97
ИТОГО	ГДж:	13 742,12	11 252,45	10 423,50
	Гкал:	3 279,74	2 685,55	2 487,71
Уменьшение тепловых потерь по сравнению с заводской изоляцией, %			18,2	24,1
Экономия тепла, при увеличении изоляции, Гкал/год			594,2	792,0
Годовая экономия за счет уменьшения потерь тепла, руб.			882 684,1	1 176 516
Стоимость проведения энергосберегающего мероприятия, руб.			2 955 395	5 910 790
Окупаемость энергосберегающего мероприятия, лет.			3,4	5,0
Количество потребителей, получающих пар заданных параметров.			6/8	7/8

С целью определения оптимального значения толщины тепловой изоляции была построена графическая зависимость тепловых потерь от увеличения толщины изоляции, представленная на рис. 2.

Из анализа расчетов следует, что оптимальным следует признать увеличение толщины изоляции до 0,17 м, так как дальнейшее увеличение толщины изоляции приводит к продлению срока окупаемости мероприятия при незначительном повышении качества пара получаемого потребителями.

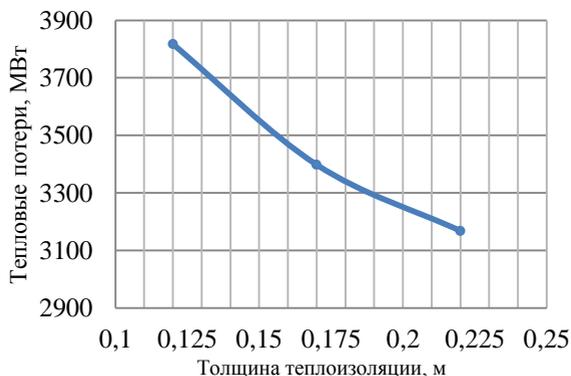


Рис. 2. Зависимость тепловых потерь от толщины теплоизоляционного материала

Выводы: Для паровых сетей промышленного назначения были рассмотрены 2 энергосберегающих мероприятия: увеличение толщины изоляции и обеспечение движения пара при экономичной скорости.

Из рассмотренных методов энергосбережения предпочтительнее является увеличение толщины тепловой изоляции паропроводов. При этом расчеты показали, что оптимальное значение толщины изоляции для исследуемого паропровода составило 0,17 м, что соответствует наиболее высокому качеству поставляемого пара и наименьшему сроку окупаемости.

Библиографический список

1. **Сычев А.В.** Узкие места в организации паропроводов [Электронный ресурс] // Spirаскоп. 2017. №1. С. 5-10. URL: https://content.spiraxsarco.com/-/media/spiraxsarco/opco/ru/newsletter/spirascope_no_1-2017.ashx.
2. СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М., 2012. 43 с.
3. **Киселева А.И., Фокин А.М.** Комплексный подход к оценке влияния непроектных режимов на работу систем пароснабжения // Надежность и безопасность энергетики. 2019. № 12(1). С. 10-17.
4. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов; 9-е изд., стереот. М.: Изд. дом МЭИ, 2009. 472 с.

УДК 69.003

**ИНСТРУМЕНТЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ
В ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫМ И РЕМОНТНЫМ
ПРОИЗВОДСТВОМ***

Ст. преп. Крутилова М.О.

Канд. экон. наук, доц. Щенятская М.А.

Канд. техн. наук, доц. Кошлич Ю.А.

Ст. преп. Шарапова А.В.

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

***Аннотация.** Энергоэффективность строительного и ремонтного производства зданий, включающая в себя оптимизацию энергопотребления при производстве строительных материалов, возведении объекта строительства и технологическом обеспечении строительства оказывает существенное влияние на энергоэффективность строительной продукции в целом, являясь важнейшей составляющей внедрения развитие в отечественном строительном комплексе принципов зеленого строительства. В работе предлагаются к рассмотрению базовые принципы авторской методики управления энергоэффективностью строительства оптимизацией проектных решений зданий, позволяющей сформировать и ввести в информационно-аналитические системы управления строительным и ремонтным производством зданий инструмент обоснованного экономического стимулирования зеленого строительства, оперирующий количественными оценками энергоэффективности и стоимостными показателями оптимизации проектных решений.*

Ключевые слова: энергоэффективность, зеленое строительство, управление строительством.

Строительство является одной из существенно энергоемких отраслей реального производства, включающей энергопотребление на

* Работа выполнена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Разработка новых методов и инструментов управления имуществом в бюджетном секторе и их реализация в программном комплексе информационно-аналитической системы централизованного управления имуществом, находящимся в собственности субъектов Российской Федерации, муниципальных образований, а также имуществом государственных компаний» (соглашение № 074-11-2018-026 от 11.07.2018 г.)

стадии производства строительных материалов, технологического обеспечения строительного производства, механизацию строительства, длительную техническую эксплуатацию завершеного объекта. Это делает строительную отрасль обладающей существенным потенциалом энергоэффективности, а вместе с важностью, значимостью и длительностью жизненного цикла строительной продукции позволяет констатировать значительный исследовательский потенциал вопросов ресурсной оптимизации технических и технологических решений, принимаемых на стадии проектирования строительных объектов.

Энергетический аудит завершеного строительством зданий и сооружений, равно как и анализ энергетической эффективности функционального процесса в здании, определяющего его класс по энергоэффективности и степень соответствия национальным и международным зеленым стандартам являются распространенной современной практикой оценки энергоэффективности в процессе девелопмента завершеного строительством объекта и его последующей, возможно многократной, модернизации. В то же время экономическая оценка эффективности применения зеленых строительных материалов и технологий, в большинстве случаев более финансово затратных нежели традиционные, осуществляется, зачастую, эмпирически или декларативно, при этом, кроме директивно-запретительных, на государственном уровне слабы механизмы экономического стимулирования застройщиков к использованию зеленых технических решений, особенно для BTS-девелоперов, не связанных с процессом дальнейшей эксплуатации здания и не разделяющих с собственником потенциальные риски его недостаточной энергоэффективности.

Цель работы: представить ключевые принципы и предложить к рассмотрению и внедрению в информационно-аналитические системы управления строительным и ремонтным производством зданий и сооружений инструмент обоснованного экономического стимулирования зеленого строительства, оперирующий количественными оценками энергоэффективности и стоимостными показателями оптимизации проектных решений.

Содержательная часть

Управление энергоэффективностью зданий и сооружений должны начинаться на стадии оптимизации технических и технологических решений строительного производства на наиболее ранней проектной стадии инвестиционно-строительных проектов, когда технологии информационного моделирования позволяют без кардинально неэффективных трудозатрат проектировщика существенно менять используе-

мые в строительстве решения, добиваясь эффективности по ряду критериев устойчивого развития: снижению ресурсоемкости, минимизации энергозатрат на производство принимаемых строительных материалов, машин и механизмов; увеличению степени рециклинга материалов, объединенных общей приведенной экономической оценкой эффективности проекта [1]. Ключевым аспектом такой оценки должны являться ее эколого-экономическая направленность – анализ и количественный учет негативных экологических факторов при добыче, производстве, монтаже строительных материалов и технологическом обеспечении строительства, основанный на полном информационном учете всех сопряженных со строительным процессом ресурсных компонентов, обязательно сопровождается получением экономической оценки степени такого негативного воздействия строительного объекта на окружающую среду через нормативно установленные объективные и перепроверяемые алгоритмы аудита [2].

*Таблица 1***Объемы основных ресурсо- и энергоемких строительных материалов**

Материал	Традиционные решения	Зеленые решения
Материалы		
Бетон	3672	3024
Арматура	250	241
...		
Машины и механизмы		
Краны башенные	4856	4475
Краны на автомобильном ходу	356	41
...		
Итого, тыс. руб.	65600	72000

Покажем ключевые аспекты предлагаемой экостоимостной оценки технических и технологических решений на проектной стадии строительства на примере сравнения альтернативных проектных решений реализации здания заданных потребительских характеристик и функционального назначения, выполняемых в традиционных и с использованием зеленых технических решений. Первичная сравнительная оценка стоимости строительства, выполняемого в традицион-

ных и альтернативных зеленых технологиях и материалах определяется стандартными методами строительного ценообразования на основании информационно смоделированных объемов работ и классификаторов текущей рыночной стоимости ресурсов (табл. 1).

На основании разрабатываемых авторами в настоящее время корреляционных оценок приведенных к CO₂ парниковых газов, производимых техническими и технологическими источниками энергии на строительной площадке [3], включающими и приведенные сведения об энергоемкости добычи и производства единичных объемов строительных материалов [4] предлагается включить в информационно-аналитические системы управления строительством калькулятор условных энергозатрат, осуществляющей, на основании представленных в альтернативных проектных решениях сведений о материалах и технологиях, общую оценку массы парниковых газов (табл. 2).

Таблица 2

**Калькулятор условных энергозатрат,
выраженных в выбросах приведенных к CO₂ парниковых газов**

Источник энергии	Традиционные решения	Зеленые решения
Материалы		
Бетон		
Оценочная эмиссия CO ₂ для производства бетона, г/кг	100	
Плотность бетона кг/ м ³	2100	
Расчетный объем бетона, м ³	3671	3024
Общее количество выбросов CO ₂ , т	771	635
...		
Машины и механизмы		
Кран башенный (67 кВт, грузоподъемность 8 т)		
Расчетное рабочее время, ч	4856	4475
Оценочная эмиссия CO ₂ , г/кВт·ч	790	
Общее количество выбросов CO ₂ , т	257	237
...		
Общая эмиссия CO ₂ от строительных материалов, т	1643	1507
Общая эмиссия CO ₂ от строительномонтажных работ, т	1901	1747

Представленная оценка выброса приведенных парниковых газов в натуральных показателях прямо характеризует степень энергетической эффективности сравниваемых проектных решений и нуждается в трансформации в сравнительную стоимостную оценку, добавляемую к определенной ранее сметной стоимости строительства. Алгоритмом такой трансформации становится инструмент условного экологического налогообложения (ЭкоН) строительных объектов, альтернативно реализуемых по сравниваемым проектных решениям [5]. ЭкоН, являясь инструментом, объективно оценивающим экологическую безопасность и энергоэффективность строительства, представляет собой также действенный государственной регулирующий механизм, позволяющий осуществлять в информационно-аналитической системе управления строительством очевидное всем участникам проекта и клиентам системы дополнительное оценивание проекта с учетом степени освоения проектом предлагаемых региональным рынком зеленых материалов и решений и региональной специфики строительной отрасли [6]. Наиболее эффективным и прозрачным для информационных систем алгоритмом формирования такой оценки является маргинальная оценка, получаемая по имеющимся граничным данным о сметных стоимостях строительства ($ССР_{\max}$ и $ССР_{\min}$) и приведенных энергоэффективностях ($CO_{2\max}$ и $CO_{2\min}$) реализованных или реализуемых в регионе строительных проектов аналогичной недвижимости (1). Органы местной власти получают возможность регулировать величину налога ежеквартально издаваемым мультипликатором K , позволяющим выборочно оценивать и регулировать степень экономической заинтересованности застройщиков в зеленом строительстве по отраслям и видам создаваемой строительной продукции.

$$\text{ЭкоН} = \frac{ССР_{\max} - ССР_{\min}}{CO_{2\max} - CO_{2\min}} \cdot K \quad (1)$$

Представленный инструмент оценки эколого-экономической эффективности альтернативных проектных решений строительства, помещенный в информационно-аналитическую систему управления строительством, включает в себя автоматизированную оценку входящих в сравниваемые проектные решения сведений об используемых материалах и технологиях, формирует единичные и общие по проектам натуральные оценки экологического ущерба и условной энергоэффективности проектов, трансформирует их в универсальную величину условного экологического налога, налагаемого органами государственной власти, контролирующими региональный строительный

рынок и экологическую ситуацию, на объекты строительства, проектные решения которых являются недостаточно эффективными с позиций устойчивого развития и зеленого строительства (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительная оценка стоимости строительства в альтернативных проектных решениях с учетом условного экологического налогообложения

Проектные решения	Сметная стоимость, тыс. руб.	Общая эмиссия CO ₂ , т	ЭкоН, %	Итого с учетом ЭкоН, тыс. руб.
Традиционные решения	<u>65600</u>	1901	8,2%	81194
Зеленые решения	72000	1747	–	<u>72000</u>

Очевидно, тем самым создается понимаемый и приемлемый участниками рынка и универсально применимый регулятором гибкий инструмент экономической мотивации региональных строительных сообществ к активному и целенаправленному озеленению строительства и поддержанию производства и применения зеленых строительных материалов [7].

Выводы по работе. Рассмотренные в работе инструменты энергоэффективной оптимизации проектных решений зданий и сооружений в информационно-аналитических системах управления строительным и ремонтным производством позволяют оптимизировать конструктивные, объемно-планировочные решения и технологические решения проектов строительства, ремонта, реконструкции зданий и сооружений с позиции минимизации произведенного в процессе будущего производства и овеществленных в строительных материалах и затраченной энергии приведенных выбросов парниковых газов как ключевого фактора грозящих необратимостью глобальных негативных изменений окружающей среды. Предлагаемая методика позволит количественно обосновать рациональные подходы к проектированию строительных объектов, сформировать мотивирующую систему эффективного управления и регулирования региональных строительных рынков с целью их озеленения придания устойчивости среде обитания, будет являться эффективным дополнением сложившейся в стране и мире практики зеленого проектирования и сертификации недвижимости.

Библиографический список

1. **Avilova I.P., Krutilova M.O.** Methodology of ecooriented assessment of constructive schemes of cast in-situ RC framework in civil engineering // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 3, Ecological Challenges of the 21st Century. Сер. "3rd International Conference Environment and Sustainable Development of Territories: Ecological Challenges of the 21st Century". 2018. 012127.

2. **Avilova I.P., Naumov A.E., Krutilova M.O.** Methodology of cost-effective eco-directed structural design // 17th Int. Multidisciplinary Scientific Geo-Conference & EXPO (SGEM 2017). 2017. № 53. С. 551–557.

3. **Hammond G.P., Jones C.I.** Inventory of Carbon and Energy, Version 2.0 [Электронный ресурс] / Sustainable Energy Research Team (SERT), Dep. of Mech. Eng., Un. of Bath, UK. 2011. URL: <https://www.carbonsolutions.com/Resources/ICE%20V2.0%20-%20Jan%202011.xls>.

4. Profiling stainless steel welding processes to reduce fume emissions, hexavalent chromium emissions and operating costs in the workplace / M. Keane, A. Siert, S. Stone, B.T. Chen // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2016. № 13 (1). С. 1-8.

5. **Наумов А.Е., Щенятская М.А., Товстий В.П.** Качественные показатели объекта недвижимости как фактор экономической оптимизации организационно-технологических решений инвестиционно-строительного проекта // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 202-206.

6. **Грабовый П.Г., Манухина Л.А.** Национальная стратегия внедрения энергоресурсов и экологически безопасных (зеленых) технологий и производств в строительство и ЖКХ // Недвижимость: экономика, управление. 2014. № 1-2. С. 6-8.

7. **Теличенко В.И., Бенуж А.А.** Состояние и развитие системы технического регулирования в области зелёных технологий // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 1. С. 118-121.

ВНЕДРЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ КРЫМА

Канд. техн. наук, доц. **Муровский С.П.**
Магистрант **Шубин В.С.**
*Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского, г. Симферополь*

***Аннотация.** В работе рассмотрены перспективы проектирования комбинированной системы энергоснабжения промышленного объекта с применением современного оборудования и энергосберегающих технологий для условий Крымского региона с целью снижения электропотребления от центральных сетей. На основании разработанного проекта по реконструкции энергосетей предприятия рассчитаны основные параметры систем с применением энергосберегающих технологий.*

***Ключевые слова:** промышленный объект, комбинированная система энергоснабжения, энергосберегающие технологии, возобновляемые источники энергии, технико-экономическое обоснование, Крымский регион.*

В связи с переходом республики Крым в состав Российской Федерации в 2015 году произошло отключение подачи электроэнергии от энергосети Украины, что привело к «веерным» отключениям электричества на территории полуострова. Прокладка энергомота с материковой части России в Крым скомпенсировала недостаток собственной генерации электроэнергии, однако, Республика по-прежнему не в состоянии полностью покрыть нужды в электроснабжении объектов различного хозяйственного назначения [1].

Целью работы является разработка проекта комбинированной системы энергоснабжения промышленного объекта с применением современного энергетического оборудования и новейших энергосберегающих технологий.

В соответствии с целью были решены следующие задачи:

- проанализировано состояние энергоснабжения промышленного объекта;
- определены основные направления по реализации энергосберегающих технологий;
- разработан проект по внедрению новейших энергосберегающих технологий, а также оборудования на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), с учетом географических и климатических характери-

стик района размещения объекта, позволяющие значительно снизить потребление традиционных энергоносителей.

В настоящее время Крым еще является энергозависимым регионом страны и получает значительную мощность по энергопотреблению с материка. В ближайшее время, до выхода на полную мощность построенных двух электростанций, баланс Крымской энергосистемы будет характеризоваться повышением дефицита мощности в связи с перспективой развития полуострова и подъема экономики.

Реконструкция очистных сооружений и установка на них тепловых насосов (ТН) поможет решить сразу две проблемы Крымского региона: экологическую и энергетическую. Установка ТН на отводящих трубопроводах очистных сооружений позволит использовать избыточную тепловую энергию воды путем генерации тепла на собственные нужды [2].

Для разработки данного проекта был выбран существующий объект очистных сооружений (КОС) в Сакском районе Республики Крым. Так как ТН имеют ограничения по температурному режиму, важно, чтобы температура окружающего воздуха не была слишком низкой. Исходя из данных многолетних метеонаблюдений, самая низкая средняя температура года составляет $-0,1^{\circ}\text{C}$, а самая высокая средняя температура года $+23,2^{\circ}\text{C}$.

Электроснабжение КОС обеспечивается по кабельной сети, проходящего от Сакской ТЭЦ электрической мощностью 117,4 МВт. Потребляемая электрическая мощность данного объекта по исходным данным составляет 1,5 МВт. Основными электропотребителями на объекте являются мощные силовые насосы для перекачки воды, а также приборы, необходимые для нормальной работы предприятия и комфортного нахождения рабочего персонала на территории. При выполнении проекта предусмотрена реконструкция котельной на территории очистных сооружений. В задании котельной планируется замена устаревших и энергозатратных водонагревателей на более новые, безопасные и экономичные ТН, обеспечивающие технологические процессы предприятия.

До реконструкции в котельной было установлено нагревательное оборудование для обеспечения тепловой мощности 800 кВт с суммарным потреблением электрической мощности 5280 кВт·ч, поэтому при модернизации необходимо подобрать ТН, которые обеспечат данную тепловую мощность при меньших затратах электрической энергии. Учитывая требования нормативных документов по проектированию подобных объектов выбираем тепловой насос типа TMEGHP-

80М, при его технических показателях он является оптимальным для нужд данного объекта. Данный ТН имеет модульный тип, что позволяет устанавливать и соединять несколько насосов такого типа в одну систему, а также производить ремонт и обслуживание каждого модуля, не прерывая работу остальных модулей. ТН оснащен холодильным контуром с двумя теплообменниками, а также имеет ступенчатое регулирование производительности, что позволяет ему работать в режиме 100% и 50% от номинальной тепловой мощности [3].

Для обеспечения потребности котельной в тепловой мощности понадобится десять ТН, два из которых находятся в резерве, суммарная потребляемая электрическая мощность составит 370 кВт, а суммарная выдаваемая тепловая мощность обеспечит необходимые 800 кВт (рис. 1). С учетом дополнительных систем, необходимых для работы ТН, а также коэффициента спроса [4], реальная потребляемая мощность оборудования составит 3337,4 кВт. Исходя из этого суммарное потребление оборудования на 1942,6 кВт меньше, чем потребляло устаревшее оборудование котельной, при одинаковой выдаваемой тепловой мощности в 800 кВт.

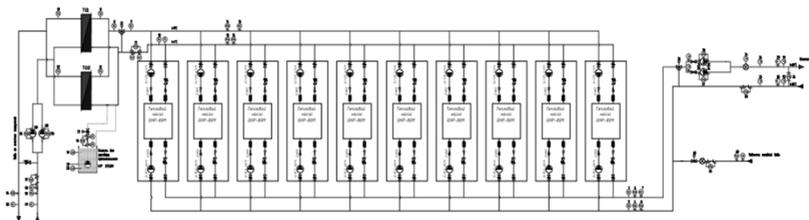


Рис. 1. Схемное решение по включению ТН в систему энергоснабжения предприятия

Проведенный расчет по модернизации устаревшей систем освещения показал, что в самый энергозатратный час помещения предприятия будут потреблять 4,1 кВт электроэнергии по сравнению с 9,6 кВт до реконструкции (рис. 2) [5]. Суммарное потребление электроэнергии в сутки с учетом коэффициента спроса для рассмотренных помещений составит 11,9 кВт·ч, до модернизации – 20,8 кВт·ч, что на 8,9 кВт·ч больше.

Выводы:

1. Рассмотрена возможность замены устаревшего энергозатратного нагревательного оборудования в котельной на более экономичные

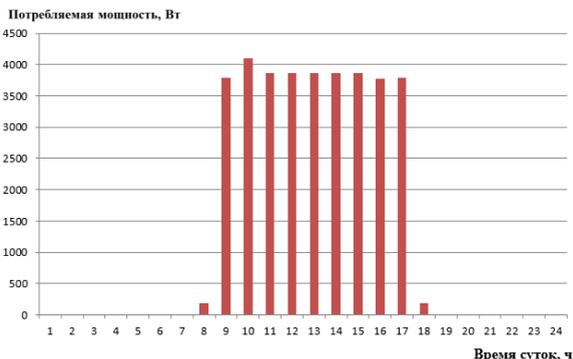


Рис. 2. Суточный график нагрузки системы освещения

ТН с целью экономии потребления электрической энергии предприятием, но без изменения тепловой мощности системы технологического цикла.

2. Проведен расчет замены старевших ламп накаливания на энергосберегающие светодиодные лампы и определено общее энергопотребление здания. Только при использовании светодиодных ламп энергопотребление помещений предприятия снизится в 1,7 раза.

Библиографический список

1. **Широков А.В., Шимон Н.С.** Проблемы энергоснабжения в Республике Крым // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2017. № 8. С. 47–49.
2. **Шубин В.С., Муровский С.П.** Внедрение энергосберегающих технологий с применением геотермальных тепловых насосов на промышленных объектах Крыма // Матер. IV науч.-практ. конф. проф.-преп. состава, асп., студ. и мол. уч. «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского». Симферополь, 2018. Т. 6. С. 186-188.
3. Тепловые насосы: статистика использования в Европе и мире [Электронный ресурс]. URL: <https://econet.ru/articles/148891-teplovye-nasosy-statistika-ispolzovaniya-v-evrope-i-mire> (Дата обращения: 01.10.2019).
4. **Муровский С.П., Курзо А.Н.** Система автономного электроснабжения удаленных потребителей на базе возобновляемых источников энергии // Успехи современной науки. 2017. Т. 6, № 3. С. 54-57.
5. **Муровский С.П., Кулпленный В.О., Тараненко Б.И.** Внедрение ресурсосберегающих технологий в систему электроснабжения промышленных предприятий // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 8 (60). С. 97-103.

4. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.311.21-827

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ С РЕЛЬЕФОМ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ст. преп. Башмур К.А.

Д-р техн. наук, проф. Петровский Э.А.

Магистрант Шадчина Ю.Н.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

***Аннотация.** Работа посвящена развитию ресурсосберегающих технологий для энергетического комплекса, а именно развитию средств энергообеспечения удаленного технологического оборудования, в частности исследования обусловлена острой нехваткой и высокой стоимостью электроэнергии для скважинных устройств, расширяющих свое применение как при бурении, так и при добыче углеводородов, при ненадежности и недолговечности используемых традиционных способов энергообеспечения данных устройств – батарей и силовых кабелей, и связанных с этим капитальных и временных затрат на останов технологического процесса, спуско-подъемные операции и др. Показано решение данной проблемы, заключающееся в использовании автономной системы энергообеспечения, включающей гидродинамический модуль с генератором электроэнергии, преобразующий энергию потока среды. Произведена оценка работоспособности устройства, показавшая его высокую эффективность.*

***Ключевые слова:** альтернативная энергетика, ресурсосберегающие технологии, гидравлическая турбина, рельеф, скважина.*

Целью работы является разработка научных основ для автономного электроснабжения удаленного технологического оборудования.

Традиционные источники электроснабжения

Использование всё большего числа устройств, предназначенных для управления технологическими процессами, при бурении, добыче, подготовке и транспортировке углеводородов встречает серьезные

затруднения в обеспечении электроэнергией. Применение традиционных способов энергообеспечения данных устройств – батарей и протяженных силовых кабелей – связано с их недостаточными надежностью и долговечностью, а также требует регулярного технического обслуживания и ремонта. Это приводит к финансовым и временным затратам, в том числе на остановку технологических процессов, например, в связи со спуско-подъемными операциями (СПО) колонн труб, ремонт оборудования и устранение последствий аварийных ситуаций [1]. Следовательно, нахождение решений в области эффективного энергообеспечения удаленных устройств является актуальной задачей топливно-энергетического комплекса РФ.

Зачастую для удаленного оборудования применяются неперезаряжаемые литий-ионные батареи, имеющие высокие показатели напряжения и емкости, но не имеющие возможности перезаряда и в связи с этим требующие периодической замены, что ведет к повышенным затратам на СПО. Также они обладают свойством пассивации, следствием чего является задержка напряжения при приложении нагрузки.

Рабочий диапазон батарей составляет от -30 до 125 °С, тогда как температуры, регистрируемые, например, в скважинах, увеличиваясь с глубиной (геотермальный градиент) [2], обычно находятся в пределах $20-100$ °С, но могут достигать 200 °С [3], т.е. значительно превышают рабочие диапазоны температур данных батарей. Нагрев батареи выше рабочих значений чреват ростом зарядного тока до значения, близкого к значению тока короткого замыкания, т.е. к тепловому разгону батареи, что может повлечь за собой появление короткого замыкания или взрыва. Такие батареи небезопасны в эксплуатации, т.к. полярные безводные растворители в их электролитах являются летучими и взрывоопасными, особенно при повышенных температурах.

В отличие от батарей, силовой кабель практически не имеет ограничений в количестве поставляемой энергии. При бурении кабели протягиваются по наружной стороне бурильной колонны и подвергаются сильному трению, усилию среза, чреватым обрывом кабеля, а также высоким температурам и давлению. Кабели подвержены коррозионному воздействию бурового раствора, пластовых вод или нефти.

Таким образом, несмотря на то, что батареи и силовые кабели дают возможность энергоснабжения, они имеют серьезные ограничения, являются недолговечными и высокочрезвычайно затратными.

Автономный модуль энергоснабжения

Решением проблемы энергообеспечения удаленного оборудования является использование автономных систем энергообеспечения, включающих генератор, преобразующий различные источники энергии в электрическую.

Автономные системы энергообеспечения должны удовлетворять следующим основным требованиям: компактность, продолжительное непрерывное время работы, виброустойчивость, устойчивость к высоким температурам и коррозионно-активной среде. На базе этих условий разработано автономное устройство, преобразующее и перераспределяющее кинетическую энергию потока флюида [4] (рис. 1).

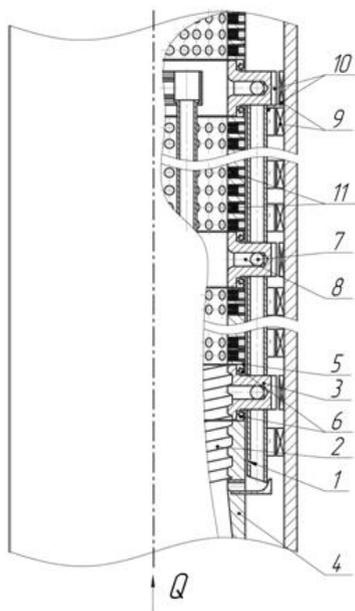


Рис. 1. Автономный модуль с рельефом:

- 1 – полое цилиндрическое тело;
- 2 – рельеф;
- 3 – вращающаяся часть;
- 4 – не вращающаяся часть;
- 5 – торец;
- 6 – подшипники;
- 7 – сопло;
- 8 – радиальное отверстие;
- 9 – обмотка;
- 10 – постоянные магниты;
- 11 – пьезоэлементы

Поток текучей среды Q под давлением подается в полость полого цилиндрического тела 1 (например, труба), где, попадая на тангенциально расположенный к потоку рельеф 2, закручивается сам и раскручивает подвижные части полого цилиндрического тела 1.

Попадание потока на вращающиеся части с рельефом приводит к перераспределению осевой скорости потока в сторону увеличения его угловой скорости. Для варьирования степенью воздействия на поток

может быть использован рельеф 2 различного профиля, в частности, макрорельеф или микрорельеф. А при необходимости избирательного воздействия потоком может быть применен частично регулярный рельеф 2. А при прохождении потока через сквозные радиальные отверстия 8 в части 3 ей и потоку придается дополнительная окружная скорость, за счет реактивного действия струй, выходящих из сопел (форсунок) 7 и раскручивающих безлопастную турбину 3. Для управления параметрами вращения турбины 3 и, соответственно, параметрами закрутки потока, сопла 7 устанавливаются необходимого диаметра и радиуса кривизны канала.

Преобразование энергии осуществляется следующим образом. С одной стороны, энергия потока текучей среды через колебания, возбуждаемые потоком, частично преобразуется в энергию упругой деформации пьезоэлемента 11, что ведет к выработке электроэнергии за счет прямого пьезоэффекта. При этом установившийся поток среды образует каскадный характер турбулентных слоев, приводящих к флуктуации давления в большом диапазоне частот и амплитуд в полости цилиндрического тела 1.

С другой стороны, кинетическая энергия потока частично преобразуется в кинетическую энергию вращения частей 3. Постоянные магниты 10, установленные на вращающихся частях 3, возбуждают токи в обмотках 9.

Оценка параметров автономного модуля энергообеспечения

Очевидно, что основная доля вырабатываемой устройством электроэнергии будет вырабатываться посредством преобразования кинетической энергии потока в кинетическую энергию вращения безлопастной турбины. При этом основной интерес представляет нахождение частоты её вращения. Для оценки этого параметра составим расчетную схему (рис. 2).

Величина реактивной силы R , вытекающей из сопла [5]

$$R = \frac{Q\rho}{z}(u - w) = \frac{Q\rho}{z} \left(\frac{Q}{\mu Sz} - 2\pi nL \right) \quad (1)$$

где ρ – плотность потока текучей среды, z – количество сопел, u – скорость струи на выходе из сопла, w – окружная скорость сопла, $S = \pi D^2/4$ – площадь выходного сечения сопла, D – диаметр выходного сечения сопла; L – расстояние до оси сопла; $\mu = 0.87$ – коэффициент расхода из сопла [6].

Для крутящего момента турбины можно записать выражение

$$M = zRL = \frac{Q^2 \rho L}{\mu S z} \left(1 - \frac{\mu S z}{Q} 2\pi n L\right) \quad (2)$$

Выражение (2) было приведено к каноничному виду для известного уравнения момента [7], основанного на уравнении Эйлера для турбомашин

$$M = M_T \left(1 - \frac{n}{n_x}\right) \quad (3)$$

где M_T – тормозной момент; n_x – частота вращения на холостом режиме.

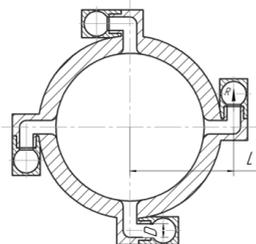


Рис. 2. Расчетная схема

Сопоставляя выражения (2) и (3) находим частоту вращения безлопастной турбины

$$n_x = \frac{Q}{\mu S z 2\pi L} \quad (4)$$

Выражение (4) показывает линейную прямо пропорциональную зависимость между n_x и Q , и обратно пропорциональную для μ , D , z , L . График зависимости $n_x(Q)$ приведен на рис. 3.

Зависимость (4) носит оценочный характер, например, здесь не было учтено механическое трение в подшипниках, ввиду чего реальные значения скорости будут несколько меньше. Из графика видно, что даже при небольших расходах среды можно получать существенные обороты безлопастной турбины, а, следовательно, и мощность, получаемую от неё.

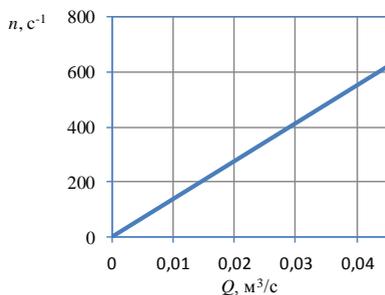


Рис. 3. Влияние потока среды на частоту вращения турбины:

$D = 10 \text{ мм};$

$z = 4;$

$L = 42 \text{ мм}$

Выводы

Выявлена высокая актуальность разработки эффективных ресурсосберегающих технологий для скважинных условий. Приведены основные недостатки традиционных источников электроэнергии для удаленного оборудования. Показана конструкция автономного гидродинамического модуля с рельефом, преобразующего энергию потока среды. Произведена оценка параметров разработанного устройства, которая показала его высокую эффективность в плане выработки электроэнергии, посредством преобразования энергии потока в кинетическую энергию вращения турбины.

Библиографический список

1. **Dimanchev M., Mintchev M.P.** Energy Harvesting in Horizontal Drilling Processes for the Purpose of Information and Navigation Monitoring // Information Theories and Applications. 2013. Vol. 20, № 1. P. 180-187.
2. **Kutasov I.M., Eppelbaum L.V.** Estimation of Geothermal Gradients From Single Temperature Log-Field Cases // Journal of Geophysics and Engineering. 2009. Vol. 6, № 2. P. 131-135.
3. **Hensley D., Milewits M., Zhang W.** Thermal stability of propylene carbonate and ethylene carbonate–propylene carbonate-based electrolytes for use in Li cells // Oil Field Rev. 1998. № 10. P. 42–57.
4. Пат. RU 2695735, МПК F15D 1/12. Завихритель и способ закрутки потока текучей среды, скважинный электрогенератор, содержащий завихритель потока текучей среды, и способ генерирования электроэнергии в скважине / К.А. Башмур, Э.А. Петровский; патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». опубл. 25.07.2019, Бюл. № 21. 17 с.
5. **Башта Т.М.** Машиностроительная гидравлика. М.: Машиностроение, 1971. 672 с.
6. **Альтшуль А.Д.** Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982. 224 с.
7. **Леонов Е.Г., Симошняц С.Л.** Совершенствование технологического процесса углубления скважины. М.: РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина, 2014. 184 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА СЧЁТ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Д-р техн. наук, доц. **Гашо Е.Г.**
Магистрант **Кондрахов В.А.**
Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва

***Аннотация.** В статье рассмотрены особенности и угрозы для энергетической системы Калининградской области. Проведён анализ направлений, способных уменьшить зависимости топливно-энергетического комплекса региона от поставок энергоресурсов. Проанализированы возможности оптимизации и повышение энергетической безопасности ТЭК области за счёт возобновляемых источников энергии региона. Проведена оценка инвестиций для строительства и реконструкции объектов возобновляемой энергетики области.*

***Ключевые слова:** альтернативные и возобновляемые источники энергии, энергобезопасность, энергоэффективность, энергонезависимость.*

Введение

В связи с отключением государств Балтии до 2025 года от энергокольца БРЭЛЛ актуальными вопросами для энергосистемы Калининградской области станет вопрос энергонезависимости и энергобезопасности. Для решения данной проблемы в области к 2020 году предполагается увеличить генерирующие мощности в два раза по сравнению с 2018 годом. При этом по оценкам властей региона объём потребления электроэнергии к 2035 году увеличится на треть, а объём поставок энергоресурсов для обеспечения нужд ТЭК области возрастет, что ставит под сомнение целесообразность данных мероприятий так как решается вопрос энергонезависимости однако вопрос энергобезопасности остаётся актуальным.

Цели и задачи

Основной целью является изучение возможностей решения актуальных проблем энергосистемы области, благодаря увеличению доли возобновляемых источников энергии в энергобалансе региона. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

– проведение анализа для поиска направлений, способных привести к снижению зависимости энергетической системы области от по-

ставок энергоресурсов для ТЭК региона по территории иностранных государств;

– изучение возможностей оптимизации и повышение энергетической безопасности ТЭК области за счёт ВИЭ региона;

– проведение оценки инвестиций для строительства и реконструкции объектов возобновляемой энергетики области.

Климатические и географические особенности региона

Калининградская область, расположена на побережье Балтийского моря в северной части Восточной Европы на расстоянии 450 километров от границы России. Область является самым западным регионом и отделена от основной части страны территорией иностранных государств. Протяжённость границы области по суше составляет 540 км., по морю 183 км.

Рельеф представляет собой холмистую равнину. На территории области находится Виштынецкая, Вармийская и Самбийская возвышенности. Но большую часть области занимают равнины, с обособленными участками, которые находятся ниже уровня моря, среди которых Нижненеманская низина и низовья рек Дейма, Преголя и Неман.

Климатические условия в регионе имеют сильные различия. Температура в области зависит от солнечной радиации и воздушных потоков, приходящих со стороны Балтики, что вызывает значительное колебание температуры в течение года, которые может достигать 20°C.

В соответствии с климатическими нормами для региона расчетная температура наружного воздуха в холодный период года равна -24°C. Нормативный отопительный период составляет 193 суток, средняя температура наружного воздуха в этот период равна 1,1°C. Градусы сутки отопительного периода в области составляют 3648°C·сут/год.

Общая оценка энергосистемы региона

Энергосистема области является изолированной от энергосистемы России, однако имеет несколько связующих с единой энергосистемой участков через электрические сети стран Балтии и Белоруссии. Связь осуществляется по восьми высоковольтным линиям электропередач, к ним относятся три ВЛ 330 кВ, три ВЛ 110 кВ и две ВЛ 10 кВ.

Важной особенностью области является зависимость ТЭК региона от поставок топлива. Энергосистема состоит из тепловых источников суммарная установленная мощность которых по состоянию на 01.01.2018 год составляет 1176,4 МВт. Основным топливом для объектов генерации в области является природный газ, поставляемый по газопроводу Минск – Вильнюс – Каунас – Калининград.

В настоящее время Литва стремится снизить зависимость от энергоресурсов России, поэтому в перспективе Литва может отказаться от потребления газа и прекратить транзит в область. В связи с этим становятся актуальными вопросы по развитию энергетики региона на основе ВИЭ. Сегодня в регионе среди ВИЭ по установленной электрической мощности лидируют ВЭУ и МГЭС. На 01.01.2018 года доля ВИЭ в энергобалансе области достигает 0,6 %. Рассмотрим более подробно возможность использования ВИЭ в области.

Ветроэнергетические установки

ВЭУ является наиболее перспективным направлением возобновляемой энергетики региона. Скорость ветра в течение года варьируются в широком диапазоне и зависят от близости к побережью Балтики. Средняя скорость ветра, составляет от 5 до 15 м/с, однако во время штормов скорость может достигать значения в 30 – 40 м/с. Распределение скоростей ветра позволяет выявить три зоны ветровой активности. Самая перспективная зона с ветроэнергетическим потенциалом, составляющим более 300 Вт/кв. м находится у побережья, где и предполагается разместить ВЭУ. По моим оценкам ВЭУ будут работать 3000 часов в год, из которых 750 часов с КИУМ равным 1, 1000 часов с КИУМ равным 0,9 и 1250 часов с КИУМ равным 0,8.

В перспективе мощность ВЭУ может вырасти с 5 до 55 МВт по электричеству, которая способна обеспечить выработку 146 млн кВт*ч и сэкономить 43,8 тыс. ТУТ ежегодно.

Гелиоустановки

На территории области преобладает пасмурная погода, она может держаться 158 дней, а количество ясных дней не более 34 в году (в 55 Москве). По моим оценкам гелиоустановки будут работать 1200 часов в год, из которых 200 часов с КИУМ равным 1, 400 часов с КИУМ равным 0,9 и 600 часов с КИУМ равным 0,8.

В перспективе мощность гелиоустановок может вырасти с 0,2 до 0,6 МВт по электричеству и с 0,2 до 0,6 МВт по теплу, это обеспечить выработку 0,65 млн кВт*ч электрической и 0,65 млн кВт*ч тепловой энергии, что позволит суммарно сэкономить 374 ТУТ ежегодно.

Таким образом, применение гелиоустановок в качестве дополнительных источников для частного жилого фонда региона имеют определённые перспективы.

Малая гидроэнергетика

Область имеет развитую сеть рек. Всего в области протекает 148 рек длиной более десяти километров. Крупнейшие реки области –

Неман, Дейма и Преголя. При этом даже малые реки никогда не пересыхают, а в мягкие зимы устойчивый ледостав на реках не образуется.

Благодаря данной особенности регион может эффективно использовать доступные гидроресурсы. В основном целесообразно провести реконструкцию и восстановление существующих малых ГЭС, что позволит в перспективе увеличить мощность МГЭС с 1,6 до 14 МВт, это обеспечит выработку 72,4 млн кВт*ч электроэнергии, что позволит ежегодно экономить 21,7 тыс. ТУТ.

Применение ТНУ

В области широко представлены низкопотенциальные источники тепла. Хранимое тепло в грунте и водоемах, можно использовать для теплоснабжения за счет тепловых насосов. Стоит заметить, что ТНУ широкого применения не получили, но имеют большие перспективы. Наиболее целесообразно использовать ТНУ для теплоснабжения малых населенных пунктов, не подключенных к системе газоснабжения.

По моим оценкам данные ТНУ работают около 3500 часов в год. На данный момент общая суммарная установленная мощность ТНУ в области равна 4 МВт. Однако в перспективе можно увеличить мощность ТНУ до 7 МВт, это обеспечит выработку 14,5 млн кВт*ч тепла, что позволит экономить 7,3 тыс. ТУТ ежегодно.

Использование твердых коммунальных отходов

Одним из приоритетных направлений биоэнергетики региона может стать утилизация ТКО. Основным методом обращения с ТКО в области является захоронение. При этом ежегодно образуется около 452 тыс. тонн ТКО из которых 70% (316,4 тыс. тонн) возможно утилизировать, это делает ТКО возобновляемым и распространенным топливом в регионе.

В регионе есть возможность создания мини-ГЭС или котельных, на которых для выработки электрической и тепловой энергии в качестве энергетического сырья могут использоваться пригодные для переработки ТКО. По моим оценкам источники энергии, использующие ТКО в качестве энергетического сырья, будут функционировать 8000 часов в год. В перспективе использование горючей части ТКО позволит увеличить мощности до 11,8 МВт по электричеству и до 32,6 МВт по теплу, это позволит обеспечить выработку 94,9 млн кВт*ч электрической и 261 млн кВт*ч тепловой энергии, что позволит суммарно сэкономить 91,9 тыс. ТУТ ежегодно.

Использование торфа

Ещё одним перспективным направлением биоэнергетики региона может стать торф. Торфяники занимают приблизительно 7% террито-

рии области. Запас торфа в области около 311 млн. тонн. На 2018 год в регионе насчитывается 95 торфяных месторождений. Объем добычи торфа в год составляет около 81,1 тыс. тонн. При этом в перспективе объем добычи в области может возрасти до 128,4 тыс. тонн в год, из которых только 64% (82,1 тыс. тонн) пойдет на энергетические нужды, ввиду активного использования торфа в качестве удобрения.

На 2018 год в регионе функционируют четыре котельные, использующие торф в качестве энергетического сырья. По моим оценкам данные источники энергии работают около 4650 часов в год.

Строительство новых источников в области позволит сделать торф одним из перспективных направлений развития биоэнергетики региона и увеличить мощности источников с 0 до 17,6 МВт по электричеству и с 17,7 до 29,1 МВт по теплу, это позволит обеспечить выработку 82,1 млн кВт*ч электрической и 135,6 млн кВт*ч тепловой энергии, что позволит суммарно сэкономить 56,5 тыс. ТУТ ежегодно.

Использование биогаза

Перспективным направлением биоэнергетики области может стать получение биогаза из отходов сельского хозяйства. По состоянию на 2017 год в регионе около 100 крупных и 65 малых сельскохозяйственных организаций и 1150 фермерских хозяйств.

Основным источником биогаза в Калининградской области могут стать отходы животноводческих ферм и птицефабрик. В области производится около 3243,6 тыс. тонн навоза ежегодно. Однако половина отходов используется как удобрения, а другая половина около 1621,5 тыс. тонн вывозятся на объекты где происходит их захоронение. Такое количество навоза позволяет ежегодно вырабатывать около 129,35 млн. м3 биогаза.

На 2018 год в регионе отсутствуют источники, использующие биогаз в качестве энергетического сырья. Однако в перспективе при вводе в эксплуатацию данные источники по моим оценкам будут работать около 4650 часов в год. Это позволит увеличить мощности источников до 27,8 МВт по электричеству и до 27,8 МВт по теплу, это позволит обеспечить выработку 129 млн кВт*ч электрической и 129 млн кВт*ч тепловой энергии, что позволит суммарно сэкономить 67,2 тыс. ТУТ ежегодно.

Биоэнергетический потенциал лесной промышленности

Леса занимают приблизительно 18,5% территории области. Растительный покров региона разнообразен, около 70% видового состава представлено лиственными породами, а 30% – хвойными.

Леса в основном относятся к охраняемым природным зонам. Поэтому лесозаготовка осуществляется во время лесовосстановительных рубок или при рубке промежуточного использования. В области ежегодно вырубается около 521 тыс. м³ леса добывая при этом 430 тыс. м³ ликвидной древесины, 133 тыс. м³ дров и 90 тыс. м³ древесных отходов. Дрова используются в малых населенных пунктах, не подключенных к сетевому газоснабжению для отопления, это ежегодно позволяет экономить по моим оценкам около 29,6 тыс. ТУТ. При этом запасы коры и другие древесные отходы в области не используются.

Объекты энергетики, использующие древесные отходы в качестве топлива по моим оценкам, будут работать 4650 часов в год.

Данные источники позволяют утилизировать отходы лесозаготовок (щепа, опилки), что даст региону дополнительные мощности равные 5,6 МВт по электричеству и 8,8 МВт по теплу, это обеспечит (с учетом использования населением дров для отопления домов) выработку 26,1 млн кВт*ч электрической и 179,1 млн кВт*ч тепловой энергии, что позволит суммарно сэкономить 53,2 тыс. ТУТ ежегодно

Оценочные затраты на строительство ВИЭ региона

По моим оценкам в среднесрочной перспективе затраты на строительство или реконструкцию ВИЭ в регионе требуют вложения приблизительно около 7515 млн. руб. (ВЭУ), 561,6 млн. руб. (Малые ГЭС), 5028 млн. руб. (биоэнергетика (Торф, ТКО, Биогаз, Лесные отходы)), 700 млн. руб. (ТНУ), 159 млн. руб. (гелиоустановки).

Таким образом для реализации программы по строительству и реконструкции ВИЭ в области необходимо приблизительно затратить около 14,7 млрд. рублей.

Выводы по работе

В настоящее время в Калининградской области установленная мощность ВИЭ равна 6,94 МВт по электричеству и 51,1 МВт по теплу. Однако в перспективе при вложении 14,7 млрд. рублей возможно увеличить мощности объектов возобновляемой энергетики по электричеству на 94,9% до 136,59 МВт, а по теплу на 66,8% до 155,46 МВт.

Использование ВИЭ позволит региону в перспективе добиться ежегодной экономии топлива в 385,74 тыс. ТУТ и позволит уменьшить зависимость региона от поставок энергетических ресурсов, что в сложившихся политических условиях позволит решить вопрос энергобезопасности области. При этом стоит отметить, что при необходимом финансировании наибольший рост установленной мощности покажут такие ВИЭ как: биоэнергетика (увеличение установленной электрической мощности на 100% до 62,85 МВт), ветроэнергетика (увеличение

установленной электрической мощности на 90,7% до 55,1 МВт) и малая гидроэнергетика (увеличение установленной электрической мощности на 88,3% до 14,04 МВт). Наиболее затратными ВИЭ для области можно назвать такие направления как: ветроэнергетика (капиталовложения 7515 млн. руб.) и биоэнергетика (капиталовложения 5028 млн. руб.). При этом наименее затратными направлениями возобновляемой энергетики являются: тепловые насосы (капиталовложения 700 млн. руб.) и гелиоустановки (капиталовложения 159 млн. руб.).

Проведённый анализ позволяет сделать вывод, что перспективными направлениями возобновляемой энергетики, которые обладают максимальным потенциалом на территории области являются: малая гидроэнергетика, биоэнергетика, тепловые насосы, а также ветроэнергетика, которая несмотря на высокие затраты на единицу мощности способна обеспечить значительное увеличение выработки электрической энергии в регионе, что позволит существенно улучшить показатели энергетической безопасности и энергосбережения в области.

Библиографический список

1. **Кондрахов В.А.** Повышение эффективности и безопасности энергосистемы Калининградской области за счёт возобновляемых источников энергии. Дисс. на соискание звания магистра по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» М.: НИУ МЭИ, 2019.

2. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Калининградской Области на 2019-2023 годы [Электронный ресурс]. URL: <http://infrastruktura.gov39.ru/upload/Схема%20и%20программа%20перспективного%20развития%20эл.энергетики%20КО%202019-2023гг.pdf>.

3. Возобновляемая энергетика для северо-запада России. Ресурсы и перспективы [Электронный ресурс] / В.В. Елистратов, В.С. Холодков, В.И. Масликов и др. СПб., 2005. URL: <http://baltfriends.ru/book/export/html/59>.

4. **Баринов А.В.** Перспективы развития электроэнергетики России на период до 2030 г. / Матер. открытого семинара «Экономические проблемы энергетического комплекса (семинар А.С.Некрасова)», 133 заседание от 23 октября 2012 года. М.: Изд-во ИИП РАН, 2013. 33 с.

5. **П. П. Безруких, В. В. Елистратов, Г. И. Сидоренко.** Оценки ресурсов возобновляемых источников в России. СПб.: Изд.-во Политех. университета, 2009. 251 с.

6. **Безруких П.П.** Экономические проблемы нетрадиционной энергетики // Энергия. 1995. № 8. С. 2-5.

УДК 536.51;531.787

**РАДИОФОТОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ГИБРИДНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ АДРЕСНЫХ
ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР С ДВУМЯ
ИДЕНТИЧНЫМИ СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫМИ СПЕКТРАМИ
ОТРАЖЕНИЯ***

Аспирант Губайдуллин Р.Р.

*Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань*

***Аннотация.** В данной работе представлена принципиальная схема устройства контроля температуры батарей гибридных транспортных средств и оптико электронная схема мультиплексации чувствительных элементов системы. Так же была дана оценка применимости адресных волоконных брэгговских структур работающих на прохождение и отражение для гибридных автотранспортных средств.*

***Ключевые слова:** волоконная брэгговская решетка, ВБР, датчик температуры, адресные волоконные брэгговские структуры, гибридное транспортное средство, гибридный автомобиль.*

На сегодняшний день с увеличением цен на углеводородное топливо примерно в 5 раз за последние 20 лет [1], автопроизводители вынуждены все большее внимание уделять альтернативным источникам энергии таким, как многоразрядные аккумуляторные батареи для электрических и гибридных транспортных средств. Однако применение подобных источников энергии сопряжено некоторыми трудностями связанными с производством, утилизацией, мониторинга состояния, зарядкой и установкой в транспортном средстве. Данная работа нацелена на решение вопроса с мониторингом состояния батарей с помощью разработки радиофотонной системы измерения температуры на основе адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) [2-5]. В ходе проведения данного исследования в работе были рассмотрены следующие задачи: удешевление и упрощение оптоволоконной системы опроса чувствительных элементов системы, мультиплексирование

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части Государственного задания 8.6872.2017/8.9

много сенсорной системы измерения, калибровка чувствительных элементов измерительной системы, выбор типа АВБС исходя из удобства применения в гибридных транспортных средствах.

Требования к измерительной системе. Для эффективной работы системы мониторинга температуры батарей гибридных транспортных средств разрабатываемая система должна обладать следующими качествами:

- 1) устойчивость к электромагнитным излучениям (ЭМИ), излучаемым устройства зарядки батареи, электродвигателя и от самих батарей;
- 2) возможность организации передачи информации о состоянии батарей на бортовой компьютер транспортного средства;
- 3) возможность организации серии датчиков в единую измерительную сеть с простой архитектурой;
- 4) дешевизна устройства опрашивающего оптоволоконные датчики;
- 5) возможность быстрого и простого монтажа и отсоединения батареи с температурным датчиком из силовой системы транспортного средства при ремонте и обслуживании;
- 6) простота обслуживания и ремонтпригодность датчика;
- 7) устойчивость чувствительного элемента и корпуса датчика к длительным тепловым нагрузкам в диапазоне от -40 до 60 °C для большинства аккумуляторных батарей и до $+300$ °C для батарей Ni-NaCl и Na-S согласно данным табл. 1.

Таблица 1

**Температурные режимы работы
различных аккумуляторных батарей [6]**

Тип батареи	Рабочая температура, °C
Zebra (Ni-NaCl)	от -40 до 350
Pb-PbO ₂	от 0 до 40
Ni-Cd	от -20 до 50
Ni-MH	от 20 до 40
Na-S	от 300 до 350
Li-Ion	от -40 до 60

Значительную часть задач, возможно, решить с помощью радиофотонных методов измерения. Так согласно [7] ВБР мало восприимчивы к ЭМИ. На сегодняшний день технологии передачи информации от ВБР на электронные устройства хорошо изучены и широко

применяются технике [8]. Наиболее распространённым способом опроса и мультимедийной датчиков на основе ВБР является метод спектрального уплотнения каналов (WDM), где для опроса датчиков в измерительных устройствах, как правило, применяются сложные и дорогостоящие устройства-интеррогаторы [9]. Для удешевления и упрощения системы мониторинга температуры в данной работе предлагается использовать АВБС представленные в работах [10,11]. К достоинствам подобного класса чувствительных элементов следует отнести простоту и дешёвую оптико-электронную схему опроса, где в качестве источника излучения используется широкополосный лазер, а опрашиваемого устройства-фотоприёмники. Это становится возможным благодаря наличию в спектральных характеристиках АВБС разностных частот выступающих в качестве адреса каждого отдельно взятого чувствительного элемента [2-4]. В зависимости от способа монтажа и схемы расположения аккумуляторных батарей в транспортном средстве тип АВБС может изменяться. Однако проанализировав существующие модели гибридных автомобилей можно сделать вывод о том, что большинство из них создаётся на основе конструкции обычных бензиновых автомобилей, что вынуждает конструкторов размещать аккумуляторные батареи блоками в различных частях автомобиля. В этой связи наиболее перспективным типом АВБС для измерительной системы контроля температуры аккумуляторных батарей гибридного транспортного средства видятся АВБС работающими на отражение оптического сигнала, так как они подключаются последовательно, а не параллельно как работающие на прохождение. Данный способ подключения датчиков должен обеспечить простой монтаж и обслуживание аккумуляторных батарей. Согласно [3] предъявленным требованиям к АВБС соответствуют адресные волоконные брэгговские структуры с двумя идентичными сверхузкополосными спектрами отражения. Исходя из ГОСТ 13659-78 верхний рабочий диапазон оптического волокна составляет $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура начала деформации кварцевого стекла по меньшей мере $+1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ согласно ГОСТ 15130-86, что удовлетворяет условиям работы низкотемпературных аккумуляторных батарей и даёт основания полагать о возможности использования подобного класса чувствительных элементов для высокотемпературных аккумуляторов.

Адресная волоконная брэгговская структура с двумя идентичными сверхузкополосными спектрами отражения (2λ -ВБР). Согласно [12] данная АВБС по своей сути представляет собой две сверхузкополосные ВБР с разнесёнными блинами волн Брэгга на ад-

ресную частоту. Отклик отражения подобной АВБС полученной в пакете программ OptiGrating представлен на рис. 1а, а ее схематичное представление на рис. 1б.

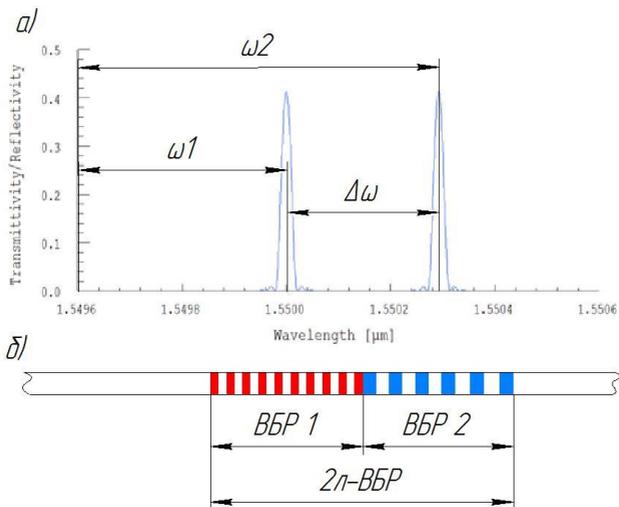


Рис. 1. Адресная волоконная брэгговская структура с двумя идентичными сверх узкополосными спектрами отражения (2λ -ВБР) [8]:
 а – спектральный отклик АВБС, б – схема АВБС

Оптико электронная схема системы контроля температуры аккумуляторных батарей. Оптико-электронная схема опроса 2λ -ВБР (рис. 2) основана на принципах радиофотонных измерений и предназначены для анализа излучения от АВБС, где широкополосный лазер – 1 генерирует непрерывное излучение (диаграмма а), которое отражается от АВБС – 3.1-3.3 и попадает циркулятор – 2, который перенаправляет отраженный от АВБС сигнал (диаграмма б) на оптоволоконный разветвитель – 7, где оптический сигнал делится на два канала: опорный и измерительный. В измерительном канале устанавливается фильтр с линейной амплитудно-частотной характеристикой – 4, асимметрично изменяющий амплитуды многочастотного излучения (диаграмма d), после чего оптический сигнал подается на измерительный фотодетектор – 5 и принимается на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) – 6. В опорном канале, сигнал (диаграмма е) без изменения мощности попадает на опорный фотоприемник – 8 и передается в опорный АЦП – 9. Далее все расчеты ведутся не с абсолютным значением

мощности светового потока, а с отношением мощностей в измерительном и опорном каналах. Отношение мощностей оптического сигнала на фотоприемниках – 5 и 8 дает возможность избавиться от недостатка широкополосного лазера связанного с колебаниями мощности светового потока, возникающих в оптико-электронной системе [4].

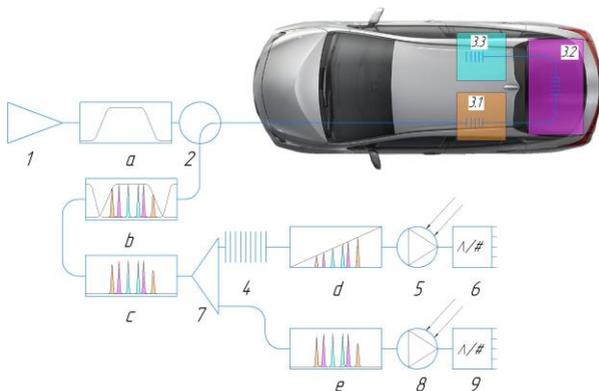


Рис. 2. Оптико электронная схема опроса измерительной системы:

1 – широкополосный лазер; 2 – циркулятор; 3.1-3.3 – 2λ-ВБР чувствительные элементы; 4 – наклонный фильтр; 5 – измерительный фотоприемник; 6 – измерительный аналогово цифровой преобразователь; 7 – оптический делитель; 8 – опорный фотоприемник; 9 – опорный аналогово цифровой преобразователь

Калибровка температурных датчиков. Температуру аккумуляторной батареи в точке установки АВБС датчика можно определить как функцию температуры от смещения центральной длины волны для датчика согласно [13]:

$$T = f(\Delta\lambda_T, c_2, c_1, c_0) = c_2 \cdot (\Delta\lambda_T)^2 + c_1 \cdot \Delta\lambda_T + c_0,$$

где: $\Delta\lambda_T$ – сдвиг центральной длины волны вследствие температурного воздействия; c_i – калибровочные коэффициенты.

Выводы по работе. В ходе проведения работ по разработке рафиофотонной системы контроля температур аккумуляторных батарей транспортных средств был проделан следующий список работ: обосновано использование волоконно оптических чувствительных элементов, выбран тип чувствительного элемента, предложена схема измерительного устройства и методика калибровки температурных датчиков.

Библиографический список

1. **Корнилов Д.А., Макаренко В.С., Макаров В.М.** Динамика средних мировых цен на нефть [Электронный ресурс] // Иннов: электронный научный журнал. 2017. № 3 (32). URL: <http://www.innov.ru/science/economy/dinamika-srednikh-mirovykh-tsen-na/>.
2. Методы формирования двухчастотного излучения с разностной частотой, лежащей в терагерцовом диапазоне / Р.А. Хабибуллин, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Т. 20, № 3-2. С. 41-46.
3. **Сахабутдинов А.Ж.** Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона 3 (2018). URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_100_Sahabutdinov.pdf_7737e7c7e5.pdf
4. **Сахабутдинов, А.Ж.** Радиофотонные сенсорные системы на адресных волоконных брэгговских структурах и их применение для решения практических задач: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.07 Казань, 2018. 467 с.
5. Волоконно-оптическая сенсорная система контроля температуры токоведущих шин / В.А. Иваненко, В.Н. Алексеев, И.А. Лобанов и др. // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. XI всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2018. С. 316-320.
6. **Liu Z., Morello R., Wu W.** Experiments on battery capacity estimation // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2015. P. 863-868.
7. **Mukherjee B.** WDM optical communication networks: Progress and challenges // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, No. 10, P. 1810-1824.
8. Исследование параметров волоконно-оптической линии передачи / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, А.В. Воронков, Н.А. Шишова. Самара: ПГАТИ, 2004. 65 с.
9. **Варжель, С.В.** Волоконные брэгговские решётки. СПб: Университет ИТМО, 2015. 65 с.
10. Microwave-Photonic Sensory Tire Control System Based on FBG [Электронный ресурс] / Gubaidullin R.R., Agliullin T.A., Morozov O.G. et al. // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 2019. URL: <http://toc.proceedings.com/48651webtoc.pdf>.
11. Tire Strain Measurement System Based on Addressed FBG-Structures [Электронный ресурс] / Gubaidullin R.R., Agliullin T.A., Morozov O.G. et al. // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 2019. URL: <http://toc.proceedings.com/48651webtoc.pdf>.
12. Application of Addressed Fiber Bragg Structures for Measuring Tire Deformation / Gubaidullin R.R., Agliullin T.A., Morozov O.G. et al. // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2019. 19009581. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8813908>
13. **Нуреев И.И.** Постановка задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры // Нелинейный мир. 2015. Т. 13, № 8. С. 26-31.

УДК 620.92

ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ НА РОЗНИЧНЫХ РЫНКАХ КАК ТОВАР В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Канд. техн. наук, доц. **Зацаринная Ю.Н.**
канд. техн. наук, доц. **Логачева А.Г.**
Магистрант **Григорьева М.О.**
*Казанский государственный энергетический
университет, г. Казань*

***Аннотация.** В статье представлена концепция интеллектуальной системы, которая позволяет вовлекать отдельные домохозяйства в прогрессивный тип потребления и генерации энергии и создает новый тип энергосистемы и участника рынка – просьюмера. Две системы предлагаются для домашних хозяйств, оснащенных солнечными панелями. Первый подразумевает, что генерируемая энергия потребляется самим домохозяйством, а второй – что избыток энергии продается в сеть. Предлагается распространить практику расчетов по нерегулируемым ценам на физических лиц и домохозяйства с возможностью выбора выгодной ценовой категории для рассматриваемого просьюмера.*

***Ключевые слова:** домохозяйства, распределенная генерация, ВИЭ, просьюмер, солнечные панели.*

Одним из вызовов доктрины энергетической безопасности, утвержденной 216 указом Президента РФ от 13 мая 2019 г., является увеличение доли возобновляемых источников энергии в топливно-энергетическом балансе России. Вызов, обозначенный в доктрине, является следствием обязательства, которое взяла на себя Россия по снижению выбросов CO к 2020 году.

Целью данной статьи является предложение создания удобной платформы и внесения соответствующих поправок в законодательство для осуществления взаиморасчетов между потребителем и производителем, в одном лице, далее будем называть его просьюмером, в уже сложившейся системе, в которой осуществляются расчеты за электроэнергию. Подобный сдвиг станет возможен благодаря развитию интеллектуальных технологий в сфере энергетики и увеличению количества возобновляемой энергии.

Более того, необходимо не только принятие климатического соглашения и национальных законодательных актов, но и ведение активной политики государства, направленной на поддержку развития

ВИЭ населением. Все это требует гибкую налоговую политику государства, а также поддержку просьюмеров в потреблении и производстве чистой энергии [1].

Актуальной задачей энергетической политики является поиск оптимального соотношения между доступностью электроэнергии физически и экономически. В большинстве рынков, как оптовых, так и розничных, спрос на электроэнергию имеет низкую чувствительность к цене. Колебания цен на электроэнергию, которые происходят на оптовом рынке ежечасно, не доводятся до розничного потребителя. Розничные цены в России регулируются, но сбытовые компании не стремятся использовать цены в реальном времени и информировать потребителей бытового сектора о возможности сэкономить. Сейчас в условиях ценового регулирования на розничных рынках потребители коммунальных услуг, согласно приложению к приказу федеральной службе по тарифам N 20-э/2, принятом в в 2004 году, рассчитываются по фиксированной цене, в отличие от коммерческих потребителей с многоставочными тарифами. Правительство не раз предпринимало попытки введение разных тарифов для населения и пилотировало их в нескольких субъектах России, но по большей части оплата по тарифу осуществлялась в зависимости от объема потребляемой энергии, а не от колебаний цены на оптовом рынке электроэнергии. Если потребитель осведомлен о ценах реального времени, то цена на розничном рынке будет точно следовать за уровнем нагрузки [2]. Для этого нужно внести изменение в существующее законодательство и производить расчеты населения по нерегулируемым тарифам [3].

По данным Международного энергетического агентства (МЭА) [4] ожидается, что доля возобновляемых источников энергии вырастет на 20% и достигнет 12,4% от всего мирового потребления в 2023 году.

Во многих развитых странах, а также местах, где недоступно централизованное электроснабжение или труднодоступных для электроснабжения регионов, в которых ВИЭ окажутся конкурентоспособными, для этого необходимо обратить внимание на развитие распределенного энергоснабжения потребителей [5]. Для удовлетворения этой энергетической потребности 77% мирового спроса относится к покупке домашней солнечной системы. Поэтому использование распределенной возобновляемой энергетики, интеллектуализация инфраструктуры и переход потребителей к активным, просьюмерским моделям поведения очевиден [6]. При этом эффективное тарифообразование для просьюмера, позволит получить дополнительную прибыль и скорректировать его потребление.

Согласно п. 5 постановления Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 на розничных рынках электроэнергии действует шесть ценовых категорий электроэнергии. На основе этого документа Федеральной службой по тарифам, Минэкономразвития РФ, Министерством энергетики РФ и Федеральной антимонопольной службой разработаны правила применения и определения гарантирующими поставщиками нерегулируемых цен на электроэнергию (мощность). Данные правила утверждены в Постановлении Правительства РФ от 29.12.2019 № 1179.

Мы предположили выбор одной из нескольких ценовых категорий для рассматриваемого объекта: первой, второй, третьей и четвертой, а также провели расчет по каждой из них. На основе полученных данных были сформированы рекомендации для потребителя электроэнергии.

С учетом вышеизложенного должно быть разработано техническое решение для интеграции ВИЭ в энергосистему, позволяющее учитывать сигналы рынка, а также доступное не только крупным промышленным объектам, но и единичным домохозяйствам или жилищным обществам. Тогда каждый человек может быть вовлечен в систему прогрессивного потребления электроэнергии.

Вся информация о потреблении или выработке электроэнергии на различных устройствах объекта собирается в единую систему расчетов, расположенную на сервере энергоснабжающей организации. На этом сервере осуществляются финансовые расчеты за электроэнергию.

Финансовые расчеты, проводимые системой, осуществляются по двум моделям. Первая модель – модель энергетического кредита. При выборе этой модели просьюмер получает возможность учитывать выработанную и отданную в сеть электроэнергию на своем счете в виде товарной продукции. В периоды, когда собственное потребление превышает генерацию ее можно использовать для взаимозачета потребленной электроэнергии из сети. Вторая модель называется энергетический биллинг. В ней электроэнергия, вырабатываемая и потребляемая из сети, имеют свои установленные цены. Выработанную сверх собственного потребления электроэнергию потребитель продает и учитывает ее на своем счете в денежном эквиваленте.

Для модели энергетического кредита требуется двунаправленный счетчик, который при потреблении электроэнергии из сети будет прибавлять ее объем к записанному в счетчике значению, а при выработке – будет его отнимать. Просьюмер осуществляет оплату в денежном выражении только за покупку электроэнергии из сети по розничной цене. Энергетический биллинг требует наличия двух счетчиков, осуществляющих раздельный подсчет потребленной и отданной в сеть

электроэнергии. В этой модели просьюмер покупает электроэнергию из сети у энергоснабжающей организации по розничной цене и продает произведенную энергию по оптовой цене. При этом для отслеживания ценообразования в реальном времени счетчик должен учитывать текущую рыночную цену для выбора актуального розничного тарифа.

С целью оценки экономической целесообразности предлагаемых расчетных моделей нами были проведены подсчеты предполагаемой генерации, полученной от солнечных панелей, установленных на крыше жилого дома в городе Казань. Реализация энергии производилась по двум описанным выше моделям. В рассматриваемом случае потребление составляет 7120,8 кВт·ч, общая генерация электроэнергии составляет 6 901,9 кВт·ч. При этом по итогам месяца задолженность пользователя перед снабжающей организацией по системе кредита составил 2 700 руб, а по системе биллинга 7 213 руб. Таким образом, энергетический кредит выгоден для тех, кто генерирует меньше, чем потребляет. А энергетический биллинг – для просьюмеров, выработка которых часто превышает объем собственных нужд домохозяйства.

При вышеприведенных расчетах не учитывались колебания цены на электроэнергию на розничном рынке. Однако, как было указано выше, для полноценного включения всех потребителей в прогрессивную модель потребления система финансовых расчетов включает в себя функцию транслятора ценовых сигналов рынка. Рассмотрим и оценим несколько моделей расчетов с применением ценовых категорий, которые действуют сейчас в России для юридических лиц, и суть которых предлагается перенести на финансовые расчеты просьюмеров.

Выработка электроэнергии ВИЭ непостоянна, поэтому потребителю приходится совмещать питание от сети и ВИЭ. В случае, если жилой дом не оборудован аккумуляторами или иными источниками альтернативной энергии, кроме Солнца, то есть потребление из сети будет производиться каждый день в темное время суток. Расчеты показали, что применение двухставочного тарифа на передачу в сравнении с другими выгоднее на 1 310 рублей (рис. 1). Таким образом, при данных условиях выгоднее использовать вторую ценовую категорию, когда расчет электроэнергии идет по двум зонам суток.

Для случая, когда расчет ведется по категориям, но потребитель не отдает «излишки» в сеть, наиболее выгодной оказалась первая. При использовании первой категории потребитель выигрывает за год в сравнении с третьей и четвертой соответственно 545 и 544 рублей соответственно (рис. 2). Двухставочный тариф оказался хоть и незначительно, но выгоднее одноставочного (рис. 3).

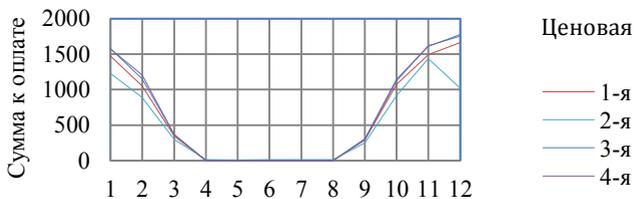


Рис. 1. Сравнение сумм годовой оплаты при расчетах по первой, второй и третьей ценовой категории для модели энергетического кредита

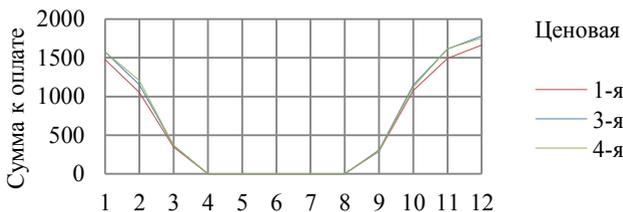


Рис. 2. Сравнение сумм годовой оплаты при расчетах по первой, третьей и четвертой ценовой категории для модели энергетического биллинга

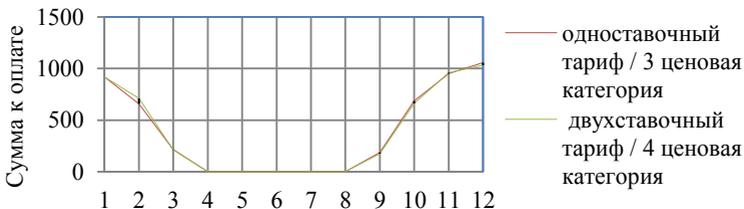


Рис. 3. Сравнение сумм годовой оплаты при расчетах по третьей и четвертой ценовой категории

Однако, нужно заметить, что выгодность какой либо ценовой категории величина непостоянная. Нельзя однозначно сказать, что для всех регионов будет выгодна какая-то одна конкретная категория. Более того, для каждого потребителя внутри региона выгодны различные ценовые категории. Поэтому для того, чтобы не попасть на увеличение в цене, необходимо периодически проводить анализ условий энерго-снабжения хозяйства и при необходимости вносить изменения.

Выводы: В качестве первого шага к реализации предложенной концепции системы торговли энергией должны быть внесены изменения в налоговое законодательство, которые будут направлены на сти-

мулирование развития ВИЭ. К таким мерам, в отношении к просьюмерам, может служить введение налоговых льгот на добавленную стоимость на транспортировку солнечных панелей, на их приобретение и установку, предоставление налоговых каникул для первых лет использования оборудования и ввести государственное субсидирование процентных ставок по кредитам в отношении объектов ВИЭ [8].

Следующим шагом является согласование порядка технологического присоединения к сетевому объекту. После этого осуществляется установление принципов договорных отношений с сбытовой организацией. В общем случае это означает выбор модели выставления счетов для пользователя. Для реализации этого шага необходимо распространить практику расчетов по нерегулируемым ценам на физических лиц и домохозяйства с возможностью выбора наиболее выгодной ценовой категории для рассматриваемого просьюмера и внести изменения в п. 5 постановления Правительства РФ 442 и приравнять население к потребителям, которые оплачивают электроэнергию по нерегулируемым ценам.

Библиографический список

1. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil / A. Ferreira, S.S. Kunh, K.C. Fagnani et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81(1). P. 181–191.

2. **Софт С.** Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии: Пер. с англ.; Под ред. А.И. Лазебника, И.С. Сорокина. М.: Мир, 2006. 623 с.

3. **Гречухина И.А., Кудрявцева О.В., Яковлева Е.Ю.** Эффективность развития рынков возобновляемых источников энергии в России // Экономика региона. 2016. Т. 12, № 4. С. 1167–1177.

4. Renewables 2018. Analysis and forecasts to 2023 [Сайт]: IEA [2018]. URL <https://www.iea.org/renewables2018>. (дата обращения: 05.11.2019).

5. Renewables 2018. Global status report [Электронный ресурс]. Paris: REN21 Secretariat, 2018. 324 p. URL: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/08/Full-Report-2018.pdf>.

6. **Eroshenko S.A., Samoilenko V.O., Pazderin A.V.** Renewable energy sources for perspective industrial clusters development // 2nd Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016). Proc. 2. 2016. 7911460.

7. **Жизнин С.З., Тимохов В.М.** Влияние энергетики на устойчивое развитие // Мировая экономика и международные отношения. 2017. Т. 61, № 11. С. 34–42.

8. **Абдурешитова Д.В.** Налоговые методы регулирования и стимулирования развития возобновляемой энергетики Российской Федерации // Научный вестник: Финансы, банки, инвестиции. 2018. № 1. С. 57–64.

УДК 628.474.3:662.767.2

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЖИГАНИЯ RDF-ТОПЛИВА С ДОЖИГОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВАЛОЧНОГО ГАЗА*

Ст. преп. **Корнилова В.В.**

Д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**

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

***Аннотация.** Предложена комплексная энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов и свалочного газа с использованием биогаза (свалочного газа) для дожига продуктов горения RDF-топлива. Разработана методика расчета горения в установке с учетом различного распределения подачи воздуха в первую и вторую камеру. Предложен способ регулирования режимом процесса сжигания RDF-топлива с дожигом свалочным газом, который позволит осуществлять процесс сжигания биотоплив при изменении их состава и свойств.*

***Ключевые слова:** горение, RDF-топливо, дожиг, свалочный газ, биогаз.*

В настоящее время не существует экономически эффективного и одновременно экологически безопасного решения для утилизации твердых коммунальных отходов (ТБО, ТКО, MSW) [1, 2].

Сжигание отходов позволяет уменьшить их объем в 5-10 раз, заменить органическое топливо, снизить выброс парниковых газов в атмосферу [3], так как парниковый эффект от метана, выделяющегося с полигонов ТКО, по разным оценкам сильнее, чем от углекислого газа, на величину от 25 раз [4] до 84 раз [5].

Главный недостаток прямого сжигания – загрязнение атмосферы вредными выбросами при избытке кислорода в зоне горения и низкой температуре горения [6]. Согласно Директиве Европейского Парламента и Совета 2010/75/ЕС от 24.11.2010 «О промышленных выбросах (о комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним)» термическое обезвреживание отходов гарантирует практически полное разрушение находящихся в отходах органических вредных веществ. Экологическим требованиям удовлетворяют установки, в которых продукты горения находятся не менее 2 секунд при температуре не менее 850°C, или при сжигании отходы с содержанием более 1% гало-

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

генов температура должна быть минимум 1100°C. Количество выбросов увеличивается при нестабильности режима горения, которым характеризуется сжигание всех видов биотоплив [7], а так же в установках малой производительности [8]. Но в работе [8] отмечается, что существующие технологии позволяют эффективно решать возникающие при сжигании RDF-топлива проблемы.

Традиционно при сжигании отходов очистка отходящих газов производится в многоступенчатых системах, устанавливаемых за котлом или печью [1, 9]. Недостатком этого метода является высокая стоимость и сложность системы газоочистки. Для ликвидации вредных выбросов предлагается производить очистку отходящих газов с помощью дожига с использованием природного топлива [10].

В патенте RU 2 303 746 для дожига используется ископаемое топливо (природный газ), в ряде работ для дожига предлагается использовать ВЧ- излучение и плазменные струи. В ряде патентов (RU 2 230 989 «Печь для дожигания дымовых газов», SU 473880 «Аппарат для термообработки органических отходов», US 3817712 «Smoke abater») предлагается производить дожиг продуктов горения в установках циклонного типа, которые позволяют интенсифицировать химические реакции в продуктах горения. Установки отличаются сложностью и необходимостью подвода дополнительной энергии.

На действующих и закрытых полигонах ТКО имеется энергетический ресурс, позволяющий осуществлять дожиг отходящих газов – свалочный газ (биогаз), образующийся в результате анаэробного разложения органических отходов. Использование биогаза для дожига отходящих газов кроме улучшения экологической обстановки позволит решить вопрос его энергетического использования.

Целью работы является тепловой расчет и определение способа управления двухкамерной установкой, в первой камере которой осуществляется сжигание отходов (RDF-топлива), а второй производится дожиг продуктов горения с использованием биогаза.

1. Метод расчета

Расчетная схема материальных потоков представлена на рис. 1.

Расчет горения выполнен на 1 кг RDF топлива. Элементарный состав RDF-топлива представлен следующими составляющими:

$$A^p, W^p, C^p, H^p, O^p, N^p, S^p, \text{мас. \%}.$$

Примем, что свалочный газ подается с удельным расходом V_r , м³/кг и содержит четыре компонента:

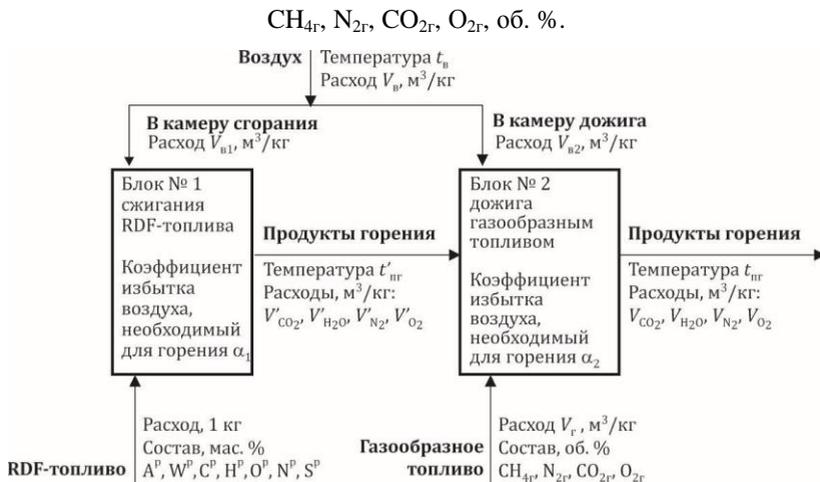


Рис. 1. Схема материальных потоков установки

Теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания RDF-топлива (V_{B1}^0) и свалочного газа (V_{B2}^0), составляет:

$$V_{B1}^0 = \frac{(2,67C^p + S^p + 8H^p - O^p)}{30}, \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{B2}^0 = 0,0476(2CH_{4г} - O_{2г})V_g, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Действительный объем воздуха, с учетом коэффициента избытка воздуха α_1 , подаваемого для сжигания RDF-топлива, и α_2 , подаваемого для сжигания свалочного газа

$$V'_{B1} = \alpha_1 V_{B1}^0; \quad V'_{B2} = \alpha_2 V_{B2}^0, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Расход воздуха, подаваемого в камеру сжигания – V_{B1} , а в камеру дожига – V_{B2} , $\text{м}^3/\text{кг}$. Общий объем воздуха V_B , подаваемый для сжигания, должен быть равен объему воздуха, необходимому для горения:

$$V_B = V'_{B1} + V'_{B2} = V_{B1} + V_{B2}.$$

Воздух может весь подаваться в первую камеру, в этом случае

$$V_{B1} = V'_{B1} + V'_{B2}; \quad V_{B2} = 0,$$

так и в обе камеры при соблюдении условия

$$V_{B1} \geq V'_{B1}; \quad V_{B2} = V_B - V_{B1}.$$

Соотношение распределения воздуха между камерами может быть выражено соотношением доли воздуха, подаваемого во вторую камеру

$$d_b = \frac{V_{B2}}{V'_{B2}}, \text{ где } 0 \leq d_b \leq 1,$$

таким образом

$$V_{B1} = V_B - d_b V'_{B2}; \quad V_{B2} = d_b V'_{B2}.$$

Объем продуктов горения, м³/кг, будет иметь вид:

а) после камеры сгорания:

$$V'_{CO_2} = 0,0187C^p + 0,007S^p;$$

$$V'_{H_2O} = 0,111H^p + 0,012W^p;$$

$$V'_{N_2} = 0,79V_{B1} + 0,008N^p;$$

$$V'_{O_2} = 0,21(V_{B1} - V_{B1}^0);$$

б) после камеры дожига:

$$V_{CO_2} = V'_{CO_2} + 0,01(CH_{4r} + CO_{2r})V_r;$$

$$V_{H_2O} = V'_{H_2O} + 0,02CH_{4r}V_r;$$

$$V_{N_2} = V'_{N_2} + 0,79V_{B2} + 0,01CO_{2r}V_r;$$

$$V_{O_2} = V'_{O_2} + 0,21V_{B2} - 0,01(2CH_{4r} - O_{2r})V_r.$$

Согласно уравнению теплового баланса теплосодержание газового потока после камеры сгорания (Q'_r) и после камеры дожига (Q_r), при допущении, что температура воздуха и топлива равна 0°С, составляет

$$Q'_r = (1 - q_5)Q_{H1}^p; \quad Q_r = (1 - q_5)(Q'_r + V_r Q_{H2}^p), \text{ кДж/кг},$$

где Q_{H1}^p и Q_{H2}^p – теплота сгорания RDF топлива (кДж/кг) и свалочного газа (кДж/м³); q_5 – коэффициент потерь теплоты, выраженный в долях.

В результате по рассчитанным объемам продуктов сгорания и их теплосодержанию могут быть определены температура газового потока после камеры сгорания $t'_{пг}$ и камеры дожига $t_{пг}$.

2. Результаты расчетов

Для расчетов были приняты следующие составы:

а) RDF-топливо (согласно «Информационно-техническому справочнику по наилучшим доступным технологиям ИТС 15-2016»):

$$C^p = 28,7\%; H^p = 3,8\%; O^p = 19,1\%; N^p = 0,7\%; S^p = 0,2\%;$$

$$A^p = 22,4\%; W^p = 25,0\%;$$

б) биогаз (свалочный газ):

$$CH_{4r} = 50\%; CO_{2r} = 25\%; N_{2r} = 25\%.$$

Расчетные характеристики горения топлива приведены в табл. 1. Максимальная температура горения (в адиабатических условиях, при $\alpha = 1$ и температурах топлива и воздуха 0°C) RDF-топлива и биогаза отличаются всего на 60°C . Но из-за более высокого значения коэффициента избытка воздуха калориметрическая и теоретическая температура горения биогаза на 200°C выше, чем у RDF-топлива.

Таблица 1

Расчетные характеристики горения топлива

Топливо	RDF-топливо	Биогаз
Теплота сгорания	$Q_{H1}^p = 10\,961 \text{ кДж/кг}$	$Q_{H2}^p = 17\,910 \text{ кДж/м}^3$
Коэффициент избытка воздуха	$\alpha_1 = 1,3$	$\alpha_2 = 1,3$
Расход воздуха на горение:		
теоретический	$V_{B1}^0 = 2,95 \text{ м}^3/\text{кг}$	$V_{B2}^0 = 4,76 \text{ м}^3/\text{м}^3$
действительный	$V'_{B1} = 3,84 \text{ м}^3/\text{кг}$	$V'_{B2} = 5,24 \text{ м}^3/\text{м}^3$
Температура горения:		
максимальная	1777°C	1836°C
калориметрическая	1508°C	1733°C
теоретическая	1493°C	1701°C

Был произведен расчет температуры газов после первой и второй камеры при разных значениях доли воздуха, подаваемого в камеру дожига и расхода газа, подаваемого для дожига (рис. 2, 3).

Температура газов после камеры дожига от распределения подачи воздуха между камерами не зависит, распределение влияет только на температуру после камеры сгорания. Таким образом управляя подачей воздуха в камеру сгорания можно обеспечить поддержание постоянной температуры газов после нее в условиях изменения характеристики RDF-топлива и режима горения.

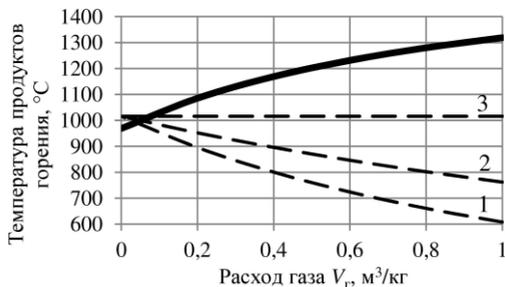


Рис. 2. Изменение температуры после камеры сгорания $t'_{пр}$ и камеры дожига $t_{иг}$ при изменении расхода биогаза, подаваемого для дожига:

— — — — $t'_{пр}$; — — — — $t_{иг}$;
доля воздуха, подаваемого в камеру дожига, d_b : 1 – 0; 2 – 0,5; 3 – 1

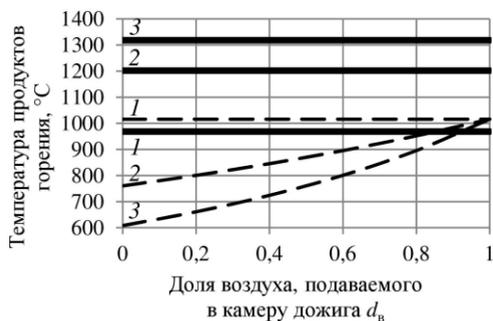


Рис. 3. Изменение температуры после камеры сгорания $t'_{пр}$ и камеры дожига $t_{иг}$ при изменении соотношения воздуха, подаваемого в камеры:

— — — — $t'_{пр}$; — — — — $t_{иг}$;
расход газа V_g : 1 – 0; 2 – 0,5; 3 – 1 м³/кг RDF

4. Использование результатов для разработки схемы автоматизации управления горением в установке (дискуссия)

Регулирование процесса горения топлива заключается в поддержании требуемых режимных параметров (температуры в топке или газоходе после котла, температуры теплоносителя после котла и т.д.) и необходимого соотношения расходов газа и воздуха (коэффициента избытка воздуха α), необходимого для полного сгорания топлива при условии минимального избытка воздуха, величина которого влияет на потери и тепловой КПД агрегата.

В настоящее время для регулирования соотношения расходов газа и воздуха используют два способа:

1. При изменении расхода топлива поддержание заданного соотношения давлений газообразного топлива и воздуха [12]. Данный способ основан на том, что давление газов пропорционально их расходу, он может быть использован при постоянном составе топлива, когда теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания топлива, не изменяется.

2. Регулирование расхода по концентрации кислорода O_2 и (или) продуктов химического недожога CO в продуктах сгорания [13]. Этот способ может быть использован при сжигании топлива переменного состава, например при изменении состава метана в биогазе.

Дополнительно в системе автоматизации предусматривается контроль недожога (по датчику CO) и контроль наличия пламени (с использованием датчика температуры или фотоэлектрического датчика).

На основании результатов расчета предлагается следующий способ регулирования режимов процесса сжигания топлива с дожигом свалочным газом (рис. 4).

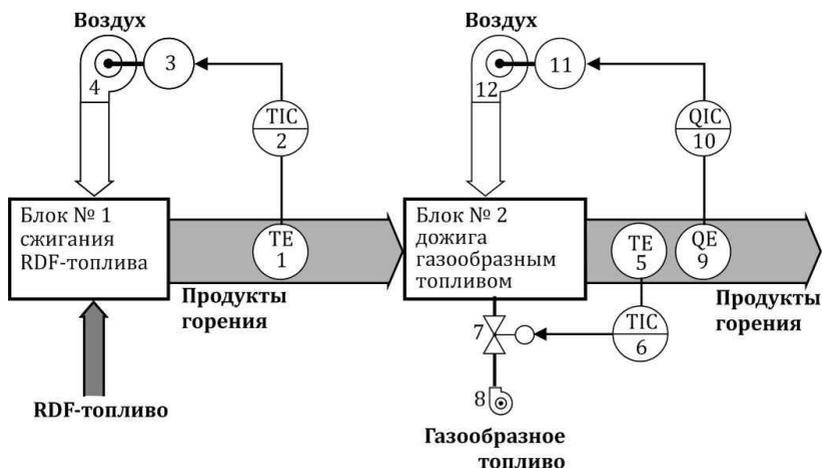


Рис. 4. Система автоматизации установки по сжиганию RDF-топлива с дожигом свалочным газом:

1, 2 – датчики температур (термопары); 2, 6, 10 – микропроцессорные регуляторы; 3, 11 – частотно-регулируемый привод; 4, 12 – дутьевой вентилятор; 7 – регулирующий клапан; 8 – газодувка; 9 – датчик содержания кислорода

Подача воздуха в первую камеру регулируется по заданной температуре газов после неё. Наличие недожога при этом может не контролироваться, так как дожиг будет осуществлен во второй камере.

В камере дожига устанавливаются два контура регулирования – расхода газа по заданному значению температуры газов после камеры и подачи воздуха по значению содержания кислорода в отходящих газах.

Подача воздуха в обе камеры осуществляется отдельными дутьевыми вентиляторами, расход воздуха регулируется изменением частоты вращения вентиляторов или с помощью регулирующих клапанов.

Предлагаемая система автоматизации позволит осуществлять процесс сжигания RDF-топлива и утилизации биогаза (свалочного газа) при изменении их состава и свойств.

Выводы по работе

1. Предложена комплексная энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов и свалочного газа с использованием свалочного газа для дожига продуктов горения RDF-топлива, что позволит обеспечить стабильность параметров отходящих газов при изменении состава и свойств сжигаемых биотоплив.

2. Для двухкамерной установки, в первой камере которой осуществляется сжигание отходов (RFD-топлива), а второй производится дожиг продуктов горения с использованием биогаза, произведен расчет температуры газов после первой и второй камеры при разных значениях доли воздуха, подаваемого в камеру дожига и расхода газа, подаваемого для дожига. Установлено, что температура газов после установки от распределения подачи воздуха между камерами не зависит, распределение влияет только на температуру после камеры сгорания. Таким образом управляя подачей воздуха в камеру сгорания можно обеспечить поддержание постоянной температуры газов после нее в условиях изменения характеристик RDF-топлива и режима горения.

3. Предложен способ регулирования режима процесса сжигания RDF-топлива с дожигом свалочным газом, в котором подача воздуха в первую камеру регулируется по заданной температуре газов после неё, а в камере дожига устанавливаются два контура регулирования – расхода газа по заданному значению температуры газов после камеры и подачи воздуха по значению содержания кислорода в отходящих газах. Предлагаемый способ регулирования позволит осуществлять процесс сжигания биотоплив при изменении их состава и свойств.

Библиографический список

1. **Левин Б. И.** Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
2. **Порожнюк Л.А., Василенко Т.А., Порожнюк Е.В.** Роль экологического аудита в обращении с отходами в Белгородской области // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 177-180.
3. **Тугов А.Н.** Перспективы использования твердых бытовых отходов в качестве вторичных энергетических ресурсов в России // Теплоэнергетика, 2013. № 9. С. 56–61
4. **Балахчина Т.К.** Оценка воздействия свалочного газа с полигонов твердых бытовых отходов на человека // Физиология. Медицина. Экология человека. 2012. № 2. С. 41–57.
5. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2015. 151 p.
6. **Тугов А.Н.** Исследование процессов и технологий энергетической утилизации бытовых отходов для разработки отечественной ТЭС на ТБО. Дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВТИ, 2012. 349 с.
7. Effects of fuel properties on biomass combustion, part I: Experiments – fuel type, equivalence ratio and particle size / C. Ryu, Y.B. Yang, A. Khor and etc // Fuel. 2006. No 85. P. 1039–1046.
8. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies / A.A.Khan, W.de Jong, P.J.Jansens, H.Splithoff // Fuel Processing Technology. 2009. Vol. 90, Is. 1. P. 21-50.
9. Waste to energy conversion technology; Ed. by N.B. Klinghoffer and M.J. Castaldi. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. 234 p.
10. **Leckner В.** Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units // Waste Management. 2015. No 37. P. 13-25.
11. Суслов Д.Ю., Рамазанов Р.С., Лобанов И.В. Исследование распределения газозоудшной смеси в корпусе инжекционной горелки с тепловым рассекателем // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 10. С. 60-66.
12. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции / А.А. Калмаков, Ю.Я. Кувшинов, С.С. Романова, С.А. Щелкунов; Под ред. В.Н.Богословского. М.: Стройиздат, 1986. 479 с.
13. Зуев К. И. Автоматизация и управление системами теплогазоснабжения и вентиляции. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. 171 с.

УДК 662.767.2

МОНИТОРИНГ ВЫХОДА БИОГАЗА С ТЕЛА ПОЛИГОНА ТКО*

Д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**¹

Студент **Клепиков А.С.**¹

Нач. отдела **Вережкин О.В.**²

Ст. преп. **Гришко Б.М.**¹

Канд. техн. наук **Суслов Д.Ю.**¹

Инж. **Рамазанов Р.С.**¹

¹ *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

² *Транспортная компания «Экотранс», г. Белгород*

Аннотация. Целью работы являлось исследование выхода свалочного газа полигона ТКО г. Белгорода для определения возможности его энергетического использования. Проводился анализ газа, выходящего естественным путем из перфорированных труб, опущенных в скважины глубиной 12 м. Произведен анализ состава газа при его естественном выходе с тела полигона в 572 скважинах с определением содержания метана, кислорода и сероводорода. В результате мониторинга подтвержден неравномерный характер газообразования. Ежедневный мониторинг выхода биогаза из пяти скважин показал стабильность его состава. Состав биогаза при его естественном выходе характеризуется заметно меньшим содержанием метана, чем при откачке свалочного газа в герметизированной газосборной системе. Для повышения достоверности данных предлагается использовать при расчете среднего состава биогаза результаты замеров, в которых содержание кислорода менее 5%.

Ключевые слова: биогаз, свалочный газ, полигон ТКО, мониторинг.

Полигоны, на которых в России размещаются около 95% всех твердых коммунальных (бытовых) отходов (ТКО, ТБО), являются источниками загрязнения не только почвы и поверхностных вод, но и воздушного бассейна [1]. В теле полигона в анаэробных условиях в результате жизнедеятельности метаногенных бактерий образуется свалочный газ (биогаз), состоящий из метана, углекислого газа и азота [2]. По данным работы [1] вклад углекислого газа в парниковый эффект – 7,2°C, метана – 0,8°C. Вклад полигонов ТКО в общую эмиссию метана – около 10% (рис. 1).

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



Рис. 1. Источники метана в мире [1]

Эффективность использования энергетического потенциала полигона ТКО во многом определяется достоверными оценками эмиссии свалочного газа [3], в частности, данными о содержании метана. В работе [4] произведен мониторинг выхода метана на полигоне ТКО г. Челябинска в 55 точках. Точки измерения располагались по нескольким линиям, расстояния между точками на которых составляло около 15 м., расстояние между соседними линиями – 30...50 м. Установлена неоднородность распределения концентрации метана в грунтовом газе тела полигона, содержание метана изменяется в пределах от 0 до 60%. Биогазогенерация активно протекает на глубине более 2 м и далее на всей глубине обследования насыпной толщи.

В работе [5] произведен мониторинг выхода биогаза на трех полигонах Северо-Западного Федерального округа. Измерения были проведены в 163 точках, удаленность соседних точек составляла не более 50 м. Выявлена зональность выхода биогаза и наличие участков, как с высоким, так и с низким содержанием метана.

В работе [6] показано, что результаты замеров состава биогаза, выделяющегося на полигоне, расположенном в Великобритании, в точках, отстоящих друг от друга на расстоянии 1,6...6,700 км, практически идентичны и составляют CH_4 – 48,9...50,8%; CO_2 – 34,3...37%, O_2 – 0...1,5%. В работе [7] установлена связи эмиссии метана с видом почв, временем суток и сезоном.

В работе [8] приведены данные измерения выхода метана на поверхности полигона г. Палермо (Италия), замеры производились в равномерно расположенных 80 точках, расстояние между которыми в среднем составляло 30...40 м. Были выявлены три зоны выделения метана, занимающие около трети площади полигона, в остальной части полигона выделение метана было низкое или отсутствовало. Аналогичный подход с расстоянием между точками замеров 30...60 м использован в работе для оценки выхода метана с полигонов США [9].

В работе [10] предлагается модель выделения метана с тела полигона, которая основан на данных замеров в отдельных точках. В статье [11] приведена модель, построенная по данным замеров в восьми точках, расположенных на расстоянии 150...600 м друг от друга. В результате выявлены три зоны с интенсивным выделением метана, 11 зон с умеренным, а около половины площади полигона характеризовалось отсутствием выделения метана.

Цель работы: исследование выхода свалочного газа полигона ТКО г. Белгорода для определения возможности его энергетического использования. В отличие от известных работ, исследование проводилось с расстоянием между точками отбора 4 м, проводился анализ газа, выходящего естественным путем из перфорированных труб, опущенных в скважины с глубиной 12 м.

Методы исследования

Исследование проводилось на участке «Северный» полигона твердых коммунальных отходов (ТКО), расположенного по адресу: Белгородская обл., Белгородский р-н, с. Стрелецкое, ул. Зареченская (рис. 2). Полигон содержит участок, выведенный из эксплуатации площадью 152 тыс. м² и действующие участки общей площадью 142,308 м². Он обслуживает город Белгорода и три муниципальных района (Белгородский, Борисовский и Грайворонский), общее количество жителей которых – 554 тысячи человек. На полигоне расположены мусоросортировочный комплекс мощностью 100 тыс. тонн в год и производственные линии по выпуску пластиковых изделий и древесных брикетов из вторичного сырья. Вывод из эксплуатации полигона запланирован на 2025–2028 годы [12].

В течении 2017 – 2019 годов на полигоне были сооружены и сооружаются системы газосбора свалочного газа (табл. 1).

Мониторинг состава биогаза проводился 25.06.2019 – 03.07.2019 г. в процессе сооружения системы дегазации на поле «Нижнее» (рис. 3). Использовался переносной газоанализатор ФАРМЭК ФП34 (производство Беларусь) с датчиками CH₄ (0–100%), CO₂ (0–2.5%), O₂ (0–30%), H₂S (0–100 мг/м³). В теле полигона были выполнены 572 скважины (рис. 4) глубиной 10...12 м, в которые были опущены перфорированные пластиковые трубы диаметром 50 мм, изготовленные из вторсырья.

Так как биогаз образуется в анаэробных условиях, кислород в его составе попадает с присосами воздуха в неплотностях газосборной системы и через тело полигона (рис. 5). Поэтому содержание метана в биогазе было пересчитано на условия отсутствия присосов (рис. 6).



Рис. 2. Схема полигона ТКО:

1 – участок «Северный», выведенный из эксплуатации в 2015 г.;
 2 – действующий участок полигона; 3 – участок, выведенный из эксплуатации более 10 лет; 4 – мусоросортировочный комплекс и производственный участок по переработке вторичного сырья; 5, 6, 7, 8, 9 – системы газосбора

Таблица 1

Характеристики систем газосбора

Наименование, позиция по рис. 2	Количество скважин	Площадь системы газосбора, м ²	Средний выход биогаза, м ³ /ч	Период эксплуатации	Использование биогаза
Экспериментальная линия (поз. 5)	3	–	6*	июнь – декабрь 2017 г.	Не используется
Поле «Сборная 5 линий» (поз. 6)	44	704	80*	с сентября 2017 г.	Отопление
Поле «Юг» (поз. 7)	52	1 000	60...70*	с августа 2018 г.	Печь для сушки древесины, сжигание на факеле
Поле «Нижнее» (поз. 8)	572	10 296	1 000**	В процессе сооружения	Отопление, производство электроэнергии, сжигание на факеле
Поле «Юг-2» (поз. 9)	112	2 000	170**		
Всего	783	14 000	1320	–	–

* – по данным измерений; ** – проектное



Рис. 3. Газосборные скважины

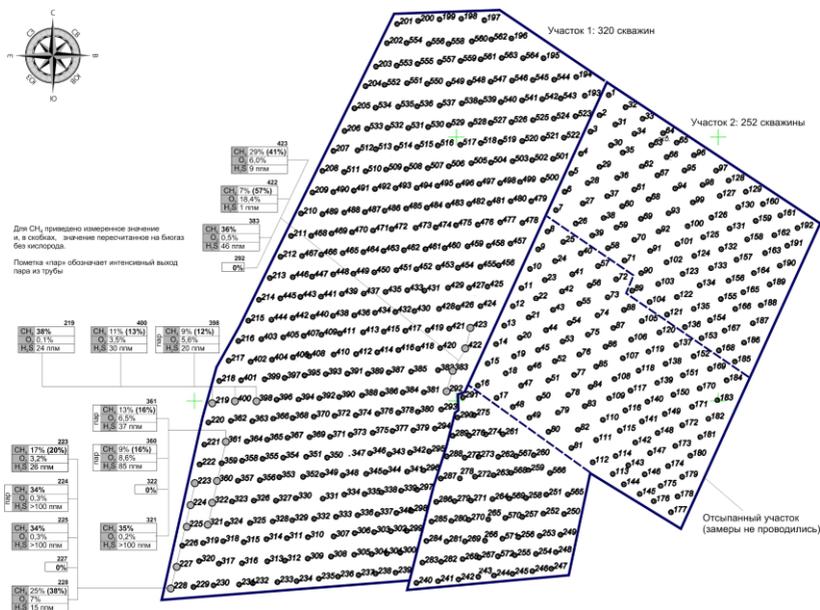


Рис. 4. План расположения скважин согласно геодезическим измерениям и выборочный мониторинг естественного выхода биогаза (29.03.2019 г.)

МАКЕТ ДЛЯ ПРАВКИ! Номера страниц меняться не будут.

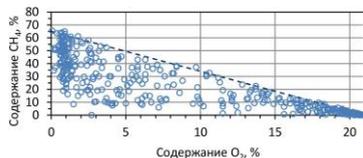


Рис. 5. Зависимость между содержанием кислорода и метана

Содержание CH_4 , % (пересчитанное на биогаз без кислорода)

Участок 1									
36,4	39,4	37,4	32,8	35,0					
11,3	12,6	35,0	26,3	0,0	37,3	14,8			
35,0	36,4	16,3	0,0	0,0	48,5	28,0	10,5	20,7	
27,7	36,7	38,7	24,5	0,0	30,0	0,0	31,5	37,7	35,4
47,3	38,4	53,8	14,9	0,0	6,3	0,0	12,2	0,0	30,3
49,0	55,4	36,8	21,0	14,7	42,0	17,2	30,3	4,8	0,0
4,0	44,9	36,8	49,5	54,6	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0
52,7	67,8	55,9	58,2	48,7	44,5	43,0	42,0	37,8	37,4
65,8	62,6	0,0	59,0	50,6	56,1	47,0	32,3	51,9	21,0
48,5	15,8	57,8	50,4	53,0	9,2	0,0	49,0	53,3	0,0
53,3	6,3	21,0	39,3	61,3	53,6	59,5	46,0	31,5	68,6
63,0	42,0	51,9	37,3	58,6	56,9	0,0	6,3	0,0	34,2
66,9	63,5	48,3	55,2	59,6	54,6	42,0	0,0	21,0	49,8
49,7	46,7	42,0	59,4	58,3	51,1	57,1	47,8	37,3	63,0
48,3	43,5	39,5	41,0	53,2	62,6	57,8	48,1	0,0	0,0
48,3	37,0	31,5	48,5	48,5	51,1	57,5	51,7	62,2	55,3
55,1	26,7	30,9	46,2	46,5	30,8	52,3	63,5	54,9	66,2
65,8	25,2	11,4	9,4	39,6	33,2	63,0	58,4	0,0	52,5
64,7	30,4	11,4	18,4	14,7	46,3	30,3	19,8	40,7	36,8
55,3	10,5	14,8	14,0	15,9	19,6	43,4	21,0	16,4	53,6
47,0	25,6	26,6	5,3	36,7	24,9	16,1	63,0	0,0	21,8
48,7	39,9	22,3	42,1	42,0	49,0	0,0	21,7	0,0	52,5
51,3	38,7	43,9	31,9	34,3	29,1	29,8	19,7	33,2	51,0
51,6	41,0	41,5	61,0	30,1	0,0	36,1	46,2	26,6	24,8
51,3	19,9	23,6	15,0	19,6	32,0	11,8	39,2	42,0	19,6
4,9	44,6	21,7	49,0	12,6	11,1	11,5	25,2	39,4	0,0
56,1	37,5	33,2	12,1	19,7	17,3	0,0	9,1	13,6	25,7
51,9	32,3	23,1	16,0	29,1	16,7	2,7	0,0	12,3	11,8

Среднее значение	Участок 1	32,5 %
	Участок 2	31,0 %
	В целом по полю	32,0 %

41,1	48,6	53,6	43,0	0,0	65,0	47,7	69,1	53,8	59,1	60,5	63,1
44,0	0,0	29,5	46,2	14,0	47,6	43,2	42,0	59,4	64,0	65,3	63,7
42,9	52,5	41,3	0,0	51,8	42,0	38,6	53,2	66,1	59,7	66,2	63,7
0,0	0,0	52,2	0,0	0,0	33,4	62,1	66,5	60,4	29,4	64,4	65,7
56,5	0,0	0,0	34,4	40,6	0,0	5,3	52,9	63,4	46,0	61,4	21,0
0,0	0,0	25,9	31,5	21,0	14,0	54,0	45,3	42,0	55,0	62,7	64,9
31,5	19,1	15,9	26,7	0,0	37,2	41,2	40,3	46,5	61,6	62,5	54,6
					38,7	35,3	62,8	0,0	0,0	46,6	62,1

Участок 2

46,2											
27,0	67,2										
28,4	0,0	49,4	0,0								
40,4	0,0	0,0	37,5	5,7	59,5						
0,0	50,8	0,0	16,0	0,0	0,0						
22,1	16,1	32,3	0,0	20,5	0,0	23,4	50,7				
0,0	0,0	0,0	0,0	24,4	0,0	0,0	24,5				
0,0	42,0	0,0	14,7	0,0	29,4	37,1	0,0				
18,5	31,4	42,0	21,0	0,0	7,2	0,0	3,0				
31,9	35,0	21,0	0,0	0,0	42,0	0,0	43,9				

Рис. 6. Содержание метана, пересчитанное на биогаз без кислорода

Для контроля на пяти скважинах производился ежедневный мониторинг (рис. 7), который показал, что состав биогаза стабилен.

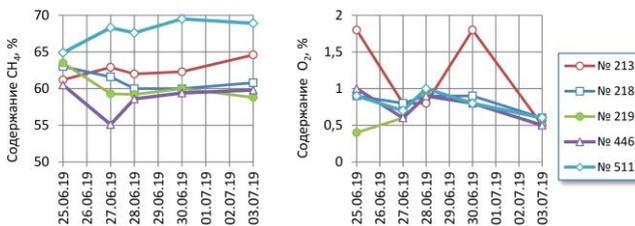


Рис. 7. Ежедневный мониторинг состава биогаза

В дальнейшем проект системы дегазации предусматривал соединение труб газосборными линиями диаметром 63 мм, присоединяемых к коллектору диаметром 160 мм, и герметизацию системы отсыпкой глины и полиэтиленовой пленкой. После сооружения системы газосбора, её герметизации и запуска газодувки для отбора газа с тела полигона, так же был произведен мониторинг состава биогаза (табл. 2).

Таблица 2

Средний состав биогаза по данным замеров

		CH ₄ , об. %	O ₂ , об. %	H ₂ S, мг/м ³	CH ₄ , об. % (пересчет)
Естественный выход со скважин	Со всего поля	18,2	11,8	26	32,0
	Участок № 1	19,1	10,9	30	32,5
	Участок № 2	16,3	13,6	17	31,0
	Участок № 2 (для скважин с O ₂ < 5%)	45,1	1,5	48	48,1
Принудительная откачка из системы газосбора		45,1	4,3	56	57,1

Анализ данных замеров

Как видно из среднего состава биогаза, полученного при мониторинге (табл. 2), содержание метана, измеренного в биогазе при его свободном выходе, заметно ниже, чем при откачке из газосборной системы. Это можно объяснить тем, что в верхней части тела полигона (на глубине до 2 м) имеется большое количество кислорода, которое создает поверхностный биофильтр, где происходит частичное окисление метана до диоксида углерода [3]. Поэтому отбор проб необходимо производить с глубины более 2 м.

При использовании в расчете среднего значения данных, в которых содержание кислорода было менее 5%, данные среднего состава биогаза при естественном выходе из труб и биогаза, откачиваемого в газосборной системе, стали близки (табл. 2).

Выводы по работе

1. В результате мониторинга естественного выхода свалочного газа с тела полигона ТКО с расстоянием между точками отбора 4 метра подтвержден неравномерный характер газообразования. Содержание метана в двух соседних скважинах может изменяться от полного отсутствия до 50...60 об. %. Ежедневный мониторинг выхода биогаза из пяти скважин показал стабильность его состава.

2. Состав биогаза при его естественном выходе характеризуется меньшим содержанием метана, чем при откачке свалочного газа в гер-

метизированной газосборной системе. Для повышения достоверности данных предлагается использовать при расчете среднего состава биогаза результаты замеров, в которых содержание кислорода менее 5%.

Библиографический список

1. Оценка качества техногенно-нарушенных земель территории полигона ТБО г. Белгорода / Е.А. Пендюрин, Л.М. Смоленская, И.В. Старостина, С.Ю. Рыбина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 173-176.

2. **Бажин Н.М.** Метан в окружающей среде (Сер. Экология. Вып. 93). Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2010. 56 с.

3. Аудит для «углеродных» инвестиций в энергетическое использование полигонов твердых бытовых отходов / М.П. Федоров, В.В. Кораблев, В.И. Масликов, Е.О. Иокша. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 44 с.

4. **Балакин В.А., Труфманова Е.П., Старых Ю.Ю.** Газогеохимические исследования для целей рекультивации полигонов // Твердые бытовые отходы. 2017. № 5. С. 22-25.

5. Оценка зонального распределения метана на полигонах ТБО северных регионов для его использования местной энергетикой / А.Н. Чусов, В.И. Масликов, Д.В. Молодцов и др. // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 6. С. 44-55.

6. Measuring methane emissions from a UK landfill using the tracer dispersion method and the influence of operational and environmental factors / T.C. Rees-White, J. Mønster, R.P. Beaven, C. Scheutz // Waste Management. 2018. Vol. 87. P. 870-882.

7. **Zhang H., He P., Shao L.** Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation // Atmospheric Environment. 2008. Vol.42, Issue 22. P. 5579-5588.

8. **Bella G.D., Trapani D.D., Viviani G.** Evaluation of methane emissions from Palermo municipal landfill: Comparison between field measurements and models // Waste Management. 2011. Vol. 31, Issue 8. P. 1820-1826.

9. **Mackie K.R., Cooper C.D.** Landfill gas emission prediction using Voronoi diagrams and importance sampling // Environmental Modelling & Software. 2009. Vol. 24, Issue 10. P. 1223-1232.

10. Estimation of landfill methane emissions using stochastic search methods / T. Kormi, N.B.H. Ali, T. Abichou, R. Green // Atmospheric Pollution Research. 2017. Vol. 8, Issue 4. P. 597-605.

11. Estimation of fugitive landfill methane emissions using surface emission monitoring and Genetic Algorithms optimization / T. Kormi, S. Mhadhebi, N.B.H. Ali and other // Waste Management. 2018. Vol. 72. P. 313-328.

12. **Порожнюк Л.А., Василенко Т.А., Порожнюк Е.В.** Роль экологического аудита в обращении с отходами в Белгородской области // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 177-180.

5. ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.515.1

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Канд. техн. наук, доц. **Блинов В.Л.**

Студент **Зубков И.С.**

Студент **Бегетнев П.С.**

*Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

***Аннотация.** В настоящем исследовании представлено описание процесса оптимизации центробежного нагнетателя природного газа. Разработан алгоритм оптимизации и параметрическое описание лопаточного аппарата элементов нагнетателя. Описана постановка оптимизационной задачи. В качестве результатов представлены характеристики оптимизированного лопаточного аппарата и его геометрическая форма в сравнении с исходным вариантом. Отмечены направления дальнейших исследований в зависимости от полученных результатов.*

***Ключевые слова:** центробежный нагнетатель, многокритериальная оптимизация, численное моделирование, лопаточный аппарат, вычислительная газовая динамика.*

Наиболее распространенными энергетическими машинами в газотранспортной отрасли являются центробежные нагнетатели (ЦБН) в составе газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Их основной задачей является сжатие и подача природного газа в магистральные газопроводы. По данным ПАО «Газпром» на компрессорных цехах компании эксплуатируется 3812 ГПА с ЦБН общей мощностью 47,1 тыс. МВт [1].

Актуальность данного исследования заключается в необходимости модернизации морально и физически устаревших ЦБН, большинство из которых были произведены более 40 лет назад. За это время объемы транспортируемого газа значительно возросли, обусловив появление новых режимов работы, на которые старые машины не были рассчитаны [2, 3].

Цель работы заключается в проведении газодинамических и прочностных расчетов основных рабочих частей ЦБН согласно разработанному алгоритму многокритериальной оптимизации, с последующим анализом результатов и разработкой направлений дальнейших исследований.

Задачи многокритериальной оптимизации

На сегодняшний день применяются классические методики проектирования ЦБН, основанные на одномерной теории течения потока газа в протонной части [4], поэтому лопатки рабочих колес имеют только цилиндрическую форму. Однако в реальных процессах течения поток имеет пространственную конфигурацию, что обусловлено неравномерностью потока по высоте лопаток [5, 6]. Исходя из этого, можно сделать вывод о возможности и даже необходимости применения пространственных лопаток для повышения эффективности работы нагнетателя.

В качестве исходных данных имеются эксплуатационные параметры работы нагнетателя и его конструкция (чертежная документация). На основе геометрических данных производится математическое описание геометрии лопаток рабочего колеса (РК) и лопаточного диффузора (ЛД) с заданием переменных оптимизации – параметров, изменяющихся в зависимости от результатов, полученных в ходе расчетов. На следующем этапе формируется конечно-элементная модель с граничными условиями и накладываются ограничения оптимизации, сужающие диапазон поиска оптимальных результатов. После чего проводятся газодинамические и прочностные расчеты. Результаты из модуля-расчетчика направляются в модуль-оптимизатор, где проводится их анализ и изменение переменных оптимизации. Здесь же задаются параметры, называемые критериями оптимизации, например, повышение КПД. После чего проводится построение новой геометрии лопаточного аппарата и цикл повторяется до тех пор, пока не будет найден наиболее удовлетворительный по заданным критериям вариант. Проверка применимости геометрии лопаточных аппаратов осуществляется не только по газодинамическим параметрам, но и по параметрам прочности. Алгоритм, учитывающий прочностные расчеты приведен на рис. 1.

Параметрическое описание лопаток осуществляется при помощи четырех элементов – входных и выходных кромок, средней линии профиля и закона распределения толщины профиля вдоль средней линии. Основу профиля составляет средняя линия, описываемая при помощи кривой Безье третьего порядка (1):

$$\begin{cases} x_i = (1-t)^3 X_1 + 3t(1-t)^2 X_2 + 3t^2(1-t) X_3 + t^3 X_4 \\ y_i = (1-t)^3 Y_1 + 3t(1-t)^2 Y_2 + 3t^2(1-t) Y_3 + t^3 Y_4 \end{cases} \quad (1)$$

где $0 \leq t \leq 1$ – изменяемый параметр с шагом 0,01, определяющий местоположение точки на кривой. Такое описание позволяет рассчитать 100 точек на средней линии профиля и получить лопатки S-образной формы, широко применяемые при проектировании ЦБН.

Закон распределения толщины профиля определяется кривой Бэзье второго порядка, ординаты крайних точек которой равняются радиусам входной и выходной кромок профиля. Абсциссы опорных точек принимаются равными 0 и 1: 0 соответствует входной кромке профиля, а 1 – выходной. Важно отметить, что максимальная толщина и ее положение вдоль профиля прямо пропорциональны координатам управляющей точки: ее положение вдоль оси абсцисс определяет положение максимальной толщины профиля, а вдоль оси ординат – максимальную толщину. Геометрия лопаток лопаточного диффузора строится таким же образом, а сплиттерных лопаток – при помощи подрезки полученного профиля основных лопаток на определенном радиусе и их поворота на угол, соответствующий требуемому положению сплиттерной лопатки в канале. Разработанная топология представлена на рис. 1.

Изменение параметров такой математической модели позволяет получить оптимальную форму лопаточного аппарата, которая будет удовлетворять заданным требованиям, при минимальном количестве переменных оптимизации, что, в свою очередь, обеспечивает сокращение времени и упрощение процесса оптимизации. При этом имеется возможность построения лопаток по любому заданному числу сечений, однако достаточно использовать 2-3 сечения. В таком случае будут достигнуты благоприятные результаты оптимизации при снижении времени решения задачи и при удовлетворительной ее сходимости.

Описание расчетных моделей

В качестве объекта исследования был выбран центробежный нагнетатель типа Н-370-18-1 (ЗАО «НЗЛ»), приводимый во вращение газотурбинной установкой мощностью 10 МВт. Основными параметрами работы при $t_a = +15^\circ\text{C}$ являются частота вращения $n = 4800$ об/мин, степень сжатия $\pi = 1,23$. Основными анализируемыми элементами являются рабочее колесо с 24 лопатками, 12 из которых сплиттерные, и лопаточный диффузор с 18 лопатками.

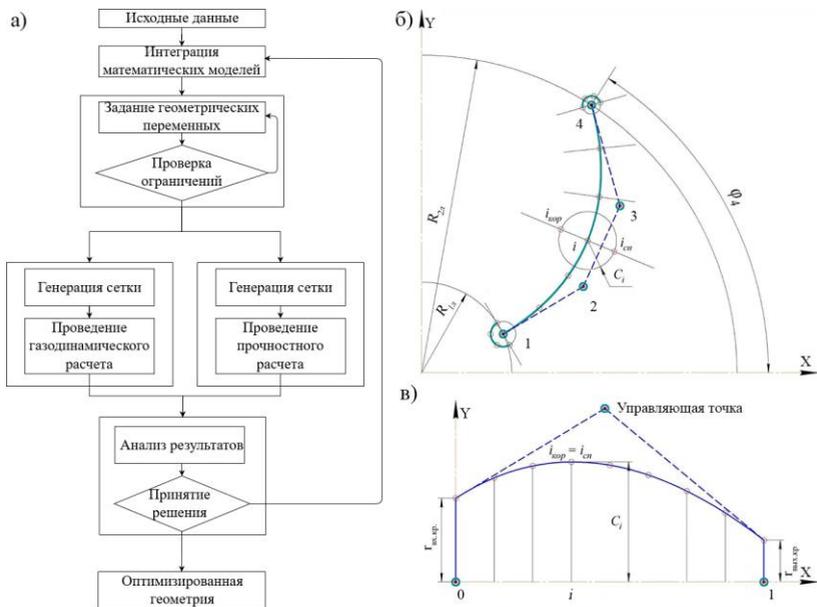


Рис. 1. Оптимизация лопаточного аппарата:

а – алгоритм оптимизации;

б – топология лопаток; в – закон изменения толщины профиля

Сеточная модель для газодинамического расчета (рис. 2) строилась на основании параметра $y^+ = 150$. Число ячеек расчетной области для РК и ЛД составило по 500 тыс. элементов на каждый из доменов.

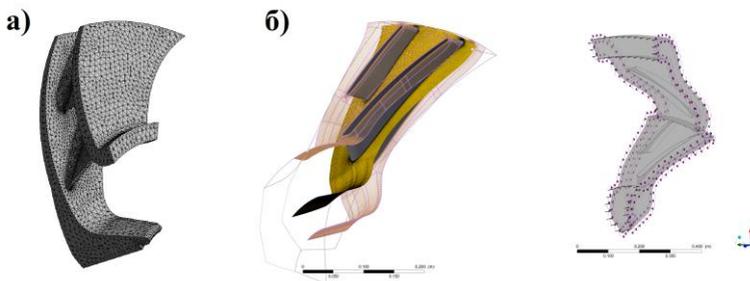


Рис. 2. Расчетная модель:

а – сетка для прочностных расчетов;

б – сетка и расчетный домен для газодинамических расчетов

Модель турбулентности – k -Epsilon, была выбрана на основе параметра y^+ и опытных данных, поскольку обеспечивает приемлемую точность решения и достаточно быструю его сходимость [7, 8, 9]. На входной поверхности в домен РК задавалось полное давление и температура, интерфейс между доменами РК и ЛД – Stage (Mixing Plane), на выходной поверхности ЛД задавалось статическое давление. Задача решалась в осесимметричной постановке. Уровень сходимости решения – 10^{-5} . Значение Timescale Factor – 10. Рабочее тело – СН4 (модель Aungier Redlich Kwong с учетом критических параметров природного газа по ГОСТ 5542). Также задавалось значение шероховатости поверхностей – 6 мкм.

Метод построения сеточной модели для расчета прочности – автоматический, размер элементов – 5 мм с измельчением элементов сетки на галтелях до 3 мм. Задача также решалась в осесимметричной постановке. На внутренней расточке РК задавалось условие Fixed Support. Для решения задачи была принята номинальная частота вращения $n = 4800$ об/мин. Материал рабочего колеса – сталь 14X2ГМР с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 1150$ МПа и пределом прочности $\sigma_b = 1300$ МПа.

Поскольку процесс оптимизации заключается в многократном обращении к расчетной модели для экономии вычислительных ресурсов и сокращения времени процесса, был принят ряд допущений. Например, не были построены входное устройство и сборная камера, не были учтены различного рода утечки рабочего тела и перетечки через радиальные зазоры, прочностной анализ проводился только для рабочего колеса и другие. Такие допущения однозначно влияют на получаемый результат, однако на данном этапе более важную роль играет скорость проведения процесса оптимизации, поскольку наиболее подходящие по критериям оптимизированные варианты будут рассчитаны с применением более точных расчетных моделей.

Сам процесс оптимизации заключался в совместном изменении лопаток РК и ЛД. В качестве критериев оптимизации были заданы максимизация политропного КПД нагнетателя и минимизация полной температуры на выходе из ступени. Были приняты ограничения по степени сжатия, объемному расходу и по потребляемой мощности. Также ограничивались числа Маха и максимальные напряжения, возникающие в материале РК при работе, согласно (1):

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{0,2}}{1,5} \quad (1)$$

Результаты оптимизации

В результате оптимизационных расчетов было рассмотрено 558 различных вариантов геометрии лопаточных аппаратов, среди которых 380 удовлетворяли всем ограничениям. Сравнение полученных результатов осуществлялось с результатами расчета исходной геометрии (рис. 3). Расчетная модель исходной геометрии была верифицирована по данным испытаний выбранного ЦБН, описанным в работе [10]. При этом полученная оптимизированная геометрия лопаток (рис. 4) показала повышение политропного КПД в сравнении с исходным вариантом во всем диапазоне расходов газа (на 7,6% (абсолютных) на номинальном режиме работы).

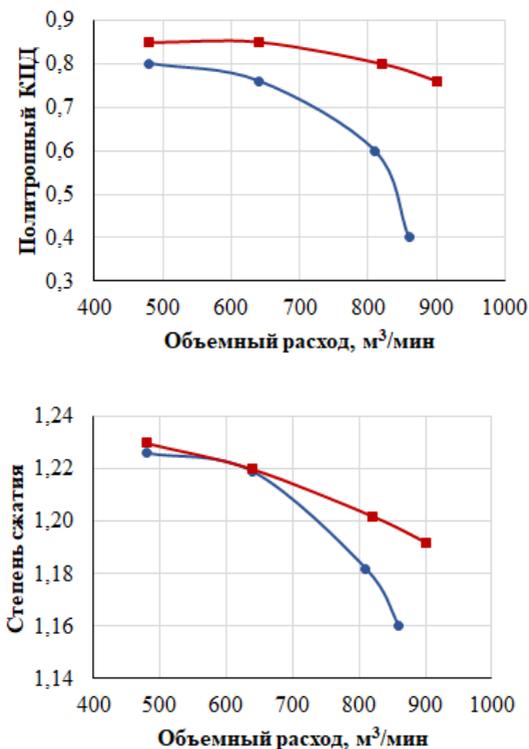


Рис. 3. Сравнение характеристик исходного и оптимизированного ЦБН

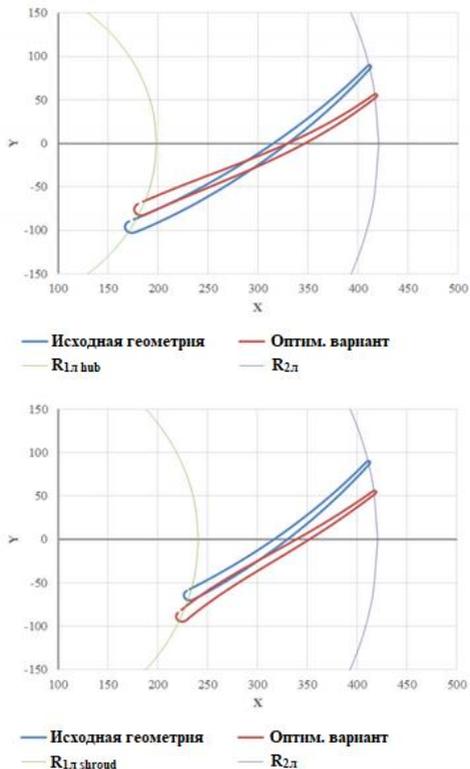


Рис. 4. Сравнение геометрии исходного и оптимизированного вариантов на примере двух сечений рабочего колеса

Степень сжатия оптимизированного варианта приняла равное исходному значению в точке номинального режима, а во всех остальных была выше исходных значений. Полученная геометрия также удовлетворяла критериям прочности – в материале не возникало напряжений, превышающих допустимые.

Выводы по работе

В рамках текущей работы была проведена оптимизация геометрии лопаточных аппаратов РК и ЛД реальной модели ЦБН. С этой целью был разработан алгоритм оптимизации, включающий в себя помимо газодинамического расчета еще и прочностной анализ. Также было произведено математическое описание лопаток.

В результате оптимизации было получено значительное улучшение основных параметров ступени – повышение политропного КПД и степени сжатия по сравнению с исходной геометрией. При проверке на прочность оптимизированная конструкция также показала благоприятный результат – в заданном режиме работы не возникало напряжений, превышающих принятые допускаемые. Высокие характеристики полученного варианта геометрии обеспечиваются хорошей согласованностью работы элементов ступени, а также благодаря учету пространственности течения потока газа.

В качестве дальнейших исследований предполагается осуществить доводку полученного оптимизированного результата, например, за счет введения и изменения других переменных оптимизации с целью дальнейшего улучшения характеристик работы нагнетателя.

Библиографический список

1. Справочник «Газпром в цифрах 2014-2018» [Электронный ресурс]. М.: ПАО «Газпром», 2019. 94 с. URL: <https://www.gazprom.ru/f/posts/72/692465/gazprom-in-figures-2014-2018-ru.pdf>.
2. **Ревзин Б.С., Тарасов А.В.** Особенности конструкции одно- и двухступенчатых нагнетателей природного газа: учеб. пособие Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. 102 с.
3. **Завальный П.Н., Ревзин Б.С., Тарасов А.В.** Оценка эффективности эксплуатации центробежных нагнетателей ГПА и обоснование целесообразности их модернизации // Транспорт и подземное хранение газа: Научно-техн. сборник. М., 1997. № 1. С. 5-8.
4. **Кампти Н.** Аэродинамика компрессоров: Пер. с англ. М.: Мир, 2000. 688 с.
5. **Галеркин Ю.Б., Козаченко Л.И.** Турбокомпрессоры: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2008. 374 с.
6. **Fowler H.S.** The distribution and stability of flow in a rotating channel // Trans. ASME Journal of Engineering for Power. 1968. № 90. P. 229-236.
7. **Lauder В.Е., Spalding D.B.** Lectures in Mathematical of Turbulence. London: Academic Press, 1972. 169 p.
8. **Коркодинов Я.А.** Обзор семейства k-ε моделей для моделирования турбулентности // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2013. № 2. С. 5-15.
9. **Янышев Д.С., Быков Л.В., Молчанов А.М.** Сеточные модели для решения инженерных теплофизических задач в среде ANSYS: учеб. пособие. М.: ЛЕНАНД, 2018. 264 с.
10. Parametrical diagnostics of gas turbine performance on side at gas pumping plants based on standard measurements / O. V. Komarov, V. A. Sedunin, V. L. Blinov, A.V. Skorokhodov // Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition (GT 2014). Dusseldorf, 2014. Vol. 3B, GT2014-25392. P. 1-8.

УДК 620.9

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

Канд. техн. наук, доц. **Блинов В.Л.**

Канд. техн. наук, доц. **Комаров О.В.**

Магистрант **Заславский Е.А.**

*Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

***Аннотация.** В данной работе представлена методика определения эффективной мощности и технического состояния газотурбинного газоперекачивающего агрегата по штатно-измеряемым параметрам. Представлены некоторые результаты испытаний газотурбинной установки на объекте эксплуатации различными методами, а так же их анализ с использованием различных методов. Проведено построение численной модели турбины и численное исследование течения. Определены уточняющие зависимости изменения КПД и степени реактивности ступени осевой турбины ГТК-10-4 на переменных режимах работы для методики определения эффективной мощности и технического состояния ГТУ.*

***Ключевые слова:** газоперекачивающий агрегат, газотурбинная установка, техническое состояние, вычислительная газовая динамика.*

Целью энергосберегающей политики ПАО «Газпром» на 2011-2020 гг. является эффективное использование энергетических ресурсов. Достижение этой задачи невозможно без определения коэффициента технического состояния (КТС) газотурбинной установки (ГТУ) нахождение которого связано с эффективной мощностью и КПД ГТУ. Наиболее распространенные методы определения мощности ГТУ рассмотрены в [1].

В Уральском федеральном университете ведется исследовательский проект по определению эффективной мощности ГТУ развиваемой силовой турбиной при помощи использования штатно-измеряемых на ГТУ термодинамических параметров и газодинамических функций для определения расхода газа. Алгоритм метода включает в себя два основных этапа: разработка математической модели ГТУ по параметрам номинального режима работы, а так же проведение и обработка результатов испытаний натурной ГТУ по штатно-

измеряемым параметрам с целью определения эффективной мощности и КПД ГТУ, верификация разработанной модели.

Входными данными для математической модели на номинальном режиме работы являются: параметры ГТУ взятые по каталогу, выпущенному ВНИИГАЗом [2] (номинальная мощность N_e , температура продуктов сгорания на входе в турбину высокого давления (ТВД) T_{r1} , потери давления во входных и выходных патрубках, степень сжатия компрессора, расход топливного газа, расход циклового воздуха, расход продуктов сгорания за свободной силовой турбиной (ССТ), частоты вращения роторов, температура продуктов сгорания после ССТ) рис. 1.

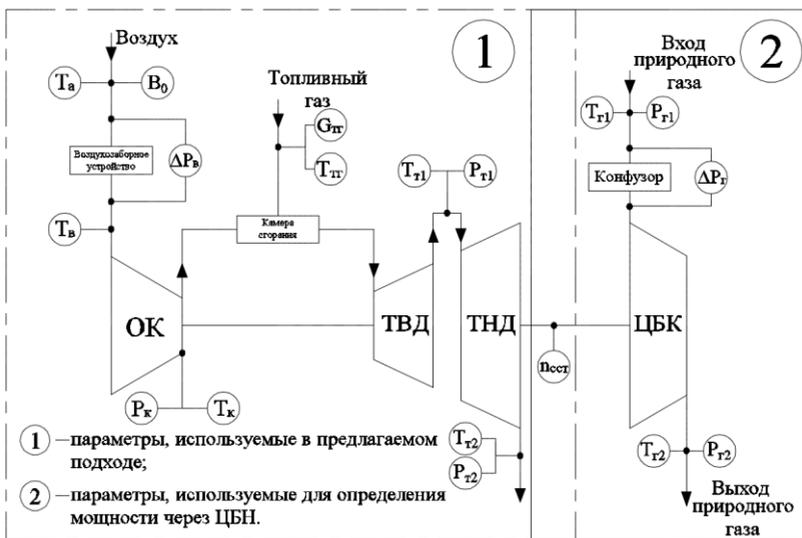


Рис. 1. Принципиальная схема измерения параметров двухвальной стационарной ГТУ

Атмосферное давление и температура окружающей среды. Переменные параметры, принимаемые на основании опыта конструирования и эксплуатации (уточняются входе расчета): КПД каждой турбины, КПД камеры сгорания, КПД осевого компрессора, а так же механический КПД. Задается коэффициент учитывающий разницу расхода продуктов сгорания турбин и циклового воздуха компрессора.

Коэффициент скорости в лопатках ротора и статора. Принимается геометрия реальной проточной части (диаметры и высоты лопаток).

На этапе расчета термодинамического цикла рассчитываются основные параметры [3]: температура и давление после компрессора, удельная работа сжатия, давление и температура на входе и выходе турбин, степень расширения продуктов сгорания в турбинах, удельная работа расширения, удельная теплоемкость рабочего тела и т.д.

Задача состоит в том, чтобы добиться приемлемой сходимости между вычисленными параметрами ГТУ на номинальном режиме с данными представленными в каталоге ВНИИГАЗ. В случае необходимости для лучшего согласования расчета можно изменять некоторые задаваемые параметры (КПД турбин, коэффициент расхода, коэффициенты скорости).

Газодинамический расчет ступени турбины осуществляется согласно разработанному алгоритму с использованием методики, изложенной в [4]. На данном этапе производится расчет полных и статических температур, давлений газа на входе и выходе из каждой ступени турбины, кинематических параметров потока из условия заданной реальной геометрии проточной части и т.д.

Исходными данными для верификации разработанной математической модели являются данные по конкретному режиму работы установки; параметры, принимаемые на этапе расчета модели двигателя на номинальном режиме; ометаемые площади на выходе из соплового аппарата турбин, углы выхода потока из соплового аппарата, степени реактивности на среднем диаметре для каждой ступени ССТ, полученные в ходе газодинамического расчета ступеней турбин на этапе разработки математической модели двигателя.

Обработка результатов теплотехнических испытаний отличается от теплового расчета модели двигателя на номинальном режиме использованием для расчета известных (замеренных при испытаниях) температур и давлений рабочего тела за осевым компрессором, за и перед ССТ, а так же пересчетом температуры газа перед ТВД.

Целью газодинамического расчета ступеней ССТ на данном режиме является определение параметров необходимых и достаточных для расчета расхода продуктов сгорания через ССТ на конкретном режиме работы ГПА (режиме испытаний).

Для определения эффективной мощности ГТУ (ГТД) $N_{e \text{ расч}}$ необходимо рассчитать расход продуктов сгорания через ССТ $G_{\text{сст}}$. Расчет расхода выполнен с использованием газодинамических функций по следующей зависимости [5]:

$$G_{\text{сст}} = F_1 \cdot \frac{P_1^*}{R \cdot T_1^*} \cdot a_{\text{кр}} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k+1}} \cdot q(\lambda), \quad (1)$$

где: k – показатель адиабаты при полной температуре газа; $P_1^* = \frac{\rho \cdot C_{1a}^2}{2 \cdot j^*(\lambda)}$ – полное давление в рассматриваемом сечении, Н/м²; $j^*(\lambda) = \frac{k}{k+1} \cdot \lambda^2 \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$ – газодинамическая функция скоростного напора; F_1 – ометаемая площадь в рассматриваемом сечении (сечение на выходе из соплового аппарата для каждой ступени ССТ), м²; $\lambda = \frac{C_{1a}}{a_{\text{кр}}}$ – приведенная скорость; C_{1a} – осевая составляющая скорости газа в рассматриваемом сечении (сечение на выходе из соплового аппарата для каждой ступени ССТ), м/с; $a_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T^*}$ – скорость газа в критическом сечении, м/с; T^* – полная температура в рассматриваемом сечении, К; R – универсальная газовая постоянная, м²/с²·К; $q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$ – газодинамическая функция приведенной плотности потока массы.

Согласно разработанной модели, на этапе обработки результатов теплотехнических испытаний, определяется удельная работа расширения, приходящаяся на ССТ. После чего рассчитывается $N_{\text{е расч}}$.

В случае если рассчитанная согласно разработанной математической модели ГТУ мощность отличается от мощности, определенной по данным эксперимента более чем на 2,5%, производится расчет поправочного коэффициента (коэффициента стеснения) для ГТУ данного типа и корректировка данных модели для перерасчета расхода через ССТ на данном режиме с целью переопределения мощности $N_{\text{е расч}}$. Необходимость ввода коэффициента связана с использованием в математической модели для расчетов ометаемой лопатками площади (для каждого венца), а не площади горла каждой решетки, что существенно упрощает создание математической модели и позволяет использовать такой подход для разных типов ГТУ. Совпадение результатов с точностью до 2,5% считается приемлемым. Исключением являются «выпавшие» (недостовверные) точки при эксперименте.

Далее производится окончательный расчет приведенных параметров ГТУ: $N_{\text{е пр}}$, $n_{\text{сст пр}}$, $G_{\text{ТГ пр}}$, $\eta_{\text{е пр}}$ для всех режимов установки и опреде-

ляются однозначные параметры ГТУ, соответствующие номинальной приведенной температуре газа за турбиной $T_{т2}^0$ пр.

В процессе проведения исследования были обработаны результаты испытаний нескольких газотурбинных газоперекачивающих агрегатов (ГГПА) ГТК-10-4 на объектах их эксплуатации. Всего для нужд газовой промышленности было выпущено более 1000 агрегатов, около 300 из которых в настоящее время эксплуатируются в ООО «Газпром трансгаз Югорск» [6]. При испытаниях на натурном объекте оценка мощности ГТУ производится по центробежному нагнетателю (ЦБН) [7], после чего сравнивается с предлагаемой в данной статье методикой (НИЛ ГПА). На рис. 2 показаны полученные результаты.

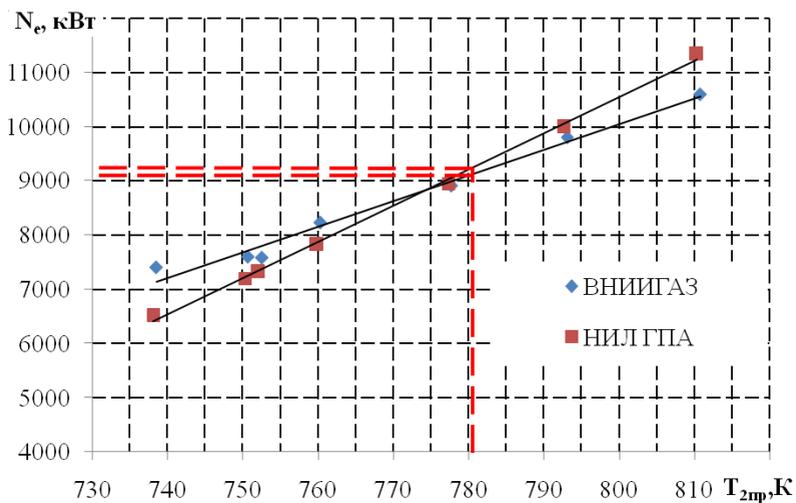


Рис. 2. Графики зависимости приведенной мощности от приведенной температуры за турбиной ГТУ ГТК-10-4

Исходя из полученных результатов отмечено, что отклонение для отдельных режимов работы ГТУ является значительным. Принимаемые величины в расчете по штатно-измеряемым параметрам оказывают влияние на точность получаемых выходных значений, особенно на переменных режимах работы ГТУ. В связи с этим, возникает необходимость в определении зависимости их изменения относительно режима работы ГТУ.

Исследование течения в проточной части турбин ГТУ ГТК-10-4 осуществлялось с помощью программного комплекса ANSYS.

На первом этапе была разработана трехмерная модель. Построение трехмерной модели осуществлялось в модуле DesignModeler, в котором формировалась проточная часть. После чего эти данные передавались в модуль TurboGrid для построения расчетной сетки. На каждый домен среднее число ячеек составило около 100 тыс. Разбиение осуществлялось на структурированную сетку. Расчет проходил в модуле CFX. Расчетная модель представлена на рис. 3. В качестве граничных условий использовалось полная температура и полное давление на входе в расчетную область и статическое давление на выходе из расчетной области. Расчет проводился в осесимметричной постановке. Задавались поверхности периодичности. На поверхностях Hub (корень) и Shroud (периферия) задавалась стенка (Wall) без учета шероховатости. Лопатки задавались типом стенка (wall). Интерфейс между доменами принят Stage. Расчет проводился в стационарной постановке. В качестве модели турбулентности использовался $k-\varepsilon$ и SST. Рабочее тело – идеальный воздух.

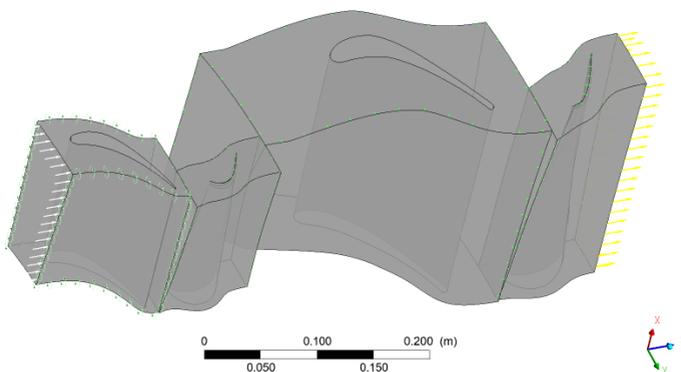


Рис. 3. Расчетная область проточной части турбин ГТУ ГТК-10-4

После обработки результатов численного моделирования были выведены зависимости изменения КПД, угла выхода потока из соплового аппарата и степени реактивности в зависимости от частоты вращения. Полученные зависимости были включены в математическую модель описанной методики, результаты представлены на рис. 4.



Рис. 4. Погрешность между приведенной мощностью и приведенной расчетной мощностью и после ввода поправочного коэффициента

После ввода поправочного коэффициента совпадение получаемых значений мощности улучшилось на 1,65%. Так же в ходе исследования было отмечено, что существенное влияние на точность определения эффективной мощности ГТУ оказывает достоверное определение расхода продуктов сгорания установки. Дальнейшее направление работы связано с исследованием точного определения расхода рабочего тела ГТУ.

Библиографический список

1. Якименко И.С., Блинов В.Л., Комаров О.В. Оценка технического состояния газотурбинных установок по мощности // Энерго и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: матер. Всерос. научно-практ. конф. студ., аспирант. и мол. уч. с между. участием. Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 316-319.
2. Альбом показателей газотурбинных ГПА. М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2006. 81 с.
3. Ревзин Б.С., Тарасов А.В., Марковский В.М. Тепловой расчет схем приводных газотурбинных установок на номинальный и переменный режим работы: учеб. пособие: Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. 61 с.
4. Тарасов А.В., Марковский В.М. Газодинамический расчет многоступенчатой газовой турбины : метод. указания по вып. курс. пр. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2004. 34 с.
5. Диментова А.А. Таблицы газодинамических функций: Справочное пособие. М.: Машиностроение, 1966. 135 с.
6. Бизнес России – главный промышленный портал [Сайт]: ООО «Издательство «Медиа-Бизнес» [2015]. URL: <https://glavportal.com> (дата обращения: 19.06.2019).
7. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов ПР 51-31323949-43-99 / В.А. Щуровский, Ю.Н. Сеницын, В.И. Корнеев. М.: ВНИИГАЗ, 1999. 26 с.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Д-р техн. наук, проф. **Ильина Т.Н.**

Канд эк. наук, проф. **Кузнецова И.А.**

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

***Аннотация.** Дана характеристика техногенных волокнистых материалов и способов их утилизации. Рассмотрена технология получения гранулированных материалов на основе целлюлозно-бумажных отходов. Показана экономическая эффективность введения в аспирационную систему технологического комплекса пневмомеханического аппарата для агломерации дисперсной смеси с использованием некондиционной продукции и связующей добавки.*

***Ключевые слова:** техногенный волокнистый материал, микрогранулирование, пневмомеханический аппарат, циклонная установка, рукавный фильтр, степень очистки.*

Актуальной задачей современного производства является комплексное использование сырьевых ресурсов, включая переработку различных отходов с получением товарной продукции различного назначения. Отходы промышленных предприятий могут быть в жидком и твердом состояниях в виде дисперсных материалов с различными физико-механическими и физико-химическими свойствами. Особую группу составляют волокнистые отходы деревообрабатывающего и целлюлозно-бумажного производства, сельского хозяйства, отходы в виде бумаги и картона и т.п. Ввиду их низкой истинной и насыпной плотности, а также их разветвленной структуры и высокой «летучести» возникают трудности их улавливания в установках аспирационных систем технологических комплексов..

Цель работы. Показать экономическую эффективность работы технологического комплекса по переработке отходов бумаги и картона с применением в аспирационной системе пневмомеханического аппарата для микрогранулирования измельченных материалов с целью повышения степени их осаждения в циклонной установке.

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

Характеристика техногенных материалов. К техногенным материалам, имеющим волокнистую структуру, относятся отходы деревообрабатывающей промышленности (в виде опилок, стружки), предприятий стройиндустрии (производство теплоизоляционных материалов, асбестоцементных изделий); перерабатывающей промышленности (текстильное производство, стекловолокно); сельскохозяйственного производства (растениеводство, агропромышленный комплекс) и т.д. Основную массу техногенных волокнистых материалов (ТВМ) – представляют целлюлозно-бумажные отходы (ЦБО). Целлюлоза самый распространенный полимер на земле, который играет важную роль в природном круговороте углерода. Однако ежегодное увеличение отходов целлюлозно-бумажной промышленности и загрязнение ими окружающей среды ставит ряд задач по утилизации ЦБО.

Одним из перспективных способов утилизации порошкообразных техногенных материалов является получение компактированной продукции методом гранулирования, экструдирования или прессования.

В настоящей работе рассмотрен технологический комплекс для производства гранулированных материалов на основе целлюлозно-бумажных отходов [1].

Анализ работы технологического комплекса. Технологический комплекс для переработки целлюлозно-бумажных отходов (ЦБО) представляет совокупность последовательно выполняемых стадий: складирование исходных ЦБО, дозирование и их транспортирование к шредеру, двухстадийное измельчение сначала в шредере, затем в роторной молотковой дробилке. Измельченные частицы размером 1..2..мм воздушным потоком поступают в циклон-разгрузитель, где происходит осаждение материала, а воздух из циклона поступает в рукавный фильтр, где происходит его очистка от пыли. Уловленный в циклоне материал подается в блок смешения материалов и далее в камеру экструдирования плоскоматричного гранулятора. Выходящие гранулы проходят сушку и классификацию от просыпи в барабанно-винтовом сушильном агрегате. Прошедшая классификацию продукция попадает в загрузочный бункер нории, а затем в бункер-запасник.

Анализ материальных потоков в технологии переработки техногенных волокнистых материалов показал, что степень улавливания тонкодисперсных легких частиц измельченного картона в циклонной установке составляет менее 70 % и большая часть материала теряется в аспирационной системе. Для уменьшения потерь материала целесообразно дополнить комплекс аппаратом для предварительного микрогранулирования. Наиболее целесообразно данный процесс осуществлять в

вихревых установках [2,3]. С этой целью разработано устройство для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов [4]. Именно волокнистая структура и повышенная объемная концентрация частиц измельченных материалов позволяет осуществлять процесс их агломерации в материально-воздушном потоке [5,6].

На базе технопарка БГТУ им. В.Г. Шухова разработан ресурсосберегающий комплекс по производству гранулированных стабилизирующих добавок для ЦМА [7]. На рис. представлен усовершенствованный комплекс, в технологическую линию которого установлен аппарат для пневмомеханической агломерации.

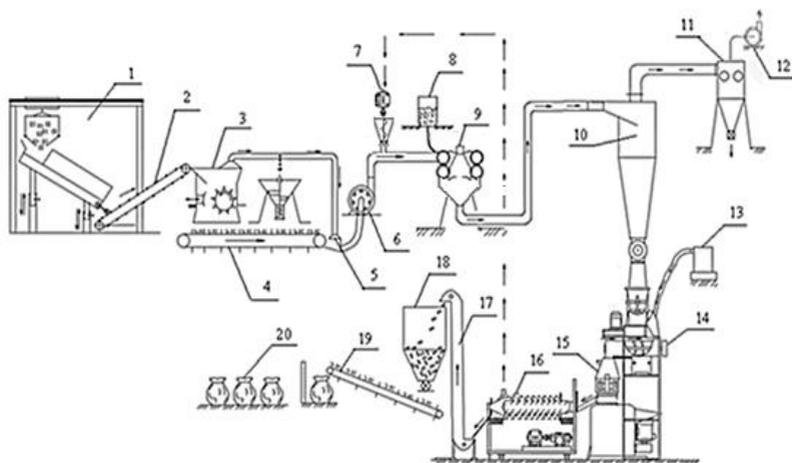


Рис. Усовершенствованный малотоннажный технологический комплекс для производства гранулированной продукции:

- 1 – устройство для подачи исходного материала (картона, бумаги); 2 – ленточный конвейер; 3 – устройство для измельчения ЦБО (первая стадия в шредере); 4 – конвейер; 5 – аспирационное укрытие; 6 – роторная дробилка; 7 – шнековый дозатор; 8 – бак со связующей добавкой; 9 – пневмомеханический аппарат для микрогранулирования; 10 – циклонная установка; 11 – рукавный фильтр; 12 – вентилятор; 13 – бак с добавками; 14 – система смесителей; 15 – плоско-матричный гранулятор; 16 – барабанно-винтовой сушильный агрегат с функцией классификатора; 17 – нория; 18 – бункер-запасник; 19 – скребковый конвейер; 20 – упаковка готовой продукции

Установка пневмомеханического аппарата перед циклоном – разгрузителем (поз. 9) способствовала увеличению размеров частиц, поступающих в циклонную установку. В пневмомеханическом аппарате под действием центробежных происходит агломерация частиц измельченного картона. В качестве связующей добавки используется раствор технической карбоксиметилцеллюлозы в количестве $1,0\pm 0,2\%$ связующего к исходному материалу. Для обеспечения центров микрогранулирования и повышения плотности компонентной смеси используется некондиционная продукция ($10\pm 5\%$ просыпи). В процессе агломерации получены микрогранулы диаметром 3–5 мм, плотностью 400 ± 30 кг/м³, что повышает эффективность их последующего осаждения в циклонной установке технологического комплекса на 20% и снижению количества пыли, поступающей в рукавный фильтр [8].

Для предотвращения пыления в технологическую линию внедрено аспирационное укрытие приемной воронки [9] (см. рис., поз. 5).

По результатам аэродинамического расчета пневмомеханического аппарата и аспирационной системы технологического комплекса с учетом концентрации и свойств дисперсных волокнистых частиц [10], показана необходимость дополнительной установки вентилятора, определены требуемые параметры и подобран вентилятор (поз. 12)

Произведен **технико-экономический расчет** усовершенствованного комплекса, который включал: определение суммы дополнительных капложений, необходимых для разработки проекта; калькулирование себестоимости гранулированных стабилизирующих добавок; определение годового экономического эффекта.

Расчет экономического эффекта был осуществлен в соответствии с «Методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). Официальное издание. – М.: Экономика, 2000 (Утверждены: Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике. № ВК 477 от 21.06.1999 г.)».

Эффективность применения технологического комплекса для получения гранулированных стабилизирующих добавок щебеночно-мастичного асфальтобетона на основе целлюлозно-бумажных отходов обусловлена снижением себестоимости продукции в результате экономии на материальных затратах, в первую очередь, за счет использования микрогранулирования в пневмомеханическом аппарате с использованием жидкого органического связующего карбоксиметилцел-

люлозы (КМЦ), просыпи после классификатора и уменьшения потерь материалов, соответственно.

По результатам проведенных расчетов, базирующихся на использовании модели дисконтированных денежных потоков, были определены основные показатели эффективности предложенного инвестиционного проекта, подтверждающие его целесообразность. При сумме дополнительных единовременных затрат 500 тыс. руб. величина интегрального экономического эффекта, выступающего конечным абсолютным результатом реализации инвестиционного проекта, будет равна 581 тыс. руб. Значение индекса доходности, являющегося показателем степени прибыльности проекта, 2,1, то есть больше 1. Период окупаемости проекта составит 1,2 года. Сумма дополнительной прибыли от продажи продукции при оптовой цене 1 т ГСД 35000 руб., будет равна 481,3 тыс. руб., или в пересчете на 1 т – 1471,8 руб.

Вывод. Проведенные испытания пневмомеханического аппарата для микрогранулирования измельченных целлюлозно-бумажных отходов, установленного в аспирационной системе технологического комплекса, подтвердили повышение эффективности пылеосадительных устройств-циклонов на 20%. Ориентировочный экономический эффект в результате уменьшения материальных потерь в процессе аспирации, перегрузках, а также утилизации некондиционной продукции составит 1471,8 руб./т. При производительности комплекса по готовой продукции 327 т/год экономический эффект будет равен 581 тыс. руб./год.

Библиографический список

1. Ресурсосберегающий технологический комплекс для производства гранулированных стабилизирующих добавок щебеночно-мастичного асфальтобетона / М.В. Севостьянов, Т.Н. Ильина, И.А. Кузнецова и др. // Вестник ТГТУ. 2016. Том 22. С.272-279.

2. **Ильина Т.Н., Бойчук И.П., Емельянов Д.А.** О взаимодействии частиц техногенных волокнистых материалов в воздушном потоке // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 116-121.

3. **Артюхов А.Е., Фурса А.С., Москаленко К.В.** Классификация и сепарация гранул в вихревых грануляторах // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 5. С.15-18.

4. Патент на изобретение № 2538579 РФ. Устройство для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов / В.С. Севостьянов, Т.Н. Ильина, М.В. Севостьянов и др. Опубл. 10.01.2015. Бюл. № 1.

5. **Емельянов Д.А., Плотников К.В.** О влиянии объемной концентрации техногенных волокнистых материалов на коэффициент формы частиц в мате-

риально-воздушном потоке // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 3. С. 91-95.

6. **Ильина Т.Н., Емельянов Д.А.** О роли поверхностных взаимодействий частиц волокнистой структуры при агломерации в воздушном потоке // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 106-111.

7. Патент № 2542010 РФ, С04В 26/26, С08L 95/00. Стабилизирующая добавка для щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси / С.Н. Глаголев, В.В. Ядыкина, В.С. Севостьянов и др.; заявл. 18.03.2014; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5.

8. **Емельянов Д.А., Ильина Т.Н., Севостьянов М.В.** Разработка компонентного состава смеси для агломерации техногенных волокнистых материалов в пневмомеханическом аппарате / Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Алушта, 4-8 июня, 2018 г. Ч.Ш. Белгород, 2018. С. 29-36.

9. Патент на полезную модель № 154559 РФ. Аспирационное укрытие приемной воронки / К.В. Плотников, И.Н. Логачев, О.А. Аверкова и др. Опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.

10. **Minko V.A., P'ina T.N., EmeI'yanov D.A.** Methodological bases for calculation of the aspiration ventilation systems // IJPT. 2016. Vol 8, No 4. P. 26644-26652.

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КПД ДУГ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ МАЛОЙ И БОЛЬШОЙ ВМЕСТИМОСТИ

Д-р техн. наук, проф. **Макаров А.Н.**

Канд. техн. наук, доц. **Окунева В.В.**

Ст. преп. **Павлова Ю.М.**

Тверской государственной технической университет, г. Тверь

***Аннотация.** В ходе исследования выполнили расчет и анализ КПД дуг печей ДСП-5 и ДСП-100 мощности и определили средний КПД дуг за плавку. КПД дуг малотоннажных печей значительно меньше аналогичного показателя современных большегрузных дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Низкий КПД дуг малотоннажных печей приводит к значительному удельному расходу электроэнергии за плавку, составляющему 700-750 кВт·ч/т, что в 1,9-2 раза больше удельного расхода электроэнергии в современных печах ДСП-120, составляющего 375 кВт·ч/т. При использовании в печах ДСП-5 устройств для вспенивания шлака можно повысить средний за плавку КПД печей до значения $\eta_{ДС} = 0,72-0,74$, а удельный расход электроэнергии за плавку снизить до 440-480 кВт·ч/т.*

***Ключевые слова:** электропотребление на расплавление, дуговые сталеплавильные печи, вспенивание шлака.*

Современные успехи электрометаллургии стали определяются новым поколением энергосберегающих дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Электроды рассматриваются как сталеплавильные агрегаты, обеспечивающие прорыв в современной металлургии. Итоги и перспективы развития ДСП и электросталеплавильного производства показывают сложный путь инновационного процесса от возникновения новой технической идеи до ее реализации и выхода на рынок современных технологий и оборудования. Новые технологические решения приводят к радикальным инновационным изменениям в конструкции ДСП и в проектных решениях электросталеплавильных цехов и комплексов.

В процессе реконструкции важно выбрать направление технического перевооружения ДСП для повышения производительности, снижения потребления электроэнергии и воздействия на экологию. ДСП малой вместимости, к ним относятся печи вместимостью от 1,5 до 20 тонн металла, характеризуются повышенным удельным расходом

электроэнергии на расплавление шихты и за плавку в целом, составляющем, соответственно, 700-750 кВт·ч/т для 5-тонных печей ДСП-5. В современных высокомоощных ДСП большой вместимости, вместимостью от 80 до 180 тонн, являющихся плавильными агрегатами, удельный расход электроэнергии на расплавление составляет 375 кВт·ч/т. На рис. 1 изображена завалка шихты в ДСП малой вместимости ДСП-5 (а) и большой вместимости ДСП-120 (б).

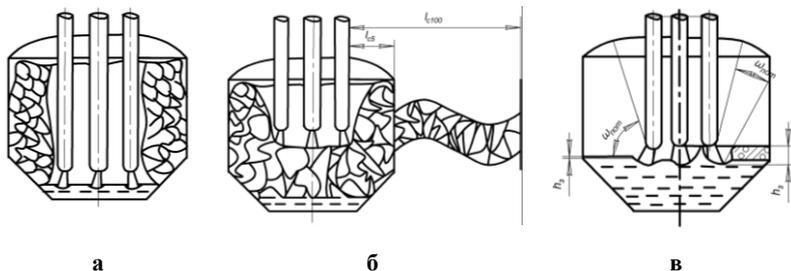


Рис. 1. Прорезка колодцев и расплавление шихты в печи:

а – ДСП-120; б – ДСП-100, ДСП-5; в – заглубление дуги в металл и шлак в печи ДСП-120 (правая часть), ДСП-5 (левая часть)

Из сравнения удельного расхода электроэнергии на расплавление печей малой и большой вместимости следует, что печи малой вместимости потребляют на 35-45% больше электроэнергии на расплавление одной тонны стали по сравнению с печами большой вместимости. Удельный расход электроэнергии на 20-35% больше и в старых и в современных малотоннажных ДСП, оснащенных современными автоматизированными системами управления (АСУ), устройствами для вспенивания шлака и другими устройствами для интенсификации плавки [1].

Необходимо решить задачу определения причин большего электропотребления на расплавление в печах малой вместимости по сравнению с аналогичным показателем печей большой вместимости. Для этого рассмотрели развитие малотоннажных и большегрузных ДСП, а также рассчитали КПД дуг в процессе расплавления шихты и выполнили анализ изменения КПД дуг в печах.

Проведем анализ развития печей малой и большой вместимости и изменения КПД дуг в процессе плавки стали в печах. По разработанной автором методике [2,3] рассчитали КПД дуг и другие энергетические параметры плавки стали в малотоннажных и большегрузных пе-

чах. Рассмотрели и сравнили технические характеристики печей ДСП-5 и ДСП-100, которые печи имели в 1980-е годы и в 2010-е годы. Методика расчета и анализа энергетических параметров плавки и КПД дуг печей изложена в [2,3].

На печи ДСП-5 в 2000-е годы были установлены трансформаторы мощностью 5 МВА. Удельная мощность современных печей ДСП-5 составляет 1000 кВА/т, она превысила удельную мощность современных печей ДСП-100 на 20%. Однако повышением мощности печи ДСП-5, без применения других способов интенсификации плавки, прорывных технико-экономических результатов работы печи получить не удалось.

Выяснили, что оснащение печи ДСП-5 трансформатором в 1,8 раза большей мощности, без оснащения газокислородными горелками (ГКГ) и устройствами для вспенивания шлака (УВШ), привело к повышению производительности печи в 1,8 раза, но не уменьшило удельный расход электроэнергии на расплавление и в целом за плавку. Данный подход оказался не эффективным. Печи ДСП-5, ДСП-100 работали в 1980-е годы в равных условиях. Сравнили технические характеристики работы печей ДСП-5, мощностью 2,8 МВА, и печей ДСП-100, мощностью 45 МВА, работающих в 1980-е годы с полным циклом плавки. В печах ДСП-100 максимум теплового излучения дуг находится напротив дуг посредине высоты стен от уровня ванны металла [4]. На футеровке посредине высоты стен образуются горячие пятна от теплового излучения дуг, вызывающие оплавление футеровки. В нижней и верхней частях стен огнеупоры имели износ не превышающий 20-30% [4]. Однако, так как огнеупоры в центральной части по высоте стен имели износ 90-95% приходилось останавливать печь на ремонт, разрушать кладку старых стен, устанавливать новую кладку стен. Футерованные огнеупорным кирпичом стены в печах ДСП-100 имели небольшую стойкость в среднем 200 плавки.

В печи ДСП-5 ток дуги составляет 6,3 кА, он не обладает значительным радиальным и аксиальным усилиями, не вызывает углубления в ванне металла, отклонение дуги составляет 15-20° к оси электрода. В результате такого положения дуг в печи ДСП-5 максимальное тепловое излучение дуг и износ стен сосредоточены в основном в нижней части стен у откосов [4]. После каждой плавки осуществляется восстановление стен огнеупорным порошком. В печах ДСП-100 восстановить стены невозможно так как заправочный порошок скатывается с вертикальной поверхности стен. Стойкость футерованных сводов печей ДСП-5, ДСП-100 отличается незначительно, так как причиной из-

носа футеровки сводов в печах малой и большой вместимости является излучение высокотемпературной поверхности электродов [4].

В современных высокомоощных большегрузных печах ДСП-120 осуществляется расплавление шихты, другие технологические операции выведены в агрегаты внепечной обработки стали. Печь снабжена газокислородными горелками, устройствами для вспенивания шлака. За тридцатилетний период у большегрузных печей ДСП-120, по сравнению с ДСП-100 увеличались следующие параметры: удельная мощность в 2 раза, напряжение и, соответственно, длина дуги в 2-3 раза, ток в 1,5 раза; уменьшились время расплавления шихты в 1,5-2 раза, удельный расход электроэнергии на расплавление на 15%, печи снабдили водоохлаждаемыми панелями стен, сводов, современными АСУ, ГКГ, УВШ (рис. 2).

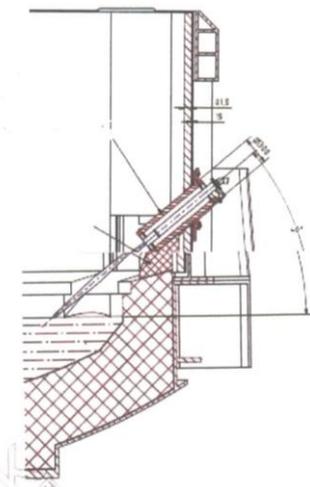


Рис. 2. Комбинированное использование манипулятора для вспенивания шлака и газокислородной горелки в ДСП

Расчетами выявлено, что в зависимости от вместимости печей средний КПД дуг растет от минимальных значений 0,55-0,57 в малотоннажных печах без использования в них ГКГ, УВШ до 0,78-0,80 в большегрузных печах, в которых используются ГКГ, УВШ. Удельный расход электроэнергии на расплавление шихты, наоборот, имеет наибольшее значение 475-500 кВт·ч/т в малотоннажных печах с наименьшим КПД, снижается в зависимости от увеличения вместимости и КПД дуг, достигая наименьшего значения 360-375 кВт·ч/т в большегрузных печах с наибольшим КПД дуг [5,6].

В печи ДСП-5 средний тепловой КПД имеет наименьшее значение $\eta_T = 0,64$, наибольший $\eta_T = 0,75$ в печи ДСП-100, в печи ДСП-120 $\eta_T = 0,68$. В печь ДСП-100 энергия для расплавления шихты вводится с помощью электрических дуг, КПД которых $\eta_{дср} = 0,67$, и использования энергии реакции окисления металла с КПД равным единице. В печь ДСП-120 энергия вводится с помощью дуг с $\eta_{дср} = 0,78$, ГКГ с КПД равным 0,45-0,55 и реакции окисления кокса и электронов с КПД равным 0,35-0,45 [3], поэтому средний тепловой КПД печи $\eta_T = 0,68$. Ввод энергии в печь с помощью электрических дуг является наиболее эффективным способом с максимальным КПД, менее эффективно используется тепло ГКГ, кокса и электродов. Однако использование порошка кокса в УВШ позволяет увеличить высоту слоя шлака и заглубить дуги в шлак, повысив их КПД. В печах ДСП-100 без использования УВШ высота слоя шлака $h_{ш} = 100$ мм и $\eta_{д} = 0,67$, в печах ДСП-120, $h_{ш} = 240-360$ мм и $\eta_{д} = 0,78$. В печах ДСП-5 высота слоя шлака $h_{ш} = 35$ мм, длина дуги в период расплавления составляет 115-135 мм, 60-70 % длины дуги не закрыто шлаком и дуга 2/3 мощности излучает на футеровки стен и свода, что соответствует КПД дуги в окончании расплавления $\eta_{д} = 0,35-0,4$ [4]. В начале расплавления при горении дуг в колодце в шихте в печи ДСП-5 $\eta_{д} = 0,77$, а средний за плавку КПД равен $\eta_{дср} = 0,57$. Исходя из того, что средний КПД дуг ДСП-5 $\eta_{дср} = 0,57$ следует, что в течение периода расплавления около 43% потока теплового излучения дуг попадает не на шихту, ванну металла, шлак, а на футеровки стен, свода, вызывая их нагрев, оплавление, износ футеровки. Вследствие того что в печах ДСП-5 дуги находятся на расстоянии менее 1 м от стен, излучение дуг достигает стен и бесполезно расходуется на нагрев и оплавление футеровки. КПД дуг в печах ДСП-5 снижается по сравнению с печами ДСП-120, в которых излучение дуг не достигает футеровки и полезно расходуется на нагрев и расплавление шихты.

Средний за плавку КПД дуг печи ДСП-5 на 34% меньше среднего за период расплавления и за плавку в целом КПД дуг $\eta_{дср} = 0,78$ печи ДСП-120 и на 16% меньше аналогичного показателя $\eta_{дср} = 0,67$ печи ДСП-100. Низкий средний за плавку КПД дуг малотоннажных печей является причиной повышенного удельного расхода электроэнергии в печах. Средний за плавку КПД дуг в малотоннажных печах ДСП-5 $\eta_{дср} = 0,58$ (рис. 3), которому соответствует удельный расход электроэнергии за плавку 700-790 кВт·ч/т. Средний за плавку КПД дуг в большегрузных печах, в ДСП-100, которые работали в 1980-е годы в одних условиях с малотоннажными печами с полным циклом плавки,

составляет $\eta_{\text{дср}} = 0,67 - 0,72$, а удельный расход электроэнергии 420-460 кВт·ч/т [4, 5]. КПД дуг увеличивается с высотой h_3 заглибления дуг в металл и шлак. В печах ДСП-5 высота заглибления дуг $h_3 = 37-40$ мм, средний КПД дуг за период расплавления $\eta_{\text{дср}} = 0,57$, удельный расход электроэнергии на расплавление 475 кВт·ч/т. В печах ДСП-100 высота заглибления дуг $h_3 = 140-150$ мм, средний КПД дуг $\eta_{\text{дср}} = 0,67$, удельный расход электроэнергии на расплавление 425 кВт·ч/т.



а

б

Рис. 3. Загрузка шихты в ДСП:

а – ДСП-5 (малой вместимости); б – ДСП-120 (большой вместимости)

В печах ДСП-120 высота заглибления дуг $h_3 = 240-410$ мм, средний КПД дуг $\eta_{\text{дср}} = 0,78$ (рис. 1, б) удельный расход электроэнергии на расплавление 375 кВт·ч/т. Таким образом, чем больше высота слоя шлака, заглибления дуг в металл и шлак, тем больше КПД дуг и тем меньше удельный расход электроэнергии в печах. Вспениванием шлака в малотоннажных печах до 100-150 мм можно заглибить дуги в шлак и повысить их КПД за период расплавления и за плавку в целом до $\eta_{\text{дс}} = 0,72-0,74$, а удельный расход электроэнергии на расплавление и за плавку в целом снизить до 440-480 кВт·ч/т, уменьшить время плавки, повысить производительность печей.

Результаты проведения энергетических балансов в печах малой и большой вместимости [6-8], а также результаты расчетов КПД дуг показывают, что достичь КПД в начале периода расплавления в печах малой вместимости больше $\eta_{\text{д}} = 0,77$ невозможно (рис. 3, а). За первые 20 мин. периода расплавления средний КПД дуг печей ДСП-5 составил $\eta_{\text{дс}} = 0,77$, за анализируемые первые 20 минут периода расплавления КПД дуг в печах ДСП-120, ДСП-100 составил $\eta_{\text{дс}} = 0,83$ (рис. 3, б) или на 8% больше по сравнению с малотоннажными печами. Так как

удельный расход электроэнергии в печах прямо пропорционален КПД дуг, то удельный расход электроэнергии за первые 20 мин. плавки в печах ДСП-5 будет на 8-10% больше аналогичного показателя в печах ДСП-120, ДСП-100.

Выявлены причины повышенного удельного потребления электроэнергии на расплавление шихты дуговыми сталеплавильными печами малой вместимости по сравнению с большегрузными печами. Сравнимые печи ДСП-5 и ДСП-100 работали в равных условиях без газоокислородных горелок, устройств для вспенивания шлака с полным циклом плавки. Выполненными расчетами установлено, что в малотоннажных печах по сравнению с большегрузными печами, КПД дуг имеет меньшее значение, что сказывается на повышенном удельном расходе электроэнергии в печах малой вместимости. Для повышения КПД дуг и снижения удельного расхода электроэнергии в малотоннажных печах необходимо повысить высоту шлака путём использования устройств для его вспенивания.

Библиографический список

1. **Бершицкий И.М., Протасов А.В.** Некоторые особенности и перспективы развития малотонной электрометаллургии // *Электрометаллургия*. 2015. № 10. С. 28-35.
2. **Макаров А.Н.** Влияние конструктивного исполнения на энергоэффективность дуговых сталеплавильных печей обычной конструкции и Consteel // *Металлург*. 2018. № 10. С. 13-15.
3. **Макаров А.Н.** Расчет и анализ энергетических параметров плавков в дуговых сталеплавильных печах обычной конструкции и Consteel // *Металлург*. 2018. № 9. С. 30-36.
4. **Макаров А.Н.** Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
5. **Макаров А.Н.** Расчет и анализ взаимосвязи КПД и расположения дуг с электропотреблением в дуговых сталеплавильных печах малой и большой вместимости. Часть I. Расчет и анализ взаимосвязи КПД дуг и электропотребления // *Металлург*. 2019. № 4. С. 29-35.
6. **Макаров А.Н.** Расчет и анализ взаимосвязи КПД и расположения дуг с электропотреблением в дуговых сталеплавильных печах малой и большой вместимости. Часть II. Расчет и анализ взаимосвязи расположения дуг, стен и электропотребления // *Металлург*, 2019. № 5. С. 21-27.
7. **Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н.** Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 320 с.
8. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе / В.Г. Евстратов, А.Д. Киселев, И.Ю. Зинуров и др. // *Электрометаллургия*. 2012. № 8. С. 2-6.

УДК 666.9.04

ВЛИЯНИЕ НАЛИЧИЯ КРУПНОЗЕРНИСТОГО КВАРЦА В СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ НА РЕЖИМ РАБОТЫ ЦЕМЕНТНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ*

Канд. техн. наук, доц. **Мишин Д.А.**

Канд. техн. наук, доц. **Перескок С.А.**

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

***Аннотация.** Обжиг портландцементных смесей с повышенным содержанием крупных зерен кварца приводит к увеличению удельного расхода топлива на 3-7 кг у.т./т кл. При обжиге таких смесей увеличивается количество несвязанного в минералы кварца, изменяется конечный минералогический состав клинкера. В результате увеличивается тепловой эффект клинкерообразования. Изменение этой расходной статьи мало по отношению к изменению действительного расхода топлива. Анализ теплового баланса печи показал, что увеличение расхода топлива затрачивается на увеличение температуры горения факела для сохранения свойств получаемого клинкера. Температура факела увеличивается с 1742 до 1756°С для рассматриваемого варианта.*

***Ключевые слова:** крупнозернистый кварц, температура горения, клинкер, тепловой эффект клинкерообразования.*

Одной из причин ухудшения показателей эффективности работы печных агрегатов является наличие крупнозернистого кварца в составе сырьевой смеси. При осуществлении процесса обжига он очень трудно вступает во взаимодействие с СаО при температуре 1250-1400°С даже в присутствии расплава [1, 2].

В результате увеличения содержания крупнокристаллического кварца в сырьевой смеси:

а) ухудшается способность к формированию гранул надлежащего размера. В случае плохой грануляции клинкер содержит большое количество мелких фракций. В результате значительная часть его просыпается через колосник, температура клинкера после холодильника возрастает, увеличивается вынос клинкерной пыли из холодильника и возрастают потери теплоты;

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

б) труднее всего в процессе обжига усваивается крупнокристаллический кварцевый песок, крупные частицы полевых шпатов и слюд. Поэтому кварц целесообразно измельчать до 1% остатка на сите №008. Во всех случаях помол должен быть не крупнее 50-100 мкм при содержании до 30% частиц мельче 15 мкм, т.к. более крупные зерна в клинкере не реагируют до конца;

в) при наличии крупнокристаллического кварца в сырьевой смеси без изменения тонкости помола возрастает содержание нерастворимого остатка (н.о.) в клинкере, который состоит в основном из неусвоенного кремнезема, содержание которого может достигать до 1% [3].

По статистическим данным параметров работы вращающихся печей АО «Осколцемент» при увеличении содержания зерен кварца более 80 мкм увеличение расхода топлива при содержании нерастворимого остатка в клинкере от 0 до 0,5% составляет от 3 до 7 кг у.т./т кл (ср. 5 кг у.т./т кл)[4]. Анализа затрат тепла при обжиге сырьевых смесей, содержащих крупные зерна кварца до настоящего времени проведено не было.

Цель работы: объяснение причин увеличения расхода топлива при обжиге сырьевых смесей, содержащих крупные зерна кварца в повышенных количествах.

Для достижения поставленной цели провели теплотехнические расчеты печной системы мокрого способа производства. Для расчетов взята сырьевая смесь с характеристиками, представленными табл. 1.

Таблица 1

Характеристика сырьевой смеси и клинкера

Химический состав							Модули			Минералогический состав			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП	Проч.	КН	n	p	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
21,5	5,4	4,3	66,0	0,8	0,0	0,0	0,92	2,2	1,3	63,1	14,0	7,0	13,1

Результаты расчета теплового баланса показали, что печь мокрого способа производства при отсутствии крупных зерен кварца в сырьевой смеси работала с расходом топлива 6006 кДж/кг или 205 кг у.т./т кл (табл. 2).

При появлении в сырьевой смеси крупных зерен кварца увеличивается количество нерастворимого остатка в обожжённом клинкере.

МАКЕТ ДЛЯ ПРАВКИ! Номера страниц меняться не будут.

Это приводит к увеличению КН получаемого клинкера (табл. 3), который отражает изменение конечного минералогического состава продукта.

Таблица 2

Тепловой баланс печи при отсутствии крупных зерен кварца в сырьевой смеси

Статьи прихода	кДж/кг	кг у.т./т	Статьи расхода	кДж/кг	кг у.т./т
От сгорания топлива, Q_T^X	6006	205,0	$Q_{ТЭК}$	1715	58,5
С топливом физическая, $Q_T^Ф$	0,0	0,0	Испарение влаги	2377	81,1
С воздухом вторичным, $Q_B^{гор}$	1075	36,7	С отходящими газами	1096	37,4
С сырьем	53	1,8	С клинкером	1307	44,6
С возвращаемой пылью	38	1,3	С пылеуносом	77	2,6
			Потери через корпус печи	600	20,5
Всего	7172	244,7	Всего	7172	244,7

Изменение минералогического состава приводит к изменению расходной статьи $Q_{ТЭК}$ (тепловой эффект клинкерообразования) (табл. 3), показывающей тепло, расходуемое на проведение всех химических реакций и изменение агрегатного состояния обжигаемого материала. Анализ изменения расхода тепла в связи с ухудшением связывания зерен кварца в клинкерные минералы, выражаемого в повышении нерастворимого остатка в клинкере от 0 до 1%, приведен в табл. 3.

Таблица 3

Изменение расхода тепла $Q_{ТЭК}$ при изменении содержания нерастворимого остатка клинкера

Нерастворимый остаток, %	КН (коэффициент насыщения клинкера)	$Q_{ТЭК}$		
		кДж/кг кл	кг у.т./т кл	Δ , кг у.т./т кл
0	0,92	1715	58,5	-
0,5	0,95	1725	58,9	0,4
1	0,97	1735	59,3	0,8

Увеличение расходной статьи $Q_{ТЭК}$ (табл. 3) незначительно 0,4-0,8 кг у.т./т кл. мало относительно суммарного увеличения расхода топлива, наблюдаемого при обжиге сырьевых смесей с крупными кварцевыми включениями (3-7 кг у.т./т кл.). С изменением доли нерастворимого остатка изменяется минералогический состав обжигаемого материала, что должно привести к изменению его обжигаемости. Критерием, учитывающим влияние химического состава на обжигаемость материала, является индекс обжигаемости B [3,5]:

$$B = \frac{CaO - (1,87 \cdot SiO_2 + 1,65 \cdot Al_2O_3 + 0,45 \cdot Fe_2O_3)}{3,0 \cdot Al_2O_3 + 2,25 \cdot Fe_2O_3}$$

Для нормально обжигаемых смесей значение индекса B составляет 0,5-0,6. При увеличении нерастворимого остатка в клинкере от 0% до 0,5% индекс обжигаемости клинкеров возрастает от 0,59 до 0,63 и превышает оптимальный интервал. Таким образом, обжигаемость смеси ухудшается с увеличением нерастворимого остатка. В такой ситуации для получения клинкера с нормальным усвоением оксида кальция необходимо поднять температуру материала в зоне спекания за счет увеличения температуры факела. Поднять температуру факела за счет увеличения КПД холодильника не удастся. Как указывалось выше, размер обожжённого материала, содержащего крупные зерна кварца, уменьшается. Печь начинает работать с «клинкерным пылением». В результате значительная часть материала просыпается через колосники (справедливо для колосниковых холодильников типа «Волга»), увеличивается сопротивление слоя охлаждаемого клинкера на колосниках. Поэтому КПД холодильника снижается, что влечет уменьшение температуры факела.

Проведены расчеты температуры газового потока в зоне спекания при различных действиях машиниста:

$$t_{гор} = \frac{Q_T^x + Q_T^\phi + Q_B^{гор}}{V_{пр} \cdot c_{пр}} \cdot \eta_T,$$

где η_T – КПД топки, $\eta_T = 0,79$ [6]; Q_T^x , Q_T^ϕ , $Q_B^{гор}$ – обозначения даны в табл. 2 и 4; $V_{пр}$ – объем продуктов горения зоны обжига; $c_{пр}$ – теплоемкость продуктов горения зоны обжига.

Для базового варианта расход топлива $x_T = 205$ кг у.т./т кл и расчетных вариантов $x_T = 210$ кг у.т./т кл в результате предполагаемого

изменения режима сжигания топлива и ухудшение работы клинкерного холодильника со снижением его КПД с 80 до 76% (табл. 4).

Таблица 4

**Влияние различных действий машиниста
на температуру горения факела в зоне спекания**

Параметр	Размерность	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Действия машиниста		Нормальная работа печи	Увеличение расхода топлива x_T на 5 кг у.т./т кл и незначительное увеличение тяги запечного дымососа с целью сохранения условий сжигания топлива, $\alpha = \text{const}$	Увеличение расхода топлива x_T на 5 кг у.т./т кл
Расход топлива	кг у.т./т кл	205	210	210
КПД холодильника	%	80	76	76
Уд.расход газообразного топл.	м ³ /кг кл	0,168	0,172	0,172
Тепло от сгорания топлива, Q_T^x	кДж/кг	6006	6155	6155
Тепло воздуха на горение, $Q_B^{\text{гор}}$	кДж/кг	1075	1025	1025
Состав прод. горения:	м ³ /кг кл			
CO ₂		0,168	0,172	0,172
H ₂ O		0,336	0,344	0,344
N ₂		1,388	1,421	1,388
O ₂		0,034	0,034	0,026
Коэф. избытка воздуха, α		1,1	1,1	1,08
Температура газового потока	°С	1742	1727	1756

В варианте 1 при обжиге сырьевой смеси без крупных кварцевых зерен расчетная температура горения факела составляет 1742°С. При обжиге материала, содержащего крупные зерна кварца, в клинкере начнет увеличиваться свободный оксид кальция (является показателем снижения качества продукции) и даже превышать разрешенные гра-

ничные значения. Чтобы не допустить выпуска некондиционного клинкера машинист увеличивает расход топлива и одновременно увеличивает тягу запечного дымососа, чтобы сохранить коэффициент избытка воздуха (табл. 4, вариант 2). Температура горения топлива при таком сочетании действий снижается до 1727°C. Такое снижение температуры можно объяснить вводом в систему дополнительного количества воздуха, так как увеличиваем расход топлива при сохранении коэффициента избытка воздуха.

Как правило печь работает с постоянной тягой запечного дымососа. Величина тяги обеспечивает такой коэффициент избытка воздуха, который при незначительных изменениях расхода топлива обеспечивается его полное сгорание. В таком случае увеличение топлива без изменения тяги приводит к снижению коэффициента избытка воздуха с 1,1 до 1,08. В этом случае происходит увеличение температуры горения факела до 1756°C. При этом увеличивается эксергия газового потока с 672 (вариант 1) до 716 (вариант 3) кДж/кг кл [7]. Это обеспечивает увеличение скорости протекания химических превращений в зоне спекания, получения клинкера с нормальным содержанием свободного оксида кальция [8, 9].

Выводы

Обжиг сырьевых смесей, содержащих крупные кварцевые зерна, приводит к технологическим осложнениям и снижением качества клинкера в результате увеличения нерастворимого остатка в клинкере до 1%.

Изменение нерастворимого остатка в клинкере от 0 до 0,5% приводит к изменению минералогического состава клинкера, приводящее к ухудшению обжигаемости смеси (индекс B увеличивается до 0,63), и соответственно увеличивается статья теплового эффекта клинкерообразования на 0,4 кг у.т./т кл.

Обжиг смесей, содержащих крупные зерна кварца, необходимо проводить при повышенной температуре факела, что достигается увеличением расхода топлива одновременно со снижением коэффициента избытка воздуха, при котором обеспечивается полное сгорание топлива.

Библиографический список

1. **Классен В.К.** Технология и оптимизация производства цемента: учеб. пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. 308 с.

2. **Текучева Е.В., Дроздов А.А.** Совершенствование контроля содержания кварца в печном шламе на ОАО «Осколцемент» // Цемент и его применение. 2006. № 6. С. 47-49.

3. **Древицкий Е.Г., Добровольский А.Г., Коробок А.А.** Повышение эффективности работы вращающихся печей. М.: Стройиздат, 1990. 223 с.

4. **Кобзева Н.С., Мишин Д.А.** Влияние различных фракций крупных зерен кварца, содержащихся в сырьевой смеси, на параметры работы вращающейся печи и качество цемента // Научные технологии и инновации: сб. докл. Юбилейной Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. Ч. 1. С. 118-124.

5. **Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В.** Химическая технология вяжущих материалов: учебник для вузов / Под ред. В.В. Тимашева. М.: Высш. шк., 1980. 472 с.

6. **Мазуров Д.Я.** Теплотехническое оборудование заводов вяжущих материалов: учебник для техникумов. М.: Стройиздат, 1975. 283 с.

7. Special features of fuel combustion in dry and wet process cement kilns / V.M. Kononov, V.K. Klassen, S.A. Pereskok, A.G. Novosyolov / ИРТ. 2016. Vol. 8, Is. 4. P. 22545-22554.

8. Повышение эффективности тепломассообменных процессов в производстве цемента / В.М. Коновалов, С.А. Перескок, М.А. Петрова, А.Н. Образумов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 176-181.

9. **Трубаев П.А.** Энерготехнологический анализ высокотемпературных процессов и аппаратов производства силикатных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2007. № 1. С. 11-13.

УДК 622.7

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЕ ПЕРЕРАБОТКИ СИДЕРИТОВЫХ РУД

Мурзадеров А.В.¹

Канд. техн. наук, доц. **Нешпоренко Е.Г.²**

¹*Магнитогорский металлургический
комбинат, г. Магнитогорск*

²*Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск*

***Аннотация.** Описана действующая технология обжига сидеритовой руды в шахтных печах. Определены основные энергетические затраты в технологии обработки сидеритовых руд на Бакальском месторождении. Представлен метод возможного энергосбережения с применением газотурбинной генерации.*

***Ключевые слова:** сидерит, газотурбинная генерация, теплотехнология, Бакальское рудоуправление.*

Введение. С каждым годом спрос на металлургическую продукцию становится все больше и больше. Промышленные предприятия вступают в конкурентную борьбу, постоянно улучшая качество производимого металла. На качество производимого металла влияет качество исходной железной руды. Мировые запасы железных руд с каждым годом истощаются, поэтому приходится использовать альтернативные руды, примером таких руд являются сидеритовые руды, которые в настоящее время мало используются из-за наличия тугоплавких соединений и дополнительной теплотехнологии их обработки. В настоящее время на теплотехнологию обработки 1 тонны сидеритовой руды тратится от 30 до 50 м³ природного газа и более 60 кВт·ч электроэнергии из сети.

Цель работы. Улучшить теплотехнологию переработки сидеритовых руд на Бакальском месторождении с помощью применения газотурбинной генерации электрической энергии.

1. Характеристика теплотехнологии обработки сидеритовых руд

Сидеритовая руда в общем случае представляет собой смесь карбонатов железа и магния в виде соединения $\text{FeCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ с содержанием Fe в сырой руде 28-32%. После термической обработки содержание железа Fe повышается до 50%. Бакальское месторождение си-

деритов и бурых железняков насчитывает запасы руды около 1 млрд. тонн, из них более 420 млн. тонн сидеритовой руды. Исследованиями было установлено, что бакальские сидериты являются ценным сырьем для получения высококачественных сталей [1].

Обжиг бакальской сидеритовой руды относится к числу сложных гетерогенных процессов и сопровождается разложением карбонатов железа и магния.

Обжиг сырой сидеритовой руды фракцией 10-60 мм реализуют в шахтных печах с применением природного газа. Руда обжигается в течение 8-9 часов, в том числе более 2 часов в зоне обжига при температуре 900°C. Средняя скорость обжига 0,18 т/м³·ч [2]. Поскольку температура горения природного газа превышает 2000°C, а на обжиг руды необходима температура 1000-1100°C, сжигание природного газа ведут с большим избытком воздуха, из-за чего температурный потенциал природного газа используется неэффективно. При термическом разложении сидеритовых руд вследствие выделения CO₂ теряется порядка 38% массы сидероплезита. В современных печах на разمول руды и магнитную сепарацию тратиться около 60 кВт·ч/т. Теплота отходящих продуктов природного газа вместе с неиспользуемым CO₂ выбрасывается в атмосферу с температурой 250-300°C.

2. Анализ основных энергозатрат

Электроэнергия используется на всем этапе подготовки руд к обогащению. Если учесть затраты на карьерные работы и вывоз руды, освещение объектов и другие вспомогательные нужды, то можно оценить общие затраты электроэнергии на ГОК в размере 80-100 кВт·ч/т руды (рис. 1) [3]. Следует отметить, что рудодобывающие и обогащательные мероприятия находятся, как правило, вдали от электростанций, поэтому производство электроэнергии на станции превышает потребление энергии на предприятии на величину потерь при ее транспорте (9%) и распределении (15%) [4]. Суммарные потери электроэнергии от электрической станции до ГОК можно оценить в 15-20%. То есть для потребления 80-100 кВт·ч/т руды в ГОК от станций должно быть отпущено около 100-120 кВт·ч.

Большинство тепловых электростанций России производит электроэнергию на природном газе с КПД не более 40% даже при развитой внутренней тепловой регенерации в схеме станции [4]. Следовательно, фактический расход природного газа на станциях более чем в 2,5 раза превышает его эквивалент электроэнергии у потребителя. Очевидно, что этот объем природного газа заложен в тариф на электроэнергию и оплачивается потребителем.

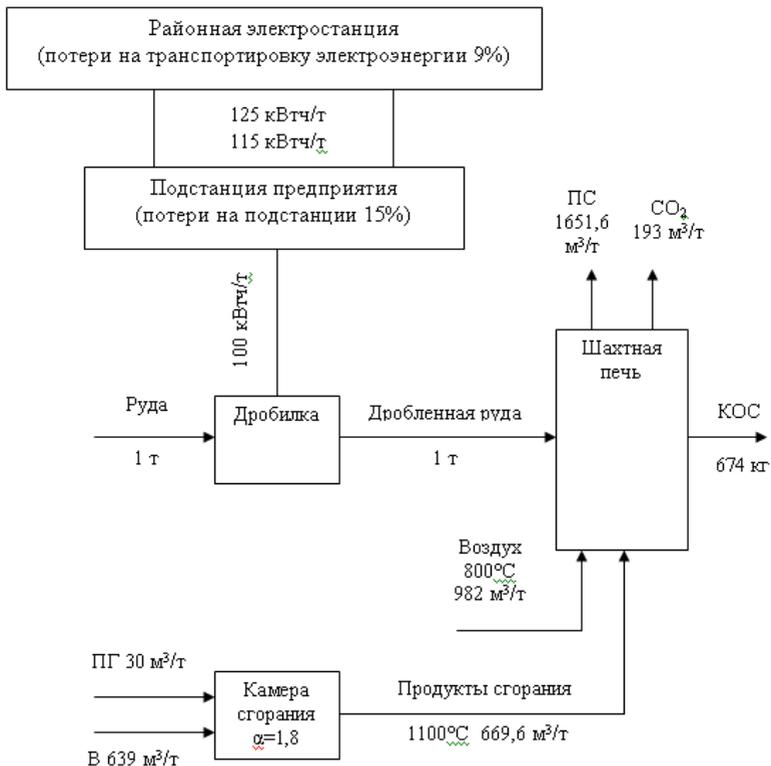


Рис. 1. Действующая схема обжига сидеритовой руды:

ПГ – природный газ, В – воздух, ПС – продукты сгорания, КОС – концентрат обожженного сидерита

После обжига готовый материал поступает на в ступенчатую зону охлаждения, где противотоком нагревает воздух до 800°C. Воздух после регенерации поступает обратно в шахтную печь. Утилизация физической теплоты нагретого материала холодным воздухом, поступающим из бункеров-охладителей и передача его в зону обжига позволили, с одной стороны, интенсифицировать процесс охлаждения руды, с другой – понизить расход природного газа на обжиг с 50 до 30 м³/т.

3 Перспективы применения газотурбинной генерации

Одним из возможных способов улучшения технологии обжига сидеритовой руды может стать комбинирование газотурбинной уста-

новки с действующей схемой обжига. Энергетика действующего процесса показывает, что температурный потенциал природного газа целенаправленно снижается с 2000°С до 700-1100°С, что ведет к потерям эксергии и снижению общей энергетической эффективности использования природного газа.

Предлагается в камере сгорания ГТУ продукты сгорания природного газа разбавлять воздухом до температуры рабочего тела перед лопатками турбины. В настоящее время достигнутый предел рабочих температур составляет в интервале 1200-1600°С. После ГТУ рабочее тело с температурой 700-1100°С поступает в шахтную печь на обжиг сидеритовой руды. Это дает основание предположить, что включение газотурбинной генерации электроэнергии, в технически обоснованном интервале температур, в тепловую схему обжига сидеритовых руд, может повысить эффективность использования природного газа, а также общую эффективность схемы.

В результате термодинамических расчетов построена энергетическая схема переработки сидеритовых руд с применением ГТУ (рис. 2).

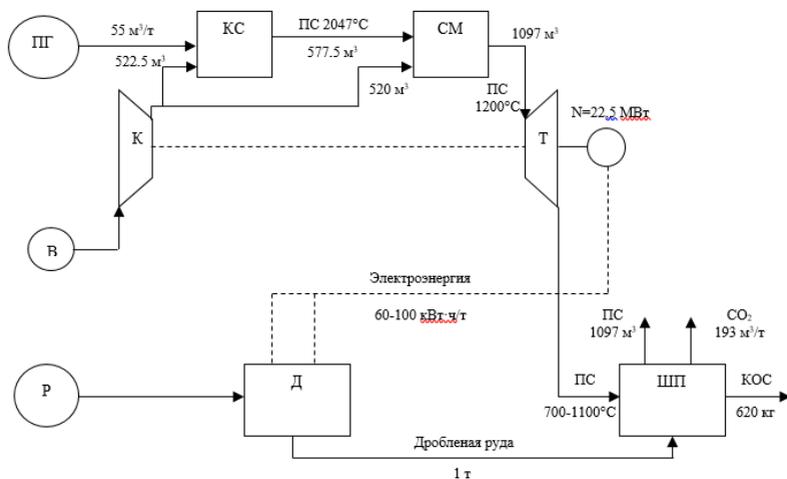


Рис. 2. Схема обжига сидеритовой руды с газотурбинной установкой:
 ПГ – природный газ, В – воздух, ПС – продукты сгорания, КОС – концентрат обожженного сидерита, КС – камера сгорания, СМ – смеситель, К – компрессор, Т – турбина, Р – руда, Д – дробилка, ШП – шахтная печь

Смеситель в данной схеме необходим для снижения температуры продуктов сгорания перед лопатками турбины. Расчетами было установлено, что для предприятия с его годовым производством 2 млн. тонн руды по сырому продукту потребуется газовая турбина мощностью 22,5 МВт для покрытия собственных электрозатрат на производственный процесс.

Заключение

Таким образом, разработанная схема с газотурбинной генерацией позволит вырабатывать собственную электрическую энергию для обеспечения технологического процесса обжига сидеритовой руды на Бакальском месторождении. Ввиду установки собственной ГТУ предприятие становится независимым источником выработки электрической энергии и ему не придется оплачивать потери электрической энергии при транспортировке от станции до предприятия. Согласно расчетам экономический эффект от установки ГТУ на предприятии составит 68,5 млн. рублей в год. Учитывая стоимость ГТУ, срок окупаемости данного проекта составит 10,7 лет. Комбинированная схема позволит экономить около 15 300 т у. т. в год и повысить энергетическую эффективность предприятия с 37% до 40%.

Библиографический список

1. **Красноборов В.А.** Эффективность и применение сидеритовых руд в доменной плавке. Донецк: ДонГТУ, 1996. 74 с.
2. **Юрьев Б.П.** Исследование процессов при окислительном обжиге сидеритовой руды в шахтной печи // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». 2007. № 6. С. 25-29.
3. **Мурзадеров А.В., Картавцев С.В., Нешпоренко Е.Г.** Совершенствование энергетики теплотехнологии переработки сидеритовых руд // Промышленная энергетика. 2017. № 10. С. 42-50.
4. **Воротницкий В.Э.** Снижение потерь электроэнергии – важнейший путь энергосбережения в электрических сетях // Энергосбережение. 2014. № 3. С. 61-66.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ СИЛИКАГЕЛЯ В АППАРАТЕ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

Канд. техн. наук **Надеев А.А.**

Д-р техн. наук, проф. **Бараков А.В.**

Канд. техн. наук, доц. **Дубанин В.Ю.**

Аспирант **Андреев А.Ю.**

Канд. техн. наук, доц. **Муравьев А.В.**

*Воронежский государственный технический
университет, г. Воронеж*

***Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментального исследования процесса низкотемпературной сушки силикагеля в аппарате с центробежным псевдоожигенным слоем. Полученные экспериментальные данные представлены в виде зависимости теплофизических параметров материала и сушильного агента от времени сушки. Приведено сравнение эффективности сушки при различных режимах. На основании полученных данных сделан положительный вывод о возможности применения такого режима для сушки капиллярно-пористых тел в псевдоожигенном слое.*

***Ключевые слова:** псевдоожигенный слой, силикагель, сушильный агент, экспериментальное исследование.*

Среди всех тепломассообменных установок, применяемых в промышленности, особое место занимают аппараты с псевдоожигенным слоем. Это связано с высокой интенсивностью межфазного тепломассообмена в таких аппаратах, их небольшим гидравлическим сопротивлением, малыми габаритами и простой конструкцией [1, 2]. Это обусловило наличие в промышленности широкого модельного ряда сушилок, реализующих данный технологический принцип. Однако разработка и исследование новых, более энергоэффективных конструкций является актуальной задачей, имеющей прикладное значение.

В работах [3-4] систематизированы результаты теоретического и экспериментального исследования центробежного псевдоожигенного слоя, нашедшего применение в регенеративных теплообменных аппаратах и абсорберах. Было отмечено, что организация центробежного слоя позволяет значительно интенсифицировать процесс тепломассообмена. В данной работе приведены результаты применения этого

технологического принципа для низкотемпературной сушки капиллярно-пористого дисперсного материала – силикагеля.

Сушилка, позволяющая реализовать центробежный псевдооживленный слой, представляет собой установку периодического действия с вертикальной подачей сушильного агента. Её конструкция и принцип действия, а также описание лабораторного стенда и методики исследования приведены в работе [5], содержащей также результаты предварительной серии экспериментов по сушке силикагеля. По сравнению с предварительной серией в основной серии экспериментов температура материала измеряется с помощью промышленного инфракрасного датчика, установленного над слоем в рабочей камере.

Основными параметрами, которые позволяют судить об интенсивности процесса сушки, являются: температура и влажность сушильного агента на входе в аппарат ($t'_g, ^\circ\text{C}$; $\varphi', \%$) и на выходе из неё ($t''_g, ^\circ\text{C}$; $\varphi'', \%$), а также изменяющиеся в процессе сушки температура и влагосодержание материала ($t_m, ^\circ\text{C}$; $u, \text{кг/кг}$).

Пределы суммарной погрешности измерения данных величин с помощью соответствующих датчиков и вторичного прибора (измеритель-регулятор ТРМ-148) составляет: температура воздуха (ТЭП ТП-2088) – $\Delta t = \pm 3 ^\circ\text{C}$; влажность воздуха (датчик Galltec+Mela FRC 3/5) – $\Delta \varphi = \pm 2,3 \%$; температура материала (ИК-датчик) – $\Delta t = \pm 2 ^\circ\text{C}$; влажность материала (анализатор влажности ЭВЛАС-2М) – $\Delta w = \pm 0,05 \%$.

Параметры, характеризующие различные режимы сушки, имели следующие значения: температура сушильного агента (воздуха) на входе в рабочую камеру $t'_g = 35; 45; 55 ^\circ\text{C}$; скорость сушильного агента на входе в слой $v_g = 2,0; 2,3 \text{ м/с}$; масса силикагеля в рабочей камере $M_m = 1,0; 1,5 \text{ кг}$; начальное влагосодержание силикагеля $u_n = 0,32; 0,53; 0,82 \text{ кг/кг}$. Всего исследовано 15 режимов. Обработка экспериментальных данных осуществлялась по рекомендациям [6].

На рис. 1 приведены показания всех установленных на стенде датчиков при $t'_g = 55 ^\circ\text{C}$; $M_m = 1 \text{ кг}$; $u_n = 0,82 \text{ кг/кг}$ ($w_n = 44,92 \%$); $v_g = 2,0 \text{ м/с}$. Здесь также показаны значения температуры и влажности воздуха в лаборатории ($t_{g0}, ^\circ\text{C}$; $\varphi_0, \%$).

Из рис. 1 видно, что кривые, относящиеся к материалу довольно характерны для капиллярно-пористых тел, к которым относится силикагель [7].

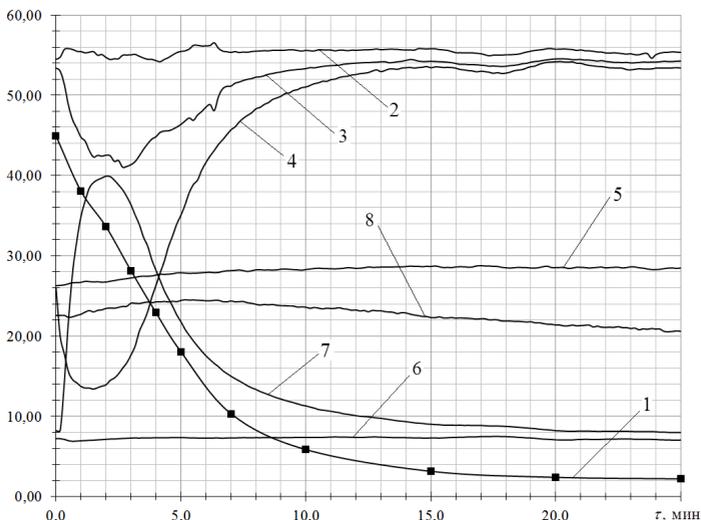


Рис. 1. Процесс сушки силикагеля:

1 – w , %; 2 – t'_e , °C; 3 – t''_e , °C; 4 – t_m , °C; 5 – t_{e0} , °C;
6 – ϕ' , %; 7 – ϕ'' , %; 8 – ϕ_0 , %

Из температурной кривой 4 видно, что температура материала снижается до температуры мокрого термометра, происходит прогрев материала. Его продолжительность – 30-40 сек. с начала сушки. Затем, до 2-2,5 мин. с начала сушки, температура материала примерно постоянна – наблюдается период постоянной скорости сушки. После этого происходит прогрев материала до температуры сушильного агента – наблюдается период падающей скорости сушки. Соответственно, на кривой сушки 1 можно выделить два значения влажности – критическое $w_{кр} = 34\%$ и равновесное $w_p = 2,3\%$. Процесс удаления влаги для данного режима завершается к 16-й минуте.

Из кривой 4 также видно, что температура материала принимает значения ниже температуры окружающей среды. Это связано с высокой начальной влажностью материала и интенсивным удалением влаги из него, т.е. происходит испарительное охлаждение силикагеля.

С целью проверки воспроизводимости данных для каждого режима проводилось от трёх до пяти экспериментов. На рис. 2 и 3 показано сравнение результатов трёх экспериментов для одного режима сушки ($t'_e = 55^\circ\text{C}$; $M_m = 1$ кг; $u_n = 0,82$ кг/кг ($w_n = 44,92\%$); $v_e = 2,0$ м/с).

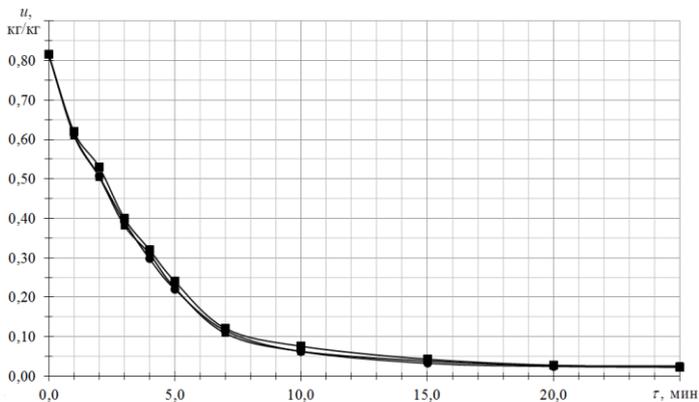


Рис. 2. Кривые сушки силикагеля для одного режима

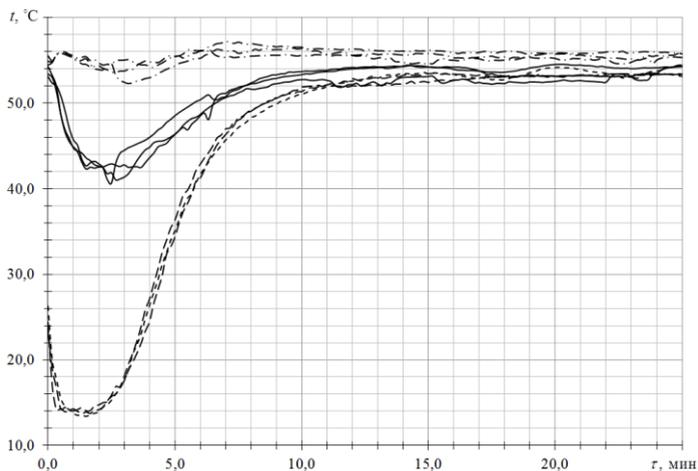


Рис. 3. Температурные кривые для одного режима:

— · — · — t'_g ; — t''_g ; — — — t_m

Аналогичное сравнение было проведено для влажности сушильного агента. После статистической обработки экспериментальных данных был сделан вывод, что принятая методика исследования адекватна и позволяет получать достаточно надёжные данные по параметрам материала и сушильного агента.

На рис. 4-6 показано сравнение двух режимов сушки, отличающихся температурой воздуха на входе в рабочую камеру t'_z – 45 °С и 55 °С. Другие параметры режима: $M_m = 1$ кг; $u_n = 0,82$ кг/кг; $v_e = 2,3$ м/с. Из данных зависимостей видно, что при увеличении температуры сушильного агента возрастает интенсивность удаления влаги из материала и уменьшается длительность первого периода и продолжительность цикла сушки. При $t'_z = 55$ °С процесс сушки завершается к 14-й минуте; $u_{кр} = 0,48$ кг/кг; $u_p = 0,044$ кг/кг; При $t'_z = 45$ °С процесс сушки завершается к 16-й минуте $u_{кр} = 0,52$ кг/кг; $u_p = 0,041$ кг/кг.

На основе полученных данных можно подтвердить вывод, что интенсивность тепломассообмена в аппарате с центробежным псевдооживленным слоем достаточно высока. Это позволяет реализовать процесс низкотемпературной сушки, что особенно важно при сушке термолабильных материалов.

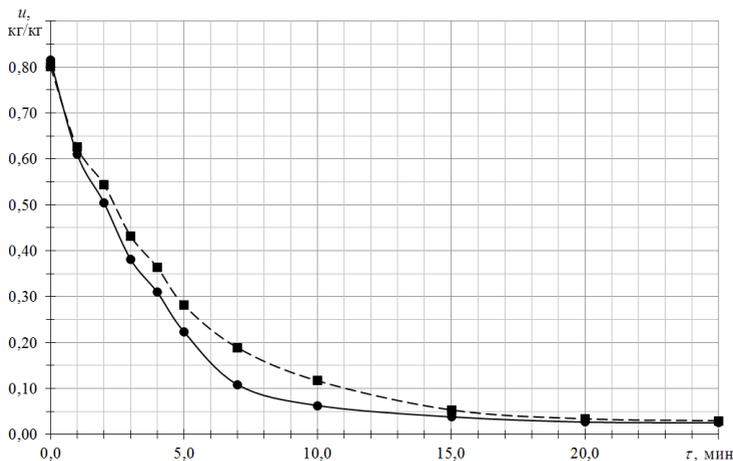


Рис. 4. Кривые сушки силикагеля:
 - - - - $t'_z = 45$ °С; — — — — $t'_z = 55$ °С

Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи при испарении влаги из материала в начале сушки может быть в 1,5-2 раза выше, чем в конце сушки [8]. При этом в математических моделях, описывающих процесс сушки, используется некоторое среднее значение этого параметра, что ухудшает точность расчётов.

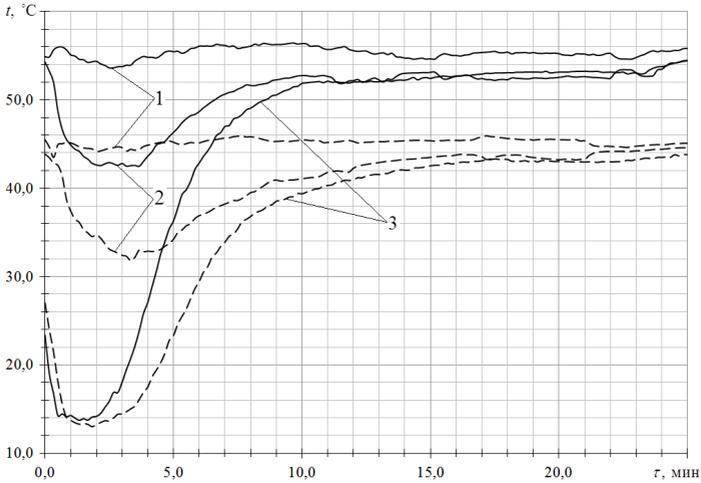


Рис. 5. Температурные кривые:

----- $t'_g = 45 \text{ }^\circ\text{C}$; ———— $t'_g = 55 \text{ }^\circ\text{C}$; 1 - t'_g ; 2 - t''_g ; 3 - t_m

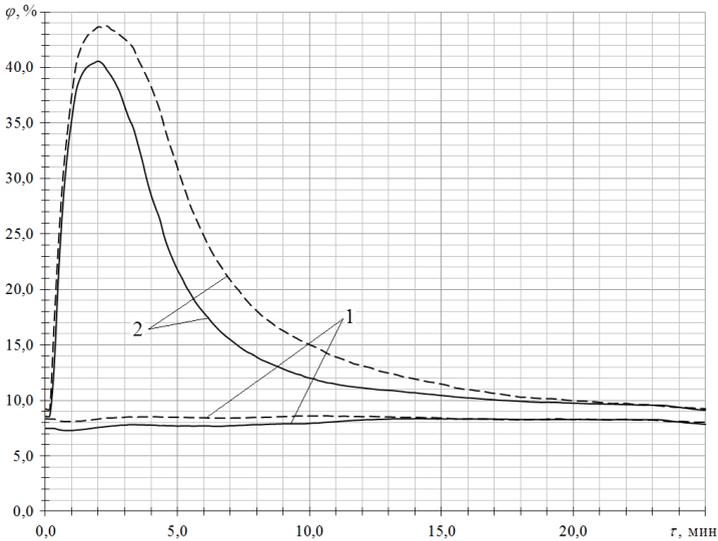


Рис. 6. Кривые влажности воздуха:

----- $t'_g = 45 \text{ }^\circ\text{C}$; ———— $t'_g = 55 \text{ }^\circ\text{C}$; 1 - ϕ' ; 2 - ϕ''

Полученные экспериментальные данные также позволят получить эмпирическую зависимость для коэффициента теплоотдачи, учитывающую влажность материала.

Также в нашей работе [9] была предложена полуэмпирическая математическая модель, описывающая процесс теплообмена в аппарате с движущимся псевдооживленным слоем. В результате аналитического решения модели получены временные зависимости температуры и влагосодержания материала и сушильного агента, содержащие эмпирический коэффициент – интенсивность сушки. Результаты экспериментального исследования позволят определить данный параметр для каждого режима сушки.

Библиографический список

1. **Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б.** Основы техники псевдооживления / Под ред. Н.И. Гельперина. М.: Химия, 1967. 664 с.
2. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
3. **Агапов Ю.Н.** Моделирование и разработка методов расчета процессов гидродинамики и теплообмена в аппаратах с центробежным псевдооживленным слоем: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04. Воронеж: ВГТУ, 2005. 313 с.
4. **Прутских Д.А.** Гидродинамика и теплообмен в регенераторе с дисперсной насадкой: Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. Воронеж: ВГТУ, 2009. 100 с.
5. Экспериментальное исследование процесса сушки силикагеля в аппарате с центробежным псевдооживленным слоем / А.А. Надеев, А.В. Бараков, В.Ю. Дубанин, А.Ю. Андреев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14, № 2. С. 44-50.
6. Methods for processing experimental drying kinetics data / Kemp I.C., Fyhr B.C., Laurent S. and oth. // Drying Technology. 2001. V. 19. № 1. С. 15-34.
7. **Лыков А.В.** Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
8. **Коновалов В.И., Гатапова Н.Ц.** Макрокинетика промышленных процессов // Теоретические основы химической технологии. 2004. Т. 38, № 2. С. 123-132.
9. The asymptotic solution of model equations for heat capacities of fluidized bed phases / A.V. Barakov, A.P. Byrdin, V.Y. Dubanin A.A. Nadeev // Journal of Physics: Conference Series. 2017. № 891. P. 012325.

УДК 666.945

ВТОРИЧНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПОНЕНТ КАК СКРЫТЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТА*

Аспирант **Панова О.А.**

Магистрант **Гончаров А.А.**

Канд. техн. наук, доц. **Коновалов В.М.**

Д-р техн. наук, проф. **Беседин П.В.**

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

***Аннотация.** Исследовано влияние пластифицирующих реагентов различного химического состава на рео-технологические свойства сырьевого цементного шлама. Определено, что снижение влажности сырьевого шлама с 41 % до 35,5 % позволит снизить расход топлива на 23,3 к.у.т./т клинкера.*

***Ключевые слова:** сырьевой шлам, пластифицирующие реагенты, влажность, удельный расход топлива, энергоресурсы.*

Проблема рационального использования полезных ископаемых и энергетических ресурсов – это глобальная проблема человечества. В технологии производства цемента имеются способы, после внедрения которых возможно значительное снижение энергоресурсов: снижение энергоресурсов за счет изменения состава сырьевой смеси; экономия энергоресурсов за счет изменения состава цемента [1]. Одним из подходов к решению вопросов снижения энергозатрат при обжиге шламов – это уменьшение содержания влаги, за счет использования пластифицирующих реагентов. Снижение влажности шлама сказывается на процессах, происходящих в газовом потоке, с учетом адгезионно-когезионных свойств сырьевого шлама [2]. Неоднократно научно-исследовательскими работами доказывалось, что с помощью введения в шихту специальных добавок повышается вероятность снижения влажности шлама. В настоящее время стоит выбор за новыми супер- и гиперпластификаторами [3-5].

Целью исследования является сравнительная оценка влияния пластифицирующих реагентов на возможность энергосбережения при обжиге цементного клинкера.

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

Материалы и методы исследования.

В работе использовали полипласт СП-1 (смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфонокислот), линамикс ПК (на основе полиоксиэтиленовых производных полиметакриловой кислоты), а также гиперпластификатора Viscocrete 20HE (на основе поликарбоксилатных эфиров), а также применяемые в производстве цемента углещелочной реагент (УЩР), лигносульфонат кальция (ЛСТ).

Определялось минимально возможные дозировки пластифицирующего реагента при сохранении растекаемости образцов шлама, согласно технологическому регламенту, на уровне 54 ± 2 мм на приборе МХТИ ТН-2.

Минералогический состав исходных сырьевых компонентов по данным рентгенофазового анализа, выполненного на дифрактометре ARL X'TRA, приведен в табл. 1.

*Таблица 1***Минералогический состав исходных сырьевых компонентов, мас. %**

Наименования компонента	Кальцит	Монтмориллонит	Каолинит	Полевые шпаты	Кварц
Мел	96,1	–	–	–	3,4
Глина 1	–	14,1	82,2	3,7	–
Глина 2	5,4	15,9	13,7	17,0	45,6

Состав шихты для приготовления сырьевого цементного шлама, мас. %: глина 1 – 2,00; глина 2 – 14,98; железосодержащая добавка – 2,54, остальное мел – 80,67. Сырьевой цементный шлам получали совместным помолом с водой в шаровой мельнице исходных сырьевых материалов до остатка на сите № 008 – 6-8 мас. %. Содержание пластификаторов в цементных шламах варьировалось от 0,1 до 1,0 мас. % по сухому веществу.

Зависимость, представленная на рис. 1, показывает, что требуемую растекаемость 54 ± 2 мм достигается при влажности около 41 %.

Основополагающим компонентом, влияющим на реотехнологические свойства сырьевого шлама является глинистый компонент. Так, минерал каолинит практически не поглощает воду и не набухает в ней, в результате этого сырьевой цементный шлам имеет более низкую водопотребность. При наличии в природной глине минерала бентонита, влагопотребность сырьевого шлама увеличивается.

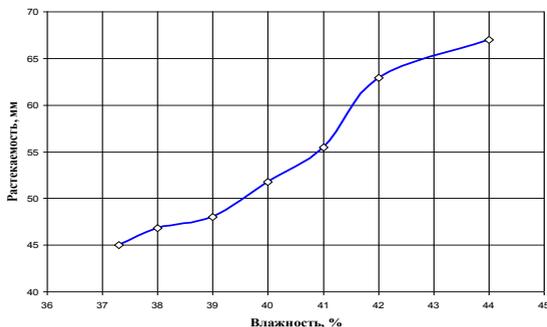


Рис. 1. Зависимость влажности сырьевого цементного шлама на растекаемость

Дальнейшими исследования представлены результаты снижения влажности до 35,5 % при этой же растекаемости. Снижение влажности, позволит снизить затраты тепла на испарение влаги из сырьевого цементного шлама.

Результаты исследований приведенных на рис. 2, показывают, что явного преимущества между суперпластификаторами и пластификаторами не наблюдается.

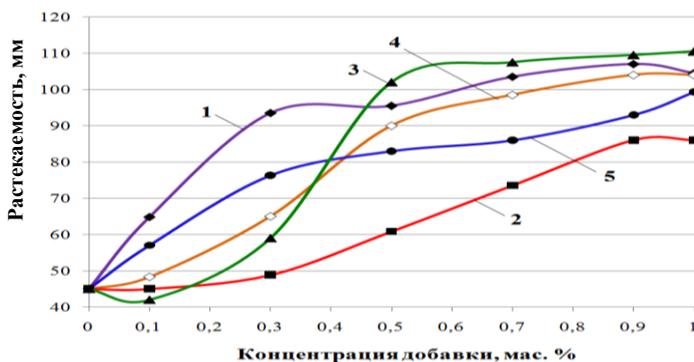


Рис. 2. Влияние изучаемых реагентов на растекаемость приготовленных образцов модельного цементного шлама:

1 – Полипласт СП-1; 2 – Линамикс ПК; 3 – Viscocrete; 4 – УЦР; 5 – ЛСТ

Введение 0,1 мас. % ЛСТ и Полипласт СП-1 в состав сырьевой смеси в одинаковой мере увеличивают показатель растекаемости до 57,0 и 64,8 мм соответственно. Введение в состав сырьевой смеси гиперпластификатора Viscocrete (рис. 2, кривая 3), показало, что этот реагент проявляет свои пластифицирующие действия при концентрации более 0,3 мас. %. При введении этого реагента наблюдалось пенообразование, которое возникает за счет воздухововлекающего действия его на шламовую суспензию. Этот фактор является недостатком этого пластификатора.

На основании экспериментальных данных были определены оптимальные концентрации исследуемых пластифицирующих реагентов (табл. 2).

Таблица 2

**Оптимальные концентрации пластифицирующих реагентов
для модельного сырьевого шлама**

Наименование добавки	Оптимальная концентрация добавки, мас. %	Растекаемость, мм
Бездобавочный	0	45,0
Полипласт СП-1	0,1	64,8
ЛСТ	0,1	57,0
УЩР	0,3	65,0
Viscocrete20HE	0,3	59,0
Линамикс-ПК	0,5	60,8

Работой [6], подтвержден теоретический и экспериментальный факт эффективности использования углещелочной добавки, не только как реагента улучшающего рео-технологические свойства шлама, и как источник дополнительного тепловыделения в области температур 200-450 °С, что в свою очередь приводит к экономии тепловой энергии.

Снижение влажности шлама на 1 % повышает производительность печи на 1,5 % и дает экономию на 2-2,5 % топлива [7] или на 5,3 кг у.т./т клинкера [7].

Согласно основным законам составления теплового баланса [9, 10], произвели расчет характеристик вращающей печи по усредненным основным параметрам печи, а также по параметрам, полученным после выявления процента снижения влажности сырьевого цементного шлама, при сохранении температуры клинкера на выходе из печи (табл. 3).

Таблица 3

Тепловой баланс цементной вращающейся печи

Приход теплоты	Количество кДж/кг кл-ра		Расход теплоты	Количество кДж/кг кл-ра	
Влажность, %	41	35,5	Влажность, %	41	35,5
1. От сгорания топлива	6500	5818	1. ТЭЖ	1841	
2. С сырьем	62	53	2. На испарение воды	2687	2129
3. С вторичным воздухом	1070	997	3. Потери с клинкером	1296	
4. С пылевозвратом	37	34	4. Потери с отходящими газами	1151	998
			5. Потери с пылеуносом	79	73
			6. Потери в окружающую среду через корпус	623	576
Итого	7669	6902	Итого	7677	6913

Невязка баланса составила 0,1 %:

В расчетах были использованы следующие технологические характеристики: коэффициент избытка воздуха – 1,1; температура отходящих газов – 210 °С при изменении производительности работы печи с 70 т/ при обжиге шлама с влажностью 41 % и 75,8 т/ч с влажностью шлама 35,5 %. Согласно методике [9], произвели расчет потерь в окружающую среду. Из уравнений теплового баланса определили удельный расход топлива на обжиг 1 кг клинкера (Хт). При влажности сырьевого цементного шлама 41%, Хт составил 221,8 к.у.т./т клинкера, для шлама влажностью 35,5 % Хт составил 198,5 к.у.т./т клинкера. Полученные значения подставили в приходные и расходные статьи теплового балансов вращающейся печи.

Выводы

1. Результаты, представленные в данном исследовании, действительны для предложенного модельного сырьевого шлама и конкретных добавок, используемых в экспериментальной методике. Другие комбинации исходных сырьевых компонентов и добавок будут иметь иные конечные характеристики (реологические, технологические и теплотехнические) сырьевого шлама для производства цемента.

2. При снижении влажности сырьевого шлама на 5,5 % при сохранении нормальной текучести 54±2 мм, за счет ввода пластифицирующих добавок в количестве 0,1-0,4 мас. %, обеспечивает снижение удельного расхода топлива при производстве цемента по мокрому способу на 23,3 кут/т клинкера.

3. Расчеты тепловых балансов показали, что основное снижение расхода топлива происходит за счет уменьшения потерь тепла на испарение влаги с 2687 до 2129 кДж/кг, с отходящими газами с 1151 до 998 кДж/кг, при неизменном ТЭК. Потери теплоты с отходящими газами снизились на 13 %, связано с уменьшением объема выбрасываемых газов, что позволит снизить нагрузку на дымососы.

4. Снижение количества выносимых газов из печи приводит к снижению пылеуноса за счет снижения скорости газового потока. Уменьшение нагрузки на дымосос приведет к экономии электроэнергии.

Библиографический список

1. **Здоров А.И., Златковский А.Б.** Современные направления экономии энергоресурсов в цементной промышленности Украины [Электронный ресурс] // Сборник «Строительные материалы и изделия» 2007 г. URL: <http://sbcmi.ru/sovremennye-napravleniya-ekonomii-energoresurov-v-tsementnoj-promyshlennosti-ukrainy/>.

2. Повышение эффективности тепломассообменных процессов в производстве цемента / В.М. Коновалов, С.А. Перескок, М.А. Петрова, А.Н. Образумов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 176-181.

3. Effect of PCs superplasticizers on the rheological properties and hydration process of slag-blended cement pastes / M. Palacios, F. Puertas, P. Bowen, Y. F. Houst // Journal of Materials Science. 2009. V. 44, Issue 10. P. 2714-2723.

4. **Chen B.** Effects of an AMPS-Modified Polyacrylic Acid Superplasticizer on the Performance of Cement-based Materials // Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2015. Vol. 30, Is. 1. P. 109-116.

5. **Товаров Е.И., Ходоров В.В., Гинзбург Ю.М.** Повышение производительности вращающихся печей за счет применения разжижителей шлама // Цемент. 1950. № 6. С. 3-6.

6. **Бушуева Н.П., Панова О.А.** Энергетические аспекты воздействия углещелочной добавки на дегидратацию глинистых минералов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 180-184.

7. **Кузнецов А.М.** Технология вяжущих веществ и изделий из них: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1963. 455 с.

8. Некоторые направления энергосбережения в производстве цемента / П.В. Беседин, П.А. Трубаев, О.А. Панова, Б.М. Гришко // Цемент и его применение. 2011. № 2. С. 130-134.

9. **Дешко Ю.И.** Наладка и теплотехнические испытания вращающихся печей на цементных заводах. М.: Госстройиздат, 1962. 244 с.

10. **Farag L. M.** Assessment of the Application of a Ca-Looping Cycle for CO₂ Capture in an Egyptian Cement Kiln Plant // Building materials. 2017. V. 66, Is. 5. P. 157-165.

УДК 504.064.47

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИГЛОФРЕЗЕРНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ*

Д-р техн. наук, проф. **Севостьянов В.С.**

Аспирант **Горягин П.Ю.**

Аспирант **Бабуков В.А.**

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

***Аннотация.** В данной статье представлены особенности переработки техногенных полимерных материалов и их специфические физико-механические свойства. Предложены основные направления конструктивно-технологического совершенствования измельчителей комбинированного действия, а именно разработка агрегатов с использованием иглофрезерных рабочих органов. Представлены результаты экспериментальных исследований процесса измельчения полимерных материалов иглофрезерными рабочими органами.*

***Ключевые слова:** ресурсосбережение, энергоэффективное оборудование, переработка и утилизация, измельчение, техногенные полимерные материалы.*

В связи с возрастающим объёмом техногенных полимерных материалов (ТПМ) актуальной задачей является их комплексная переработка и утилизация. Наиболее рациональным способом переработки ТПМ является получение новых материалов и изделий из техногенного сырья [1].

В связи с этим, целью проводимых нами исследований является разработка и исследования ресурсоэнергосберегающей технологии и технических средств для комплексной переработки и утилизации ТПМ.

В настоящее время основными способами утилизации и регенерации полимерного сырья являются: термоутилизация с получением тепловой и электрической энергии, механотермическая переработка (пиролиз, термолиз и др.), переработка с дальнейшим производством новых изделий [2]. Значительное место в утилизации ТПМ занимает спо-

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

соб механотермической переработки – пиролиз [3]. Несмотря на ряд недостатков, пиролиз, в отличие от процессов сжигания, дает возможность получения промышленных продуктов, используемых для дальнейшей переработки. Еще одним способом термической трансформации вторичного полимерного сырья является термолиз, при котором деструкция техногенных материалов осуществляется при более низких температурах [4]. В некоторых случаях такие технологические режимы позволяют получать мономеры, например, при термолизе полиэтилен-терефталата. Однако для повышения эффективности процесса требуется модификация отходов.

Для механотермической переработки подходят такие виды пластика как полиэтилен-терефталат (ПЭТ), полиэтилен низкого давления (ПЭНД), полиэтилен высокого давления (ПЭВД), полипропилен (ПП), полистирол (ПС) [5]. Не пригодны – поливинилхлориды и фторопласты.

Технологический процесс термической переработки полимеров можно разделить на две стадии: подготовительную и основную [6]. Подготовительная стадия предназначена для придания сырью определенных физических, реологических и качественных характеристик: определенный фракционный состав, насыпная плотность, сыпучесть, влажность, загрязненность. В основной стадии происходит деструкция материала при температуре $t_d = 400 \div 500$ °С.

Продуктами, получаемыми в результате термической переработки полимеров являются: 1) углеводородное топливо; 2) технический углерод; 3) термолизный газ. Качество и количество получаемых продуктов зависит от исходного сырья.

Одним из перспективных направлений переработки отходов пластмасс является получение порошкообразных полимерных материалов [7]. Это обеспечивает достижение положительных технологических и экономических результатов: получение высококачественных композиционных смесей, уменьшение температуры плавления ТПМ, возможность расширения номенклатуры производимых изделий различного технологического назначения и др.

При переработке ТПМ процесс измельчения является стадией с наибольшими удельными энергозатратами [8]. Для снижения энергоёмкости процесса диспергирования ТПМ чаще всего реализуются технологии криогенного и высокоскоростного измельчения [9]. При криогенном способе измельчения с использованием сжиженного азота исходный продукт охлаждается до температуры $t = -70 \div -80$ °С. Параметр t меньше температур стеклования полимеров $t_c = 73 \div 80$ °С для ПЭТ, $t_c = -25$ °С для ПЭВД, $t_c = -20$ °С для ПП, $t_c = 74 \div 105$ °С

для ПС, что позволяет увеличить хрупкость материала и повысить эффективность механического воздействия рабочих органов измельчительного оборудования.

При высокоскоростном измельчении частота воздействия элементов рабочего органа на частицы материала должна быть больше периода их релаксации. При этом в материале резко возрастают внутренние напряжения, что способствует их эффективному измельчению.

При разработке энергоэффективного оборудования для переработки ТПМ особое внимание должно уделяться их физико-механическим характеристикам, таким как: упругость, пластичность, температура плавления и др.

Одним из направлений конструктивно-технологического совершенствования измельчительного оборудования, направленных на снижение энергоёмкости процесса измельчения, является применение рабочих органов с развитой поверхностью.

В настоящее время нами разработаны multifunctional технологические агрегаты с иглофрезерными рабочими органами, обеспечивающими избирательное комплексное воздействие на перерабатываемые материалы. При этом осуществляется энергоэффективное воздействие стержневых элементов, которые своими игольчатыми концами реализуют механизмы разрушения полимеров [10].

Для исследования процесса измельчения техногенных полимерных материалов иглофрезерными рабочими органами на кафедре «Технологические комплексы, машины и механизмы» БГТУ им. В.Г. Шухова разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальная установка с иглофрезерными рабочими органами

Установка содержит иглофрезерные рабочие органы с радиальными стержневыми элементами, установленные в камере измельчения на валу электродвигателя. Над камерой измельчения установлен загрузочный бункер с шиберной задвижкой, а в нижней части камеры – классифицирующая сетка. Интенсивность процесса измельчения во многом зависит от зазора между стенками камеры и торцами стержней иглофрезерных рабочих органов.

При измельчении материала стержнями цилиндрической иглофрезы реализуется высокоскоростной удар с истиранием. В процессе воздействия иглофрезы на частицы перерабатываемого материала образуются многочисленные микродефекты их структуры – сколы и срезы микрообъемов с более крупных частиц. Применение иглофрезерных рабочих органов позволяет многократно увеличить количество единичных актов взаимодействия стержневых элементов с материалом, что позволяет интенсифицировать процесс измельчения материалов, в частности ТПМ.

При проведении экспериментальных исследований моделировался процесс многостадийного измельчения [11]. Исходными материалами являлись пластиковые отходы потребления: ПЭТ, ПЭНД, ПП, ПС. Материалы предварительно измельчались в шредере и молотковой дробилке до размеров частиц менее 10 мм.

Измельчение материалов иглофрезерными рабочими органами осуществлялось в экспериментальной установке со следующими техническими характеристиками: мощность электродвигателя – $N = 1,7$ кВт, частота вращения ротора – $n = 2820$ мин⁻¹, диаметр отверстий классифицирующей сетки – $d_{\text{отв.с}} = 4 \cdot 10^{-3}$ м.

Для определения фракционного состава материала после каждого эксперимента производился рассев измельченного материала на ситах с диаметром отверстий 1, 2, 3 и 4 мм (рис. 2).

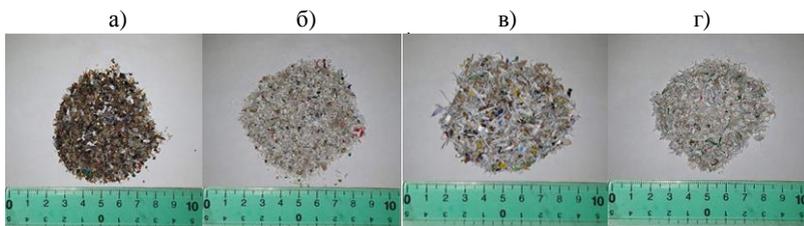


Рис. 2. Материал после измельчения:
а) ПЭТ, б) ПЭНД, в) ПП, г) ПС

По полученным данным построены дифференциальные кривые распределения частиц материала (рис. 3).

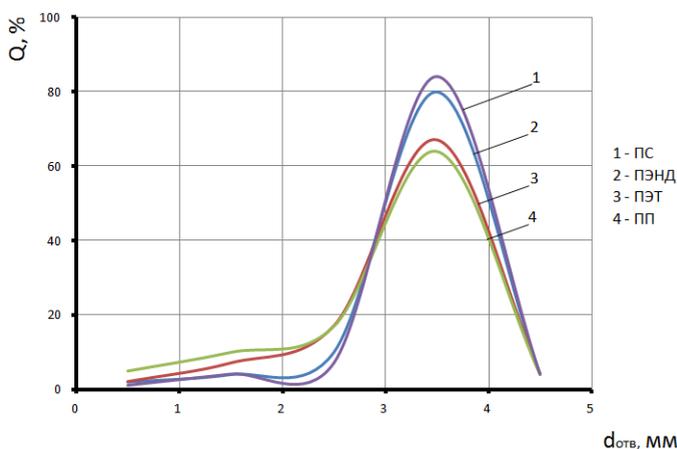


Рис. 3. Дифференциальные кривые распределения частиц материала

В результате проведенных экспериментов установлено расположение ТПМ по измельчаемости: ПС > ПЭНД > ПЭТ > ПП. Более высокие значения степени измельчения соответствуют полипропилену, проявляющему большую хрупкость и меньшую ударную вязкость в сравнении с другими видами пластика.

Вследствие высокоскоростного вращения ротора воздушно-материальный поток отбрасывается к периферии камеры измельчения. Материал, размер которого превышает диаметр отверстий классифицирующей сетки, пролетает через неё, т.к. ТПМ обладают упругопластическими свойствами. Это свидетельствует о необходимости организации внешнего рециклинга материала в технологическом процессе.

Выводы.

1. Проведен анализ ресурсоэнергосберегающих технологий комплексной переработки ТПМ. Для производства высококачественных композиционных смесей необходима разработка специального оборудования, позволяющего достичь высокой степени измельчения полимерных материалов.

2. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили целесообразность и эффективность применения иглофре-

зерных рабочих органов для измельчения ТПМ с различными физико-механическими характеристиками.

3. В результате анализа фракционного состава ТПМ, измельченных иглофрезерными рабочими органами, установлено расположение полимерных материалов по измельчаемости, а также выявлены особенности их переработки, являющиеся предпосылками для дальнейшего конструктивно-технологического совершенствования измельчительного оборудования.

Библиографический список

1. Малотоннажные технологические комплексы и оборудование (основы научных исследований – практическое руководство): учеб. пособие / В.С. Севостьянов, В.И. Уральский, М.В. Севостьянов и др. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. 450 с.

2. **Орлецкая Л.В.** Ценные вторичные ресурсы // Рециклинг отходов. 2006. № 6. С. 3-4.

3. **Супрун Л.В., Романенко С.В., Цыганкова Т.С.** Анализ и решение проблемы утилизации и вторичной переработки полиэтилентерефталат (ПЭТ) отходов // Вестник науки Сибири. 2012. № 4 (5). С. 107-112.

4. Анализ существующих способов утилизации и переработки отходов полимеров / Э.В. Гоголь, И.Х. Мингазетдинов, Г.И. Гумерова и др. // Вестник Казанского технологического университета, 2013. № 10. С.163-168.

5. **Быстров Г.А., Гальперин В.М., Титов Б.П.** Обезвреживание и утилизация отходов в производстве пластмасс. Л.: Химия, 1982. С. 178–214.

6. **Бочавер К.З., Клушин В.Н., Шамгулов Р.Ю.** Модернизация химического оборудования: спиральный транспортер – интенсивный химический реактор // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2014. № 8. С. 30-33.

7. Исследование процесса измельчения полимерных материалов / М.А. Киркор, В.А. Шуляк, А.В. Евдокимов, А.Г. Смусенок // Вестник Белорусско-Российского университета. 2017. № 3 (16). С. 31-39.

8. Сравнение различных видов измельчителей // Матер. первой конф. по сравнению различных видов измельчителей. Часть 1. Под ред. П.Ф. Овчинникова. Одесса: ОГМА, 1993. 130 с.

9. **Арашкевич Д.А.** Вторичная переработка отходов пластмасс и специальные роторные дробилки // Пластические массы. 2003. № 3. С. 5-13.

10. 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.

11. Техника и технологии для экструдирования и сушки техногенных материалов / Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Гридчин А.М. и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 118-123.

УДК 62-932.2

РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ КОМУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ*

Д-р техн. наук, проф. **Севостьянов В.С.**¹

Аспирант **Шамгулов Р.Ю.**¹

Директор **Шенн. Н.Т.**²

Нач. отдела **Оболонский В.В.**²

Аспирант **Бабуков В.А.**¹

¹Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород
²ООО «ТК «Экотранс», г. Белгород, Россия

***Аннотация.** Предлагаемая технология и технические средства, позволяют решать целый комплекс научно-технических, исследовательских, конструкторско-технологических и экологических проблемных задач, с учетом условий действующих отечественных производств, направленных на реализацию приоритетных направлений Стратегии экологической безопасности РФ, а также на устранение существующих технических и ресурсо-технологических ограничений для развития экономики страны в области ресурсо-энергосбережения и природоохранной деятельности.*

***Ключевые слова:** ресурсосбережение, энергосбережение, твердые коммунальные отходы (ТКО), экологическая безопасность, измельчение, компактирование, термолиз, рециклинг тепловых и материальных потоков.*

Существующее положение

Возрастающие объёмы промышленного производства, опережающие развитие вторичной переработки техногенного сырья, а также неуклонное увеличение потребления энергии (по данным Мирового Энергетического Конгресса в 3,25 раза к 2050 г.), непрерывно усиливают антропогенно-экологическое воздействие на окружающую среду. [1].

Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до конца 2025 года, утверждённая Указом Президента РФ В.В. Путина от 19.04.2017 г. № 176, Федеральный закон «Об отходах про-

* Работа выполнена в рамках государственного задания № 9.11523.2018/11.12

изводства и потребления» № 458-ФЗ от 29.12.2014 г. свидетельствуют о включении проблемы комплексной переработки техногенных материалов (ТМ) в число важнейших государственных ресурсо-энергосберегающих и экологических задач на ближайшие десятилетия. [2].

Цель работы: разработка ресурсоэнергосберегающей технологии и технических средств для комплексной переработки твёрдых коммунальных отходов с получением органоминеральной товарной продукции, выработки теплоэлектроэнергии из компактированных отходов, а так же снижении экологической нагрузки на окружающую среду.

Содержательная часть

В данной технологии разработана система взаимодействия технологических потоков друг с другом, позволяющая использовать внутренние энергетические ресурсы предприятий.

Авторским коллективом, в составе научных работников БГТУ им. В.Г. Шухова, специалистов ООО «ТК «Экотранс» и ООО «НПП Термолиз» разработана ресурсоэнергосберегающая технология и оборудование для комплексной переработки техногенных материалов, поступающих на полигон ТКО. Используемые ТКО содержат в себе большой теплоэнергетический потенциал. Для его оценки был произведен расчет количества внутренней энергии по содержанию углерода в органическом материале ТКО, исходя из объемов годовой переработки отходов на полигоне ООО «ТК «Экотранс». Проведенные нами расчеты [3] показывают, что при использовании исходного органического сырья (65 % от всей массы ТКО) с общей влажностью $W = 45\%$ содержания углерода в органике 33% и теплоте сгорания 1г. углерода $Q_{\text{уг}} = 24,2$ кДж количество потенциальной (неиспользуемой) тепловой энергии в органической составляющей ТКО, поступающих на производственные площадки ООО «ТК «Экотранс», составляет $Q_{\text{тбо}} = 393394,15 \cdot 10^6$ кДж. При этом, количество тепловой энергии, необходимой для сушки всей увлажненной массы ТКО ($M_{\text{тбо}} = 137983,17$ т.), составляет $Q_{\text{тбо суш}} = 143171,94 \cdot 10^6$ кДж.

Таким образом, полученные данные позволяют утверждать, что неиспользованный энергетический потенциал тепловой энергии ($\Delta Q = Q_{\text{тбо}} - Q_{\text{тбо суш}} = 250769,21 \cdot 10^6$ кДж) рационально может быть использован для снижения материальных и финансовых затрат различных видов товарной продукции из вторичного сырья.

На рис. 1 представлена схема сырьевых потоков.

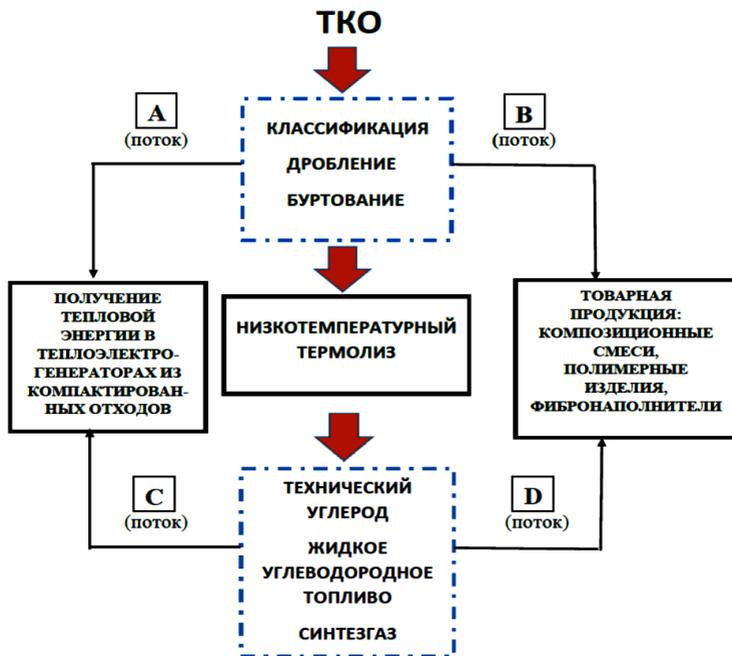


Рис. 1. Схема движения сырьевых потоков

При поступлении на полигон ТКО из общей массы техногенных отходов выделяют древесные и базальтовые волокнистые материалы. Древесные отходы, после дробления и компактирования (способом брикетирования, экструдирования, прокатки и др.), являются сырьем для теплоэлектростанций, а волокнистые, после измельчения, используются в качестве фиброполнителей для приготовления композиционных смесей и производства из них различных видов товарной продукции.

Оставшаяся часть отходов проходит первичную сортировку в барабанном классификаторе с выделением крупных $\geq 70,0$ мм агломератов и ручную (или автоматическую) с отбором запрещенных к захоронению фракций, в частности пластмассы, содержание которой в общем объеме достигает 15-20% [4]. Остающиеся после сортировки, т.н. «хвосты», измельчаются и направляются на буртование или термолиз, в зависимости от загруженности площадки и линии.

Дробление исходного сырья, является необходимой операцией при переработке техногенных материалов различного морфологического и фракционного состава. Это позволяет уменьшить объем и придает сырью условную однородность. Такие операции невозможны без применения специального оборудования, особенно при измельчении техногенных волокнистых материалов (ТВМ).

В БГТУ им. В.Г. Шухова разработан технологический комплекс для переработки ТВМ, включающий в себя патентозащищенный вибрационно-центробежный агрегат [5], обеспечивающий комплексную переработку ТВМ и получение коммерциализируемых конечных продуктов, в том числе, фибронаполнителей для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из них [6 – 8], а также для перспективных 3D технологий. Такая технология носит название FDM (Fused Deposition Modeling – моделирование методом послойного наплавления) [9].

Остающиеся после сортировки и дробления, а также находящиеся на ферментации в буртах «хвосты», перерабатываются с применением технологии и оборудования низкотемпературного термолиза.

Технологический процесс осуществляют в непрерывном режиме при давлении близком к атмосферному и умеренной температуре – до 500⁰С. При таких параметрах процесса низкотемпературный термолиз в герметичном оборудовании без доступа кислорода воздуха исключает образование и выброс вредных и ядовитых веществ, таких как, например, диоксины. Согласно публикации [10], одним из условий образования диоксинов, является температурный диапазон 500-1200⁰С.

Реакторная система для проведения низкотемпературного термолиза была изучена и исследована при переработке резиновой крошки, полученной при дроблении старых шин и прочих резинотехнических отходов [11]. Основным рабочим элементом указанной системы является спиралевидный транспортирующий орган [12], который в отличие от шнека не имеет вала, что позволяет исключить образование при транспортировке застойных зон [13].

Достоинствами такой системы, являются:

- непрерывность ввода сырья и вывода продуктов;
- невысокое давление в системе 0,1-0,2 МПа;
- эффективный теплообмен, вследствие постоянного ворошения реагентов спиралевидным транспортирующим органом;
- незначительное время пребывания в реакторе, $\tau \leq 20$ мин.;
- возможность регулирования потоков сырья и реагентов;

- создание условий для ввода-вывода дополнительных реагентов в виде пара, газов или жидкости;
- низкотемпературный режим процесса, $t \leq 500^{\circ}\text{C}$.

Использование оборудования и процесса низкотемпературного термолиза в переработке «хвостов» ТКО позволяет получать товарные продукты из вторичных полимерных отходов. В настоящее время на полигоне ТКО ООО «ТК «Экотранс» г. Белгород проводятся опытно-промышленные испытания технологического модуля разработанной конструкции (рис. 2).



Рис. 2. Опытно-промышленный технологический модуль низкотемпературного термолиза

Экспериментальные данные подтверждают получение следующих видов товарной продукции (в процентном отношении по массе от исходного сырья – «хвостов»):

- технический углерод (твердый углеродный остаток) – до 30%;
- техническая вода, с содержанием водорастворимых кислот – до 25 %;
- жидкое углеводородное топливо – до 15%;
- углеводородный газ – до 20%;
- прочие включения (мелкая фракция камней, металла, стекла) – до 10%;

На рис. 3 показана схема установки низкотемпературного термолиза.

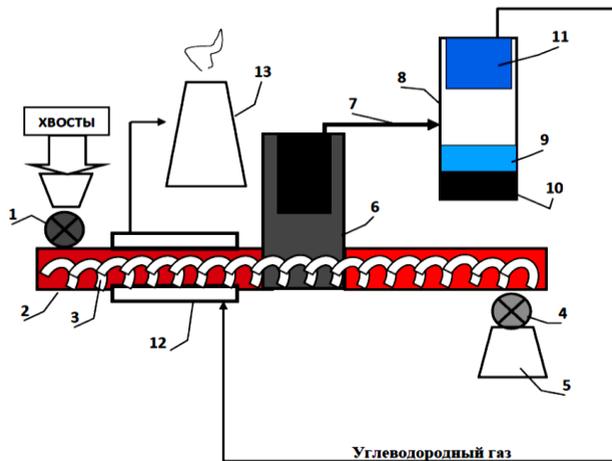


Рис. 3. Схема технологического модуля низкотемпературного термоллиза:

1 – питатель; 2 – реактор термоллиза; 3 – спиралевидный транспортирующий орган; 4 – устройство выгрузки твердого продукта; 5 – приемный узел шнекового транспортера; 6 – фильтр; 7 – трубопровод парогазовой смеси; 8 – ректификационная колонна; 9 – секция отбора технической воды; 10 – секция отбора жидких углеводородов; 11 – секция отбора углеводородного газа; 12 – рубашка обогрева реактора; 13 – дымовая труба.

Технологический модуль и его конструктивно-технологические решения содержат элементы « ноу-хау» и позволяют варьировать параметры в заданном диапазоне.

Измельченные «хвосты» ТКО подают в загрузочную камеру питателя 1. Далее масса продвигается вдоль реактора 2 с помощью спиралевидного транспортирующего органа 3, кинематически связанного с мотор-редуктором. Под действием температуры, происходит разложение органической массы на твердый углеродный остаток и парогазовую смесь. Через устройство выгрузки твердого продукта 4 из реактора выводится твердый углеродный остаток в приемный узел 5. Пройдя через фильтр-сепаратор 6, парогазовая смесь по трубопроводу 7, поступает в ректификационную колонну 8, где разделяется на техническую воду, отбираемую из секции 9 и жидкие углеводороды, поступающие из секции 10. Не сконденсировавшийся углеводородный газ, отбираемый из секции 11, сжигается в горелках для обогрева реактора. Дымовые газы, образующиеся при горении, пройдя через рубашку обогрева реактора 12, выводятся через дымовую трубу 13.

Выводы по работе

Предлагаемая ресурсоэнергосберегающая технология и технические средства позволяют разделить общий объем ТКО на отдельные материально-сырьевые потоки. Каждый поток может быть использован как для выработки тепловой и электроэнергии [14], так и для получения различных видов товарной продукции:

- технический углерод;
- топливные брикеты из смеси отходов древесины и 10% технического углерода с удельной теплотой сгорания до 21,0 МДж/кг;
- фибронаполнители;
- полимерные изделия;
- жидкое углеводородное топливо с содержанием серы до 0,015%.

Получаемые виды товарной продукции могут быть использованы по различному технологическому назначению: для приготовления композиционных смесей с механоактивированными компонентами и фибронаполнителями; изготовления компактированных тел (гранул, брикетов, плиток и др.); для получения тепловой и электрической энергии из нетрадиционных видов топлива; получения высокоэффективных фильтрующих элементов с развитой внутренней поверхностью, поризованных наполнителей композиционных смесей и изделий из них и др.

Библиографический список

1. Сравнительная характеристика различных способов производства электроэнергии (часть первая) [Электронный ресурс]: URL: <http://www.atomic-energy.ru/papers/21258/> (дата обращения: 23.10.2019).
2. Использование золошлаковых отходов в качестве дополнительного цементирующего материала / Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Б.И. Булгаков и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 8 С. 19-27.
3. Технологические возможности использования термолита при переработке техногенных материалов / Н.Т. Шеин, В.С. Севостьянов, Р.Ю. Шамгулов и др. // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды: Межд. науч.-техн. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. С. 200-207.
4. **Золотарев Г.М.** Пиролизные реакторы высокой производительности для обезвреживания и переработки твердых коммунальных отходов // Экологический вестник России. 2019. № 3. С.41.
5. Пат. 2692624 С1 Рос. Федерация. Устройство и способ переработки волокнистых техногенных материалов для получения фибронаполнителей (варианты)/ М.В. Севостьянов, В.А. Полуэктова, В.С. Севостьянов и др.; заявитель и

патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2018131819; заявл. 03.09.2018; опубл. 25.06.2019, Бюл. №18.

6. Технологические условия комплексной переработки базальтовых волокнистых отходов в виброцентробежном агрегате комбинированного действия / М.В. Севостьянов, В.А. Бабуков, В.С. Севостьянов и др // Безопасность, защита и охрана окружающей среды: фундаментальные и прикладные исследования: Сб. трудов Всеросс. науч. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. С. 23.

7. **Оснос С. П.** Базальтовое непрерывное волокно – вчера, сегодня и завтра. Развитие технологий и оборудования, промышленных производств и сбыта. // Композитный мир. 2015. № 2. С. 24-30.

8. **Джигирис Д.Д., Махова М.Ф.** Основы производства базальтовых волокон и изделий: Монография. М.: Теплоэнергетик, 2002. 416 с.

9. **Horvath J.** Mastering 3D printing: Technology in action. NY: Apress, 2014. 224 p.

10. **Парфенюк А.С., Антонюк С.И., Топоров А.А.** Диоксины и техногенная безопасность [Электронный ресурс]. URL: http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=440 (дата обращения: 15.10.2019).

11. **Бочавер К.З.** Спиральные реакторы в гетерогенных технологических процессах. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2018. 200 с.

12. **Черышев М.А.** Транспортирующее оборудование в промышленности переработки пластмасс // Полимерные материалы. 2018. № 6. С. 34.

13. **Семиненко А.С., Уляшева В.М.** Поведение частиц порошкообразного материала при пневмотранспортной загрузке // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 12. С. 63-66.

14. Техника и технологии для экструдирования и сушки техногенных материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Гридчин и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 118-123.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИЗА МЕДИ ЗА СЧЕТ
ИДЕНТИФИКАЦИИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В
ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ ВАННАХ**

Канд. техн. наук, доц. **Федорова С.В.**
Канд. физ.-мат. наук, доц. **Худяков П.Ю.**
Зав. лабораторией **Лаптев В.А.**
*Технический университет УГМК,
г. Верхняя Пышма, Свердловская обл.*

***Аннотация.** В рамках данной работы были проанализированы методы обнаружения коротких замыканий в электролизных ваннах в процессе электролиза меди и построение на их основе цифровых систем мониторинга и систем поддержки принятия решений. Авторами разработана методика идентификации коротких замыканий и создан опытно-промышленный образец указателя коротких замыканий. Выбрано основное оборудование, разработана электрическая схема и написано программное обеспечение. Рассмотрены теоретические аспекты идентификации нарушения режимов работы электролизных ванн. Сделаны выводы о необходимости применения данного класса устройств.*

***Ключевые слова:** короткое замыкание; электролизная ванна; датчик Холла; указатель коротких замыканий; электролиз меди.*

Электролитическое рафинирование меди является одним из неотъемлемых технологических процессов при производстве катодной меди высокого качества [1]. Процесс рафинирования состоит из погружения медных анодов в электролит, расположенный в электролизной ванне (рис. 1). В зазоры между анодами размещаются катоды, представляющие из себя листы металла. Вдоль длинных сторон электролизной ванны расположены токопроводящие шины, по которым протекает постоянный ток низкого напряжения и высокой плотности. Соответственно, аноды подключены к положительной шине, а катоды к отрицательной. Далее, в результате электрохимической реакции медь переходит с анода на основание катода с выделением примесей в раствор электролита.

Одним из главных показателей, влияющих на производительность процесса электролиза, является стабильность режимов работы электролизной ванны, которая напрямую зависит от своевременного обнаружения и устранения коротких замыканий.

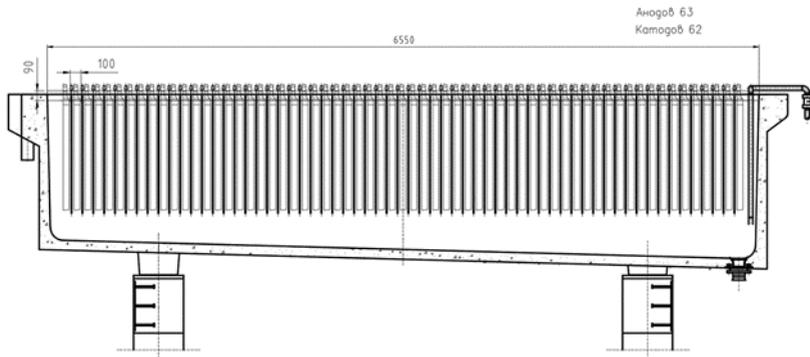


Рис. 1. Эскиз электролизной ванны для рафинирования меди

Степень использования тока на основной электрохимический процесс определяется величиной – выходом металла по току, на которую влияют следующие факторы:

- утечки тока, возникающие в результате заземления в цепи;
- утечки тока через циркуляционные трубопроводы электролита;
- короткие замыкания между электродами;
- побочные химические и электрические процессы;
- нагревание электролита и контактов.

Наиболее эффективным способом предотвращения возникновения коротких замыканий между электродами является ранняя диагностика их появления, соответственно, поиск методов диагностики является одной из приоритетных задач в достижении требуемого качества и объема выпускаемой продукции предприятия.

При ведении технологического процесса электрического рафинирования меди с точки зрения электротехники возможны две основные ситуации, это отсутствие контакта между шиной и электродом или возникновение короткого замыкания между анодом и катодом. Следует отметить, что расстояние между двумя соседними анодами не превышает 100 мм, соответственно возникновение коротких замыканий является достаточно вероятной ситуацией из-за малых расстояний между электродами.

Для обеспечения нормальной работы электролизной ванны и исключения непроизводительного потребления электрической энергии необходимо в процессе электролиза идентифицировать оба варианта нарушения параметров потребления тока.

Известны цифровые системы обнаружения коротких замыканий с использованием датчиков Холла, установленных на каждой паре электродов анод- катод и обеспечивающих измерение магнитной индукции, зависящей от величины тока, в том числе, тока короткого замыкания, основанные на сенсорном управлении и передаче данных каждые 5 минут с сервера измерения в базу данных SQL [2-6].

Предлагаются системы поддержки принятия решений путём автоматизированного осмотра всех пар электродов и проверки изменения цвета индикатора электродов при возникновении короткого замыкания. Для этого применяют нескольких видеокamer, перемещающихся вдоль крепления катодных штанг и фиксирующих изменение цвета индикатора, при котором формируется сообщение об этом с указанием номеров серии, блока, ванны и конкретной пары электродов, где произошло короткое замыкание [7].

В настоящее время развивается метод обнаружения коротких замыканий с использованием тепловизионных устройств, расположенных на крановых механизмах, которые могут кроме обслуживания ванн, выполнять операцию их сканирования с целью определения мест коротких замыканий и формирования заданий на их устранение [8].

Имеющиеся технические решения, с учетом специфики производственного процесса, не могут быть в полной мере реализованы. Одной из главных причин является невозможность изменения конструкции токопроводящих шин, расположенных вдоль ванн, с последующей установкой индивидуальных датчиков тока для каждой пары электродов или нанесение на шины термоиндикаторных покрытий.

Подобные решения хотя и обладают высокой селективностью и быстродействием, но при этом сопровождаются высокими капитальными затратами и не окупаются в принципе для существующих объектов [9-13].

Используется метод определения коротких замыканий с помощью системы Cell Sense путем измерения напряжения на ванне, но чувствительность мониторинга в таком случае низкая, так как напряжение на одной ванне в среднем 0,4 В, а между парой электродов анод-катод (на уровне которых и происходят короткие замыкания) примерно 0,006 В.

Разработка новых способов, преимущественно автоматизированных и автоматических, и улучшение существующих методов диагностики возникновения коротких замыканий в электролизных ваннах, доступных для применения в условиях цеха электролиза меди, является весьма актуальной задачей, одним из эффективных путей снижения потерь электроэнергии на электролиз, а также трудоемкости поддер-

жания параметров технологического процесса и стоимости эксплуатационных расходов.

Цель работы.

Повышение энергетической эффективности процесса электролиза меди путем сокращения потерь (затраты, время, содержание) посредством более раннего обнаружения коротких замыканий.

Разработка указателя коротких замыканий.

Задача решалась при условии высокого значения коэффициента использования тока – 0,98. Поэтому разработка указателя коротких замыканий должна была учитывать небольшой потенциал для улучшения процесса электролиза и повышения его энергоэффективности.

Для решения данной проблемы в НЧОУ ВО «Технический университет УГМК» была разработана методика идентификации коротких замыканий и разработан опытный образец указателя замыканий в электролизных ваннах с использованием современных микропроцессорных устройств и датчиков с цифровым интерфейсом.

Рассмотрим процесс протекания тока по аноду через электролит к катоду. Фактический схема замещения будет выглядеть следующим образом (рис. 2).

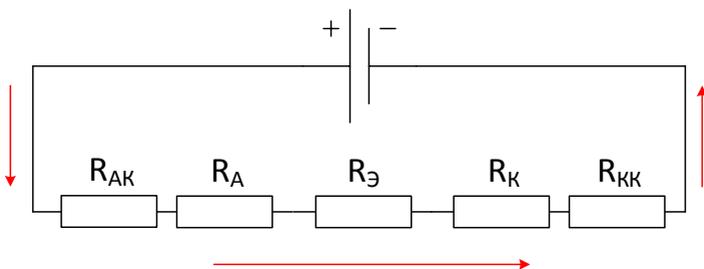


Рис. 2. Схема замещения процесса электролиза:

R_{AK} – контактное сопротивление между анодом и шиной; R_A – сопротивление анода; $R_{Э}$ – сопротивление электролита; R_K – сопротивление катода; R_{KK} – контактное сопротивление между катодом и шиной

В случае отсутствия контакта между шиной и анодом ($R_{AK} \rightarrow \infty$) или катодом ($R_{KK} \rightarrow \infty$), ток протекать через соответствующий элемент цепи не будет. При наличии короткого замыкания между анодом и катодом сопротивление электролита будет стремиться к нулю ($R_{Э} \rightarrow 0$), следовательно, ток через данную пару элементов будет значительно превышать нормальное значение. В соответствии с законом Био – Са-

вара – Лапласа, при протекании постоянного тока через проводник магнитная индукция пропорциональна величине тока. Таким образом, для идентификации обеих ситуаций достаточно измерить величину магнитной индукции и сформировать отображение его пороговых значений для эксплуатационного персонала.

Для практического применения разработанной методики был разработан опытный образец указателя коротких замыканий. В качестве основного элемента разрабатываемой схемы был выбран датчик TLV493D [14] с диапазоном ± 130 мТ, цифровым интерфейсом I2C и возможностью измерения по трем осям. С целью обработки показаний датчика и формирования цветовой индикации был использован микроконтроллер MSP430F2013 [15]. Выбор данного микроконтроллера обусловлен низким энергопотреблением и высокой производительностью ПЛК, т.к. указатель будет работать от аккумулятора. Внешний вид 3D-модели платы приведен на рис. 3.

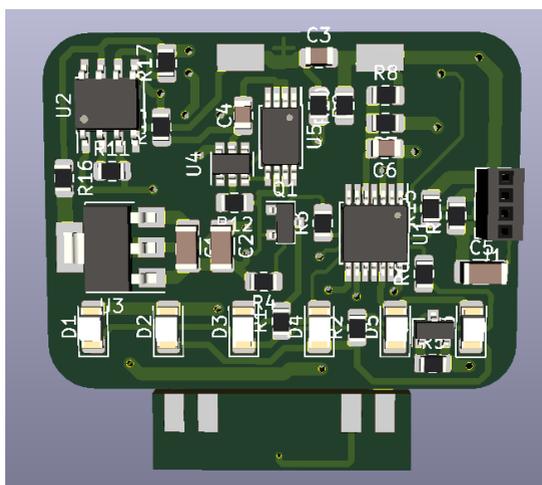


Рис. 3. Внешний вид 3D-модели платы указателя замыканий

В рамках разработки указателя коротких замыканий были произведены замеры интенсивности магнитного поля для всех возможных вариантов аварийных и нормальных режимов работы.

Зафиксирован нормальный уровень магнитной индукции в цехе, который соответствует нулевому току через анод, что означает отсутствие нормального контакта. Аналогичным образом определено нор-

мальное значение тока через аноды, кроме крайних, и величина магнитной индукции, соответствующая току короткого замыкания.

Индикация для эксплуатационного персонала осуществляется на 6 светодиодах с разным цветом свечения, означающим ту или иную аварийную ситуацию.

Выводы

Разработанный указатель короткого замыкания в электролизных ваннах позволяет бесконтактным методом определить наличие нарушения технологических параметров электролиза и своевременно предотвратить непроизводительное потребление электрической энергии.

Следующий шаг исследования целесообразно посвятить разработке системы мониторинга коротких замыканий с фиксацией положения указателя коротких замыканий и интенсивности магнитного поля.

Библиографический список

1. **Бледнов Б.П.** Электролитическое рафинирование меди и никеля: Учеб. пособие. Красноярск: Краснояр. гос. акад. цв. металлов, 2000. 81 с.
2. **Wiechmann, E.P., Morales A.S., Aqueveque P.E.** Full Measuring System for Copper Electrowinning Processes Using Optibar Intercell Bars // IEEE Transactions on Industry Applications. 2009. Vol. 45, № 5. P. 1-8.
3. Sliding Window Trend Analysis: A Method for Short and Open Circuit Detection in Copper Electrowinning / A.S. Morales, E.P. Wiechmann, P.E. Aqueveque, E. Pino // 2010 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 2010. P. 1-5.
4. **Aqueveque P.E., Wiechmann, E.P., Morales A.S.** System for the Measurement of Cathodic Currents in Electrowinning Processes That Employ Multicircuit Technology // IEEE Transactions on Industry Applications. 2010. Vol. 46, № 5. P. 1764-1768.
5. Triple segmented intercell bar: a contribution in copper electrowinning / E.P. Wiechmann, L.G. Munoz, P.E. Aqueveque et al // Towards Clean Metallurgical Processing for Profit, Social and Environmental Stewardship. 2012. P. 211-220.
6. Copper electrowinning circuit design: optimised costing as a function of cell arrangement, productivity, rectifier size and throughput / E.L. Forner, G.M. Miller, J. Scheepers, A.J. du Toit // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. № 118. P. 1141-1148.
7. О применении системы поддержки принятия решений в гидрометаллургии меди / Д.Н. Гронь, Е.А. Гронь, О.В. Кирякова и др. // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. С. 129.
8. «Норникель» стал лауреатом престижного конкурса «Проект года» по версии Global CIO [Электронный ресурс] / Телекомпания ТВ-21. URL:

<https://www.tv21.ru/news/2019/02/12/nornikel-stal-laureatom-prestizhnogo-konkursa-proekt-goda-po-versii-global-cio> (дата обращения 01.10.2019).

9. **Wiechmann E.P., Vidal G.A., Pagliero A.J.** Current-source connection of electrolytic cell electrodes: An improvement for electrowinning and electrorefinery // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2006. Vol. 42. № 3. P. 851–855.

10. Electrolytic Copper Refining / T. Robinson, J. Quinn, W. Davenport, G. Karcas // *World Tankhouse Operating Data.* 2003. Vol. V. P. 3–66.

11. **Aqueveque P.E., Wiechmann E.P., Burgos R.P.** Short-Circuit Detection for Electrolytic Processes Employing Optibar Intercell Bars // *IEEE Trans. On Industry Applications.* 2009. Vol. 45, №4. P. 1225-1231.

12. **Wiechmann E.P., Morales A.S., Aqueveque P.E.** Full Measuring System for Copper Electrowinning Processes using Optibar Inter-cell Bars // *IEEE Trans. On Industry Applications.* 2009. Vol. 45, №5. P. 1575-1582.

13. Encyclopedia of Electrochemistry, Electrochemical Engineering / A.J. Bard, M. Stratmann, D. McDonald, P. Schmuki. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH&Co.KGaA, 2007. 223 p.

14. TLV493D-A1B6. 3D Magnetic Sensor. User Manual [Электронный ресурс] / Munich: Infineon Technologies AG, 2018. 37 с. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLV493D-A1B6_3DMagnetic_UM-v01EN.pdf?fileId=5546d46261d5e6820161e75721903ddd (дата обращения 01.10.2019).

15. MSP430F2013 Datasheet [Электронный ресурс]. Dallas: Texas Instruments, 2012. 93 с. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f2013.pdf> (дата обращения 01.10.2019)

6. СЕКЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

УДК 621.311

АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ПРИЧИН АВАРИЙНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ И ПУТИ ИХ СНИЖЕНИЯ

Студент **Ахмадеев А.А.**

Научный руководитель

канд. техн. наук, ст. преп. **Балобанов Р.Н.**

*Казанский государственный энергетический
университет, г. Казань*

***Аннотация.** В статье рассмотрен анализ причин аварийных отключений воздушных линий электропередач. Были выявлены причины, вследствие которых чаще всего происходят отключения и предложены пути их снижения.*

***Ключевые слова:** анализ отключений линий, поток отказов, изоляция, изолятор, мультикамерный разрядник.*

Цель работы: провести анализ причин аварийных отключений воздушных линий электропередач и определить пути их снижений.

1. Анализ причин аварийных отключений воздушных линий электропередачи

Большая часть ВЛ 35-500 кВ, функционирующих на территории РФ, была построена в 60-70-х годах прошлого века [1]. Физический и моральный износ основных фондов является первопричиной технологических нарушений их функционирования. Важно отметить, что нормы проектирования 30-40 лет назад имели существенное отличие от современных нормативных документов [2].

Анализ показывает, что интенсивность отказов воздушных линий во многом зависит от срока их службы. Поток отказов ВЛ можно рассматривать, как сумму двух различающихся потоков:

- связанного с износом и старением элементов ВЛ, и зависящего от срока службы;
- определяемого внешними воздействиями (погодные условия, загрязнение, гроза).

Параметр потока отказов первого вида является функцией времени эксплуатации [6]. Эти отказы вызваны коррозией металлических

элементов, загниванием деревянных конструкций, разрушением изоляторов, старением проводов, креном опор [5]. Снизить величину потока отказов данного вида можно путем сокращения интервала периодичности проведения технического обслуживания и ремонта, а также повышением его качества и заменой устаревших элементов оборудования [3]. Поток отказов второго вида может быть уменьшен только путем повышения изначальных прочностных параметров ВЛ – увеличением пробивных напряжений изоляции и снижением уровня загрязнения [4].

Надежность функционирования воздушной линии обуславливается множеством факторов. Определить причины отказов ВЛ и наметить пути их предотвращения можно только на основании статистических данных о повреждаемости элементов [7].

Далее проведен анализ отключений линий электропередачи, которые произошли на одном из электросетевых предприятий ОАО «Сетевая компания» Татарстана в период с 2002 по 2016 г. Перечень отключений содержал также информацию о предполагаемой причине, благодаря чему сало возможным выделить отдельные группы причин отключений ВЛ.

Всего в процессе анализа было выявлено 1011 случаев отключения ВЛ 35-500 кВ. Отключения воздушных линий были вызваны следующими факторами, указанными в диаграмме на рис. 1. Анализ статистики аварийных отключений линий электропередачи, показал, что частой причиной отключений ВЛЭП является повреждения, отчасти связанные со снижением электрической прочности изолирующих конструкций. Это проявляется в экстремальных метеоусловиях (гололедно-ветровые нагрузки) (19,58%); грозовых перенапряжениях (26,01%); по неустановленной причине (21,95%).



Рис. 1. Диаграмма процентного соотношения причин отключений воздушных ЛЭП в период с 2002 по 2016 г.

Часто перекрытие изоляции происходит по причине грозových перенапряжений, при этом происходит перекрытие участков изоляционных конструкций с наличием дефектов, снижающих электрическую прочность [8]. Так же в процессе эксплуатации изоляторов на электрическую прочность влияет загрязнение и увлажнение их поверхности [10].

Своевременное выявление ухудшения состояния электроизоляционной конструкции и устранение причин этого ухудшения, снизит число отключений ВЛ и обеспечит повышение надежности электроснабжения потребителей [10].

2. Пути снижения отключений

Снизить количество отключений произошедших вследствие грозových перенапряжений помогут мультикамерные разрядники серии ГИРМК, разработанные компанией «НПО Стример». Они состоят из гирлянды изоляторов-разрядников мультикамерных (ИРМК) на основе тарельчатых стеклянных изоляторов U120AD. ИРМК-U120AD-УХЛ1, изображенный на рис. 2, является принципиально новым устройством, сочетающими в себе одновременно свойства и изолятора, и разрядника. Его применение позволяет защитить воздушные линии электропередачи от прямых ударов молнии и от индуктированных грозových воздействий и их последствий.

Применение ГИРМК на ВЛ позволяет отказаться от грозозащитного троса. При этом снижается высота, масса и стоимость опор, а также стоимость всей ВЛ в целом, но обеспечивается её надёжная молниезащита.

Основу изолятора-разрядника составляет массово выпускаемый стеклянный тарельчатый изолятор U120AD, на который специальным образом установлены мультикамерная система (МКС) и электроды. Такие дополнения не приводят к ухудшению изоляционных свойств изолятора, но благодаря им он приобретает свойства разрядника.

МКС установлена по периметру ребра изолятора. Она занимает примерно пять шестых окружности ребра, оставшаяся часть которого занята профилем из силиконовой резины без электродов. От одного из концов МКС отходит верхний подводящий электрод, а от другого – нижний отводящий электрод. При воздействии перенапряжения на ИРМК сначала пробиваются искровые воздушные промежутки, а затем – МКС. Ток грозového перенапряжения протекает от верхнего подводящего электрода через искровой канал воздушного промежутка, затем – по МКС, и далее – через канал разряда воздушного промежутка, к нижнему отводящему электроду [11].

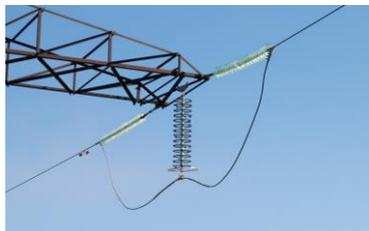


Рис.2. ГИРМК с подвесной изоляцией

Совместно с ИРМК-U120AD-УХЛ1 предлагаю использовать устройство контроля состояния высоковольтных изоляторов со светодиодной индикацией рис. 3, которое более подробно описано в диссертации Балобанова Р.Н. Рассмотрим принцип работы индикатора. Распределение потенциалов вдоль изолирующей конструкции изменяется при нарушении целостности отдельных ее частей. Разность потенциалов на поврежденном участке уменьшается, что вызывает увеличение напряжения на неповрежденной части конструкции. Дефектное состояние изолятора может быть обнаружено, например, по увеличению интенсивности или частоты следования импульсов светового излучения индикатора, установленного на участке изолирующей части конструкции или опоре, поскольку при этом увеличивается напряжение на нем. Один из электродов излучателя можно заземлить через заземленную часть изолятора или опоры, второй электрод расположить свободно.

Для обеспечения надежности работы излучателя при постоянной установке к нему необходимо параллельно подключить разрядник. При возникновении импульсных перенапряжений разрядник шунтирует излучатель, предохраняя его от выхода из строя.



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

Решать проблему отключений ВЛ вследствие образования гололеда можно путем нагрева проводов до температуры $(10^0 - 20^0)$ С до его наступления. Такой нагрев можно осуществлять с помощью бегущей высокочастотной электромагнитной волны, распространяющейся по линии электропередачи одновременно с основным напряжением промышленной частоты. Никакого короткого замыкания в сети, как при плавке, производить при этом не надо, и никаких потребителей отключать от сети не требуется. Потребитель при таком методе борьбы с гололедом ничего почувствовать не должен, ибо обе волны – промышленной частоты 50 Гц и электромагнитной частотой около 100 МГц – могут одновременно распространяться по линиям электропередачи, образно говоря, не мешая друг другу. Одна волна (частотой 50Гц) передает электрическую энергию по проводам, а другая (частотой около 100 МГц) – греет эти провода (рис. 4). Данное решение проблемы впервые предложил профессор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики Каганов В.И.

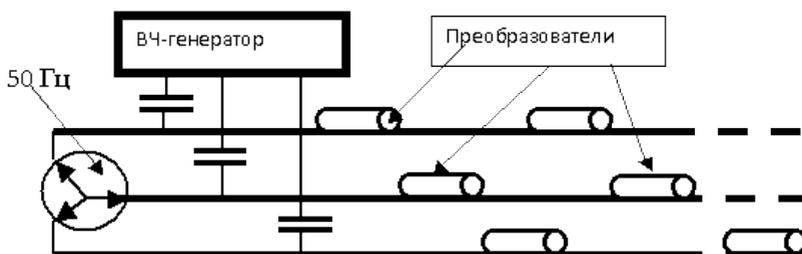


Рис. 4. Схема для нагрева проводов с помощью высокочастотной электромагнитной волны

Расположив вдоль линии с шагом в 5-10м специальные излучатели графито-керамического типа с большим активным сопротивлением величиной в 1 – 2 кОм, можно существенно увеличить отбор мощности падающей волны на излучение, преобразуемое затем в тепло, нагревающее линию (рис. 5) В результате при достаточно длинной линии можно полностью преобразовать энергию высокочастотной электромагнитной волны в тепло.

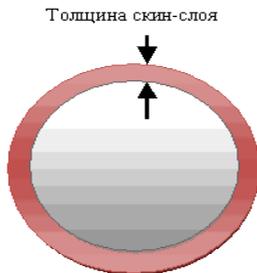


Рис. 5. Фронтальный вид фазного провода

Для уменьшения отключений из-за ветровых нагрузок предлагаю все линии снабдить виброгасителями согласно, представленной из пункта 2.5 правил устройств электроустановок.

Заключение

В статье проанализирована статистика аварийных отключений воздушных линий электропередач и предложен план мероприятий по их снижению. Для борьбы с грозовыми перенапряжениями было предложено установить на опоры ГИРМК. Таким образом мы можем отказаться от грозозащитного троса и при этом снизается высота, масса и стоимость опор, а также стоимость всей ВЛ в целом, но обеспечивается её надёжная молниезащита. Совместно с ГИРМК мною было предложено использовать устройство контроля изоляции высоковольтных изоляторов со светодиодной индикацией. Установка данного устройства позволит контролировать изоляционные свойства изолятора, а также с помощью светодиодного индикатора уведомлять нас о его исправности, либо неисправности. Соответственно, владея такой информацией можно заблаговременно заменить пробитые и неисправные изоляторы, без экономических потерь вследствие аварийных отключений. Против обледенения провод было предложено использовать высокочастотную электромагнитную волну, энергию которой с помощью преобразователя можно преобразовать в тепло, необходимое для плавки провода. Для уменьшения отключений вследствие ветровых нагрузок необходимо все ВЛ снабдить виброгасителями. При внедрении устройств, описанных выше можно количественно сократить число отключений ВЛ и качественно улучшить энергоснабжение потребителей.

Библиографический список

1. **Цейтлин М.А.** Опыт проектирования и применения опор ВЛ со стальными многогранными стойками // Прогрессивные решения в электросетевом строительстве: сб. науч. трудов, посвященный памяти А.И. Курносова. М.: Энергосетьпроект, 1988. С. 112-123.
2. **Барг И.Г., Эдельман В.И.** Воздушные линии электропередачи: вопросы эксплуатации и надежности. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
3. **Волков Н.Г.** Надежность функционирования систем электроснабжения: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 157 с.
4. **Фокин Ю. А.** Надежность и эффективность сетей электрических систем. М.: Высш. школа, 1989. 151 с.
5. **Чичёв С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И.** Система контроля и управления электротехническим оборудованием подстанций. М.: Изд. дом «Спектр», 2011. 140 с.
6. **Шевченко Д.Н.** Основы теории надежности: учеб.-метод. пособие для студентов техн. специальностей. Гомель: БелГУТ, 2010. 250 с.
7. **Конохова Е.А., Киреева Э.А.** Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 92 с.
8. **Рейх Е.Н., Сыченко В.Г., Ким Е.Д.** Анализ методов и средств диагностирования для оценки состояния изоляторов контактной сети // Электрификация транспорта. 2012. № 4. С. 54-62.
9. **Гайворонский А.С.** Повреждения полимерных изоляторов и их диагностика при эксплуатации // Главный энергетик. 2010. № 2. С. 23-27.
10. **Ким Е.Д.** Исследование электрического поля полимерных изоляторов с внутренним электрическим дефектом // Электрификация железнодорожного транспорта ТРАНСЭЛЕКТРО-2007: тез. докл. I Междунар. науч.-практич. конф. Днепропетровск: ДИИТ, 2007. С. 36-40.
11. Молниезащита ВЛ [Сайт]: АО «НПО «Стример» [2019]. URL: https://www.streamer.ru/streamer_products/lightning-protection/ (дата обращения 01.10.2019).
12. **Балабанов Р.Н.** Бесконтактный метод и устройство контроля состояния высоковольтных изоляторов со светодиодной индикацией // Дисс ... канд. техн. наук: 05.11.13. Казань, 2018. 168 с.

УДК 621.3.031:004.9

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИЖС СЕТИ 10/0,4 КВ НА ПРИМЕРЕ
РУССКОХАЛАНСКОГО СЕЛЬСКОГО ПОСЕЛЕНИЯ
ЧЕРНЯНСКОГО РАЙОНА БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ***

Магистрант **Белянский С.В.**

Научный руководитель

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

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

***Аннотация.** В данной статье рассмотрены основные принципы имитационного моделирования системы электроснабжения сети ИЖС 10/0.4 кВ при помощи ПК «Matlab&Simulink» необходимого для дальнейшего исследования основных показателей качества электроэнергии и проверки соответствия данных показателей требованиям нормативной документации.*

***Ключевые слова:** электрическая энергия, качество электроэнергии, имитационное моделирование, имитационная модель, однофазные электроприемники.*

Проблема качества электроэнергии является основополагающей и наиболее острой для современной энергетической отрасли. Электрическая энергия является основой большинства сфер жизнедеятельности человека, также без нее невозможен отпуск большинства видов продукции, поэтому можно сказать, что от качества электроэнергии напрямую зависит качество жизни человека.[1] Кроме того, объект исследования- сеть 10/0.4 кВ с. Русская Халань, является типовым объектом, следовательно, результаты представленные имитационные модели могут быть успешно применены при определении показателей качества электроэнергии в других населенных пунктах Белгородской области.

Цель работы. Разработать имитационные модели системы электроснабжения сети ИЖС 10/0.4 кВ при помощи ПК «Matlab&Simulink» на примере Русскохаланского сельского поселения Чернянского района, а именно:

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

1) разработать имитационную модель бытовой нагрузки типового дома, представленную смоделированными коммунально бытовыми однофазными электроприемниками (ОЭП);

2) представить имитационную модель подключения типовых домов к линии электропередачи 0.4 кВ, представив дома в виде блоков Sub-системы (модель типовой улицы);

3) представить имитационную модель системы электроснабжения сети ИЖС 10/0,4 кВ.

Имитационное моделирование – это разновидность математического моделирования. Зачастую для некоторых объектов нет возможности разработать аналитическую модель, т.е. описать ее только при помощи математического аппарата, например, когда нет методов решения полученной модели, либо решения неустойчивы. В этом случае аналитическую модель заменяют имитационной [2].

Имитационная модель – логико-математическое описание объекта, которое позволяет сымитировать какой-либо процесс при помощи различных программных комплексов. Моделирование системы электроснабжения осуществлялось при помощи библиотеки SimScare PowerSystems, в которой содержатся блоки, представляющие основные элементы электрической сети: трансформаторы, линии электропередач, двигатели и т.д. [3]

Имитационное моделирование системы электроснабжения сети ИЖС 10/0.4 кВ начинается с моделирования типового дома, представленного смоделированными основными коммунально бытовыми однофазными электроприемниками (ОЭП): стиральная машина, холодильник, насос, телевизор, утюг, персональный компьютер, осветительная нагрузка. [4]

Каждый из электроприемников имеет свою мощность, данные представлены в табл. 1. Разработанная имитационная модель типового дома представлена на рис. 1.

Таблица 1

Основные коммунально-бытовые ОЭП, использованные в моделировании

Коммунально-бытовой ОЭП	Мощность, Вт
Стиральная машина	1200
Холодильник	250
Насос	350
Утюг	900
ЖК-телевизор	400
Осветительная нагрузка	1600
Персональный компьютер	250

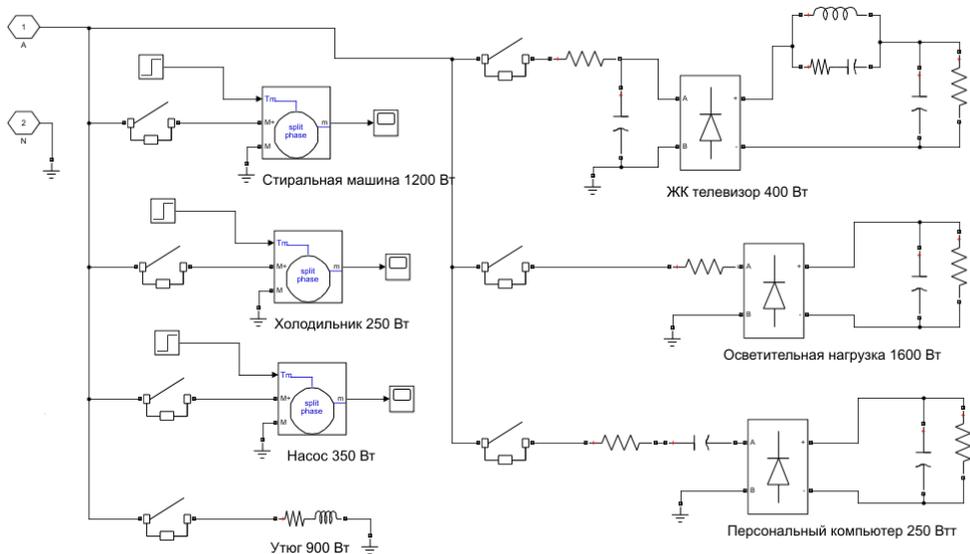


Рис. 1. Имитационная модель типового дома

После проведенного моделирования типового дома, моделируется сеть 0.4 кВ, к которой подключаются типовые дома. В качестве примера рассматривается улица Горького с. Русская Халань.

Каждая модель типового дома вставляется в блок Sub-системы «Дом». Каждый блок подключается к сети 0.4 кВ. Имитационная модель представлена на рис. 2.

После проведенного моделирования сети 0.4 кВ необходимо промоделировать сеть 10/0.4 кВ.

Источник питания (ИП) напряжением 10 кВ рассматриваемой имитационной модели представлен в виде трех отдельных блоков (по количеству фаз), соединённых по схеме «звезда».

Для имитационной модели трансформатора (ТМ-100/10/0,4) необходимо задать значения паспортной мощности, напряжения и сопротивления обмоток ВН и НН и ветвей намагничивания. [5]

Имитационная модель системы электроснабжения сети ИЖС 10/0.4 кВ для Русскохаланского сельского поселения представлена на рис. 3.

Таким образом, применяя имитационное моделирование можно прогнозировать показатели качества электрической сети ИЖС 10/0.4 кВ [6].

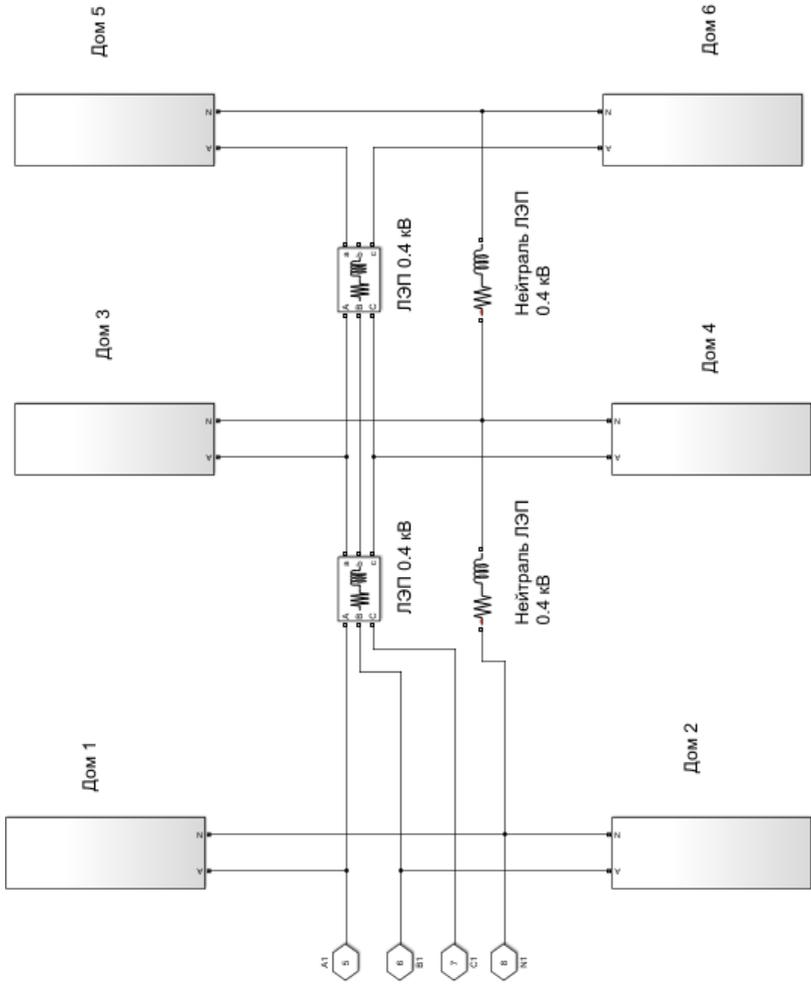


Рис. 2. Имитационная модель подключения типовых домов к сети 0,4 кВ

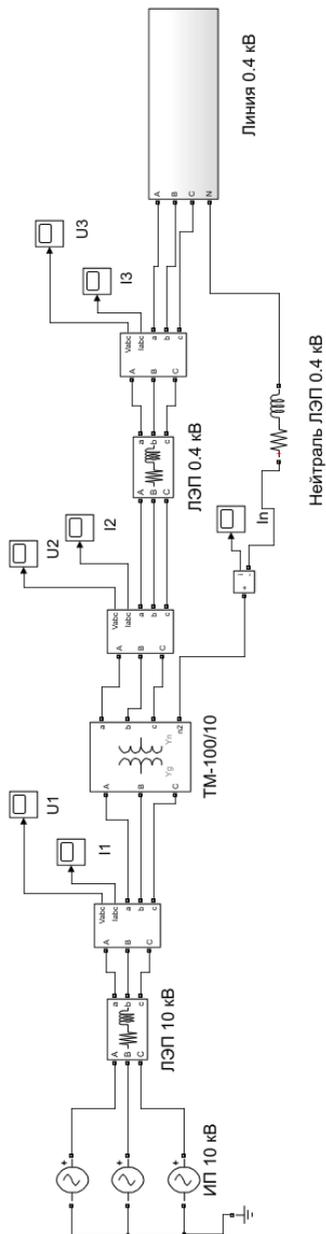


Рис. 3. Имитационная модель системы электроснабжения сети ИЖС 10/0,4 кВ

Другими словами, можно определить значения комплексных симметричных составляющих показателей несимметрии напряжения по прямой (U_1), обратной (U_2) и нулевой (U_3) последовательностей, а также величину коэффициентов несимметрии напряжения обратной (K_{2U}) и нулевой (K_{0U}) последовательностей и в случае несоответствия качества электроэнергии требованиям ГОСТ 32144-2013 определяющим нормативные значения всех показателей качества электроэнергии провести ряд специальных мероприятий. [7–8] Кроме того, необходимо еще раз подчеркнуть, что сеть ИЖС 10/0.4 кВ Русскохаланского сельского поселения является типовым объектом, поэтому данные имитационные модели могут быть применены при исследовании показателей качества электроэнергии в других населенных пунктах.

Библиографический список

1. **Антипин А.С.** Проблемы качества электроэнергии и способы моделирования электротехнологических установок для выявления негативных факторов и явлений, возникающих при эксплуатации данного оборудования // Сб. тр. первой науч.-техн. конф. молодых ученых Уральского энергетического института. 2016. № 1. С. 291.
2. **Жилин Е.В.** Минимизация потерь электроэнергии в системах электропитания индивидуального жилищного строительства // Дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Белгород, 2018. С. 181.
3. **Averbukh M.A., Zhilin E.V., Roschubkin P.V.** Experimental Analysis of Electrical Modes in a Residential Estate Electrical Power Supply System // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, Is. 13. С. 3446-3451.
4. **Сапрыка А.В., Жилин Е.В.** Анализ влияния несимметрии токов и напряжений на систему электроснабжения частного сектора // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С. 116–122.
5. **Новаш И. В.** Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12-24.
6. **Веников В. А.** Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики. М.: Высш. шк., 1981. 288 с.
8. **Юдин А.А., Бондарь В.В.** Разработка математических моделей для оптимизации режимов электроэнергетических систем по напряжению и реактивной мощности // Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов. Белгород, 2018. С. 123-128.
9. **Виноградов А.А., Зябкина О.Н., Михайлова М.Ю.** Анализ показателей качества электрической энергии в системе электроснабжения Лебединского горно-обогатительного комбината В Белгородской области // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 175-180.

УДК 662.749.2

ПРИМЕНЕНИЕ НЕФТЯНОГО КОКСА КАК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Магистрант **Белянинова А.А.**

Научный руководитель

канд. хим. наук, доц. **Ахмеров А.В.**

*Казанский государственный энергетический
университет, г. Казань*

***Аннотация.** В статье рассмотрен сравнительно новый вид топлива для нашей страны – нефтяной кокс. Даны характеристики данного продукта, а также представлена физико химическая характеристика. Проанализированы возможности использования нефтяного кокса в качестве энергетического топлива. Также проанализированы возможные риски в целом и экологические в частности.*

***Ключевые слова:** нефтяной кокс, энергетическое топливо, углеводород, мазут, топочная система.*

Повышение мировых цен на нефть активизировало развитие нефтеперерабатывающей промышленности в мире, особенно производство дорогих моторных топлив. На нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ), в частности Ближнего Востока, значительно расширятся мощности по вторичным процессам переработки нефти и увеличения мощности по крекингу. Растущий спрос на бензин и топливо для ТЭС потребует введения дополнительных мощностей по вторичной переработке, повышение гибкости в эксплуатации производственного оборудования.

Цель работы – исследование возможности использование нефтяного кокса в качестве энергетического топлива

Поскольку нефтеперерабатывающие заводы во всем мире стремятся работать более эффективно и извлекать больше бензина и других дорогостоящих видов топлива из каждого барреля сырой нефти, образуется твердый углеродный материал, известный как нефтяной кокс.

Нефтяной кокс является углеродистым гидрофобным черным твердым материалом (табл. 1). Подавляющее большинство нефтяного кокса представляет собой твердое стеклообразное вещество, напоминающее уголь, но небольшая фракция состоит из углеродистых волокон [1]. 90 % нефтяного кокса это углерод, оставшиеся 10 % состоят из

азота, водорода, кислорода и серы. Также следует отметить что в нефтяном коксе содержится достаточный уровень концентрации микроэлементов и кремния для возможности классификации вида нефти. Состав нефтяного кокса не постоянен, что обусловлено разным материалом использованным для получения кокса, а также на состав нефтяного кокса влияют температура коксования, время и условия технологического процесса. Приблизительно 20 % остаточных углеводородов которые содержатся в нефтяном коксе называются летучими и удаляются кальцинированием. Компоненты которые улавливаются в матрице из закаленного углерода, включают полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и металлы [2].

Нефтяной кокс является побочным продуктом нефтеперерабатывающей промышленности и относится ко всем типам углеродистых твердых веществ, получаемых при переработке нефти, включая зеленый или необработанный, прокаленный и игольчатый нефтяной кокс.

*Таблица 1***Химический состав нефтяного кокса [3]**

Компонент	(% вес)	Содержание металлов	гранула (М.д.)
Карбон	89.8 ± 0.2	Ванадий	1748 ± 268
Водород	4.2 ± 0.7	кремний	415 ± 464
Азот	3.3 ± 0.08	никель	343 ± 34
Кислород	1.7 ± 0.4	алюминий	263 ± 82
Сера	1.1 ± 0.06	Железо	263 ± 67
Зола	$0,2 \pm 0,05$		

Нефтяной кокс является сложным топливом с точки зрения его низкого содержания летучих веществ, высокого содержания серы и азота, что приводит к нежелательным характеристикам выбросов. Однако низкая цена и увеличение производства нефтяного кокса из высокосернистого сырья дают мощный экономический стимул для его использования для выработки электроэнергии.

Высококачественный нефтяной кокс с низким содержанием серы и тяжелых металлов может быть использован для изготовления электродов для сталелитейной и алюминиевой промышленности. Но большая часть производимого в мире нефтяного кокса, приблизительно 75-80%, имеет гораздо более низкое качество, содержит более высокие уровни серы и тяжелых металлов и используется исключительно в качестве топлива.

Годовой объем производства и фактическое производство нефтяного кокса в последнее время возросли в значительной степени из-за растущих потребностей в транспортном топливе в сочетании с использованием более тяжелых и кислых сортов нефти. Коксование позволяет максимизировать выход легких фракций, одновременно минимизируя производство тяжелого мазута, особенно когда сырой сланец становится все более тяжелым.

Нефтяной кокс производится как побочный продукт в стремлении максимизировать прибыльность нефтеперерабатывающего завода. Это важно при рассмотрении относительного влияния использования нефтяного кокса по сравнению с использованием ископаемого топлива в производстве электроэнергии. Принимая во внимание, что уголь, нефть и природный газ являются добываемым топливом, нефтяной кокс, является побочным продуктом производства транспортного топлива[4].

В России нефтяной кокс используют в качестве топлива для котлов. Несмотря на более привлекательную цену, использование нефтяного кокса несет ряд угроз для оборудования. В частности следует отметить нестабильное содержание серы. В зависимости от месторождения нефти и ряда других показателей уровень серы может равняться от 1 до 3 %, что пагубно влияет на оборудование ТЭС и к тому же несет определенные экологические риски.

Исследования сжигания нефтяного кокса, которое проводилось в топке котла ТП-81 Чайковской ТЭЦ (Россия), доказало возможность эффективного использования нефтяного кокса в смеси с Кузнецким углем (доля кокса 50%) по тонкости помола пыли по остатку на сите (R90) около 8%.

Другим вариантом использования кокса как котельного топлива является водно коксовая суспензия. Она по своим свойствам близка к водо угольному топливу, которое представляет собой топливную композицию из угля тонкого помола и нефтяного кокса или жидких нефтепродуктов [5].

Одним из современных процессов использования нефтяных остатков как котельного топлива является паро- кислородная газификация мазута и гудрона. Конечным продуктом процесса является газ, получаемый в аппарате-газификаторе. Значительным преимуществом данного процесса является очистка полученного газа от соединений серы и других примесей.

Нефтяной кокс является чрезвычайно стабильным топливом, что заключается в небольшом риске сгорания во время транспортировки,

но из-за высокого содержания углерода, когда он сгорает, он выделяет на 10% больше CO₂ на единицу энергии, чем обычный уголь. Это выше, чем у практически любого другого источника энергии, и делает нефтяной кокс весомым источником уровня повышения парниковых газов.

Экологически опасным нефтяной кокс может считаться не только из-за углерода. Во время сжигания нефтяного кокса требуется усиленный контроль загрязнения, чтобы улавливать избыточную серу, содержащуюся в нефтяном коксе низкого качества. Содержание тяжелых металлов в нефтяном коксе также вызывает беспокойство как в результате выброса его в воздух при сжигании нефтяного кокса, так и в отношении последствий, которые он имеет для местной окружающей среды во время хранения. Несмотря на экологические проблемы, связанные с производством и использованием нефтяного кокса, он остается популярным из-за своей экономической эффективности. Он недорог в производстве, легко экспортируется и является привлекательным источником дешевого топлива для развивающихся стран.

Таким образом нефтяной кокс является специфическим продуктом нефтяной промышленности который возможно использовать для производства энергетического топлива. В тоже время необходимо отметить что существенным недостатком данного материала являются экологические риски возникающие при процессе горения. Сегодня в условиях роста цен на топливо, нефтяной кокс может стать прекрасной альтернативой традиционным твердым топливным материалам, однако его использование возможно лишь при техническом переоснащении, так как сжигание кокса возможно лишь в специальном оборудовании – топки с кипящим слоем, шаровым сжиганием, циркулирующим слоем, и т.д

Библиографический список

1. **Гимаев Р. Н., Кузеев И. Р., Абызгильдин Ю.М.** Нефтяной кокс. М.: Химия, 1992. 80 с.
2. **Сюняев З. И.** Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса. М.: Химия., 1973. 296 с.
3. **Гэри Дж. Х., Хэндверк Г. Е., Кайзер М. Дж.** Технологии и экономика нефтепереработки: пер. с англ. 5-го изд. под ред. О. Ф. Глаголевой. СПб.: ЦОП «Профессия», 2013. 440 с.
4. **Походенко Н.Т.** Получение и обработка нефтяного кокса. М.: Химия, 1986. 325 с.
5. **Саппаев А. Б., Фаткуллин М. Р., Жирнов Б. С.** Модификация нефтяного кокса Атырауского НПЗ (Республика Казахстан) // Молодой ученый. 2017. № 22. С. 21-24.

УДК 662.81-80

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ПРОЦЕССА СУХОГО ТУШЕНИЯ КОКСА С ЦЕЛЬЮ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Магистрант **Гордеева И.С.**

Научный руководитель

канд. техн. наук, доц. **Нешпоренко Е.Г.**

*Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск*

***Аннотация.** Предложен и исследован процесс эффективного использования теплоты раскаленного кокса с целью получения обожженного концентрата сидеритовой руды в установке сухого тушения кокса, с выделением зоны предварительной технологической тепловой обработки сидеритовой руды (ЗПТО).*

Проведен термодинамический анализ, в котором определены доли тепла раскаленного кокса, расходуемые на осуществление процессов нагрева и разложения $FeCO_3MgCO_3$ с протеканием процессов реакции Белла-Будуара при 490 °С и 650 °С соответственно. Результатом термодинамического анализа явилось построение температурно-теплового графика охлаждения монооксида углерода в предварительной зоне, на теплоте которого осуществляется предварительный нагрев материала до температуры разложения 490 °С и график охлаждения кокса в основной зоне технологической обработки материала (ЗОТО) – зона форкамеры установки сухого тушения кокса. Представлена сравнительная таблица массовых расходов кокса и сидеритоплезитовой руды.

***Ключевые слова:** охлаждение кокса, нагрев сидеритоплезитовой руды, монооксид углерода, угар кокса.*

Действующий способ сухого тушения на современных УСТК, при котором кокс охлаждается газами, позволяет утилизировать 80 % тепла, уносимого коксом из печей, или 40 % всего тепла, затрачиваемого на коксование, при этом, с одной тонны потушенного кокса возможно получить 400-500 кг пара высоких энергетических параметров [1, 2].

Проведенными исследованиями ранее определено, что целесообразным является выделение в установке сухого тушения кокса высоко-температурной области, в которой возможно осуществлять тепловую обработку различных технологических материалов [3, 4].

Целью работы является поиск и применение наиболее эффективного процесса использования теплоты раскаленного кокса, в

частности, сидеритоплезитовой рудой в высокотемпературной области установки сухого тушения кокса (УСТК), с возможностью получения обожжённого концентрата сидеритовой руды большего количества, что является ценным в условиях стремительно развивающегося современного промышленного производства.

Для этого, в схеме было целесообразным выделение новой предварительной области, с разграничением зон основной и предварительной тепловой обработки технологического материала.

В качестве источника теплоты в предварительной зоне рассматривался выделяющийся из основной высокотемпературной области монооксид углерода при его начальной температуре 1200°C.

Анализ производился для термодинамически идеальных условий и процессов. Расчетами установлено, что для осуществления полной тепловой обработки 1 кг сидеритоплезитовой руды на теплоте раскаленного кокса только в высокотемпературной области при его охлаждении с 1200°C до 740°C затрачивается около 2325 кДж/кг руды, при этом, учитывался состав сидеритоплезитовой руды с долей содержания FeCO_3 и MgCO_3 73,36 % и 22,8 % соответственно [5].

Теплопотребление сидеритоплезитовой руды в высокотемпературной области УСТК

$$m_k \cdot \int_{740}^{1200} c_k(t) \cdot dt = \sum_{i=1}^n Q_i$$

где $i=1,2,\dots,n$ -количество элементарных участков теплопотребления Q_i при тепловой обработке сидеритовой руды в процессах разложения FeCO_3 и MgCO_3 , нагрева руды от 490°C до 650°C, реакциях Белла-Будуара при 490°C [6] и 650°C [7] и перегревом руды от 650°C до 740°C.

При исследовании тепловой обработки сидеритовой руды было выявлено, что в процессах разложения карбоната железа и карбоната магния при 490°C и 650°C выделяется около 0,153 м³ диоксида углерода с последующим их восстановлением до СО, при взаимодействии с углеродом кокса по уравнению реакции Белла-Будуара, в объеме 0,307 м³/кг руды, при температуре 1200°C, температурный потенциал которого используется для предварительного подогрева сидеритовой руды.

С целью более полной и наглядной визуализации процессов теплопотреблений при тепловой обработке технологического материала в зонах предварительной и основной технологической операциях, был построен температурно-тепловой график охлаждения раскаленного

кокса и нагрева сидеритоплезитовой руды, представленный на (рис. 1) с отображением отдельных участков, теплота кокса, которого расходуется на следующие из реакций: 1-теплота раскаленного кокса, затрачиваемая на осуществление реакции нагрева СО в противотоке от 490°С до 1200°С при охлаждении кокса с 1200°С до 740°С; 2-теплота, затрачиваемая на реакцию Белла-Будуара, при температуре 490°С; 3- теплота, затрачиваемая на реакцию разложения FeCO_3 при 490°С; 4-теплота, затрачиваемая на догрев руды от 490°С до 650°С; 5-теплота, затрачиваемая на догрев СО в противотоке от 650°С до 1200°С; 6- теплота, затрачиваемая на реакцию Белла-Будуара, при температуре 650°С; 7- теплота, затрачиваемая на реакцию разложения MgCO_3 при 650°С; 8- теплота, затрачиваемая на догрев руды от 650°С до 740°С.

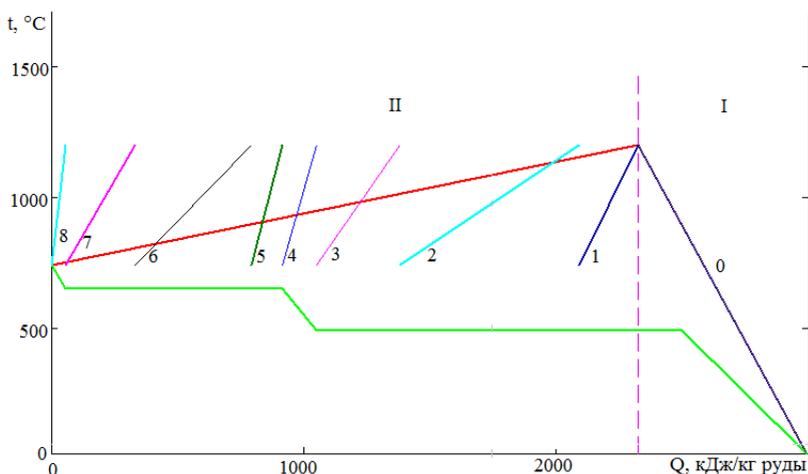


Рис. 1. Температурно-тепловой график охлаждения кокса и нагрева сидеритовой руды в (ЗПТО) и (ЗОТО) технологического материала:

I – предварительная область нагрева сидеритовой руды на физической теплоте монооксида углерода, II – высокотемпературная область нагрева и разложения технологического материала в зоне форкамеры УСТК

Из проведенного анализа следует, что при охлаждении 1 кг кокса с 1200°С до 740°С и тепловой обработке сидеритовой руды, основная доля теплоты раскаленного кокса расходуется на процессы реакции Белла-Будуара при 490°С и 650°С, потребляющие 30%, и 20% соответственно от общей доли теплоты раскаленного кокса, что определяется

составом руды; около 12% и 14% теплоты раскаленного кокса расходуется на реакции разложения карбоната магния, карбоната железа в процессе тепловой обработки и самое минимальное количество теплоты тратится на участке перегрева руды с 650°C до 740°C, 3% от общей теплоты кокс (рис. 2).

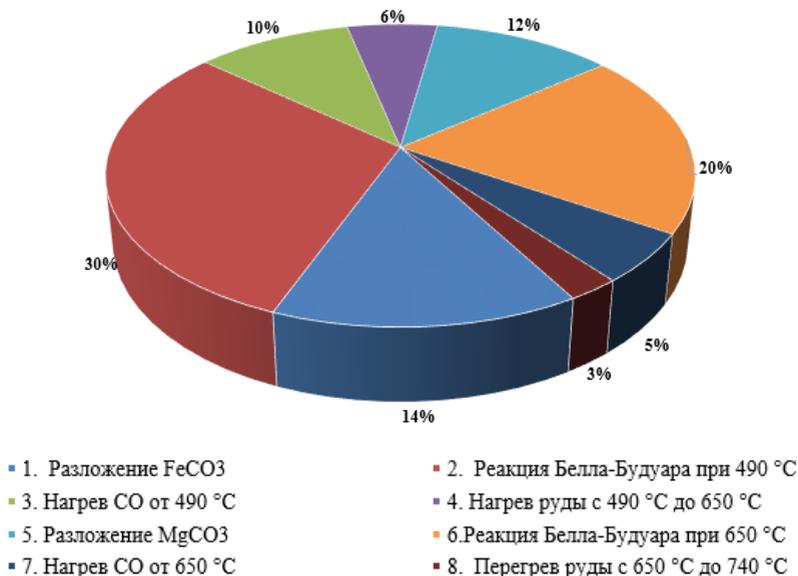


Рис. 2. Структура расходуемого тепла раскаленного кокса в процессах тепловой обработки сидеритовой руды в основной технологической зоне (ЗОТО)

Результаты термодинамического анализа при тепловой обработке сидеритоплезитовой руды в зонах предварительной и основной технологической операций были сведены и представлены в (табл. 1).

Из полученных результатов следует, что для тепловой обработки 1 кг сидеритовой руды, необходимо в высокотемпературной области охладить с 1200°C до 740°C 3,384 кг раскаленного кокса, с общим теплотреблением в (ЗОТО) около 2325 кДж/кг. руды. Общее теплотребление руды по двум основным зонам составляет около 2938,6 кДж/кг. руды.

Таблица 1

Тепловая обработка 1кг сидеритовой руды в ЗПТО и ЗОТО

Участки тепловой обработки руды	Требуемая теплота, кДж/кг руды	Расход кокса /кг. руды	Масса руды, кг	Убыль массы руды, кг	Масса СО, кг
ЗПТО: зона I					
0.Нагрев руды газом СО	613,819	-	1	-	0,384
Итог (ЗПТО)	613,819	-	1	-	0,384
ЗОТО: зона II					
1. Разложение при 490° С	331,286	0,524	1	-	-
2. Реакция Белла-Будуара при 490°С	707,677	0,828	0,817	0,182	-
3. Нагрев СО от 490 °С	236,204	0,373	0,817	-	0,232
4. Нагрев руды с 490 °С до 650 °С	137,327	0,217	0,817	-	-
5. Разложение при 650 °С	273,691	0,433	0,817	-	-
6.Реакция Белла-Будуара при 650°С	459,746	0,727	0,698	0,119	-
7. Нагрев СО от 650 °С	121,917	0,193	0,698	-	0,152
8. Перегрев руды с 650 °С до 740 °С	56,919	0,09	0,698	-	-
Итог (ЗОТО)	2325	3,384	0,698	0,301	0,384
Итог	2938,586	3,384	1	0,301	0,384

Выводы

Таким образом, из проведенного анализа следует, что предлагаемый способ охлаждения кокса с выделением предварительной области тепловой обработки технологического материала, в которой возможно осуществлять предварительный подогрев сидеритоплезитовой руды, позволяет произвести с 1 кг потушенного кокса 0,178 кг готового обожженного концентрата сидеритовой руды, затратив при этом 0,296 кг сидеритовой руды, с величиной угара кокса в 2,43%.

Предложенный процесс использования теплоты раскаленного кокса позволяет получить ценный материальный ресурс (обоженный концентрат сидеритовой руды) и охлажденный монооксид углерода, с

дальнейшим его применением в схеме с предварительной областью тепловой обработки технологического материала и тем самым позволяет решить проблему с полным использованием СО.

Библиографический список

1. **Данилов О.Л., Муц В.А.** Использование вторичных энергетических ресурсов. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2008. 154 с.
2. **Рудька В.И., Малина В.П.** О некоторых последних тенденциях в развитии технологической цепочки «чугун-кокс» // Кокс и химия. 2008. № 1. С. 9-11.
3. Исследование энергетики теплотехнологии сухого тушения кокса / С.В. Картавцев, И.С. Гордеева, Е.Г. Нешпоренко, Ю.К. Демин // Промышленная энергетика. 2017. № 5. С. 38-43.
4. **Нешпоренко Е.Г., Картавцев С.В., Гордеева И.С.** Повышение энергетической эффективности тепловой технологии процесса сухого тушения кокса // Энергетик. 2018. № 2. С. 44-48.
5. **Крупенин М.Т.** Температурные ограничения метасоматоза Бакальских сидеритовых месторождений по геохимическим данным // Вестник Пермского университета. 2017. Том 16, № 2. С.167-177.
6. **Глушко В.П.** Термодинамические свойства индивидуальных веществ. – М.: Наука, 1962. 916 с.
7. **Никольский Б.П.** Справочник химика. Т. 2. М.: Химия, 1971. 168 с.

УДК 697.1: 330.131

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ МЕТОДОМ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА*

Магистрант **Гошко М.Ю.**

Научный руководитель

д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**

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

***Аннотация.** В статье методом расчета стоимости жизненного цикла выполнена оценка утепления здания детской поликлиники № 4 г. Белгорода и произведена оценка организации горячего водоснабжения традиционными способами и с использованием теплового насоса. Установлено, что минимальный срок окупаемости утепления не соответствует минимуму стоимости жизненного цикла. Поэтому оценка энергосберегающих проектов по сроку окупаемости неэффективна, так как небольшой срок окупаемости может соответствовать минимальным значениям затрат и экономии, и не позволит получить максимальную экономию на всем сроке жизни проекта. Установки теплового насоса, утилизирующего теплоту вентиляционного воздуха, эффективней, чем получение горячей воды от централизованного теплоснабжения и может быть рекомендовано при отсутствии газоснабжения.*

***Ключевые слова:** энергоэффективность, стоимость жизненного цикла, утепление, горячее водоснабжение, тепловой насос.*

В настоящее время для оценки эффективности энергосберегающих мероприятий используют следующие критерии.

1. Простые критерии (без учета фактора времени) – для малозатратных или быстроокупаемых мероприятий:

- экономия издержек производства $\Delta Э$, выраженное в денежных единицах или натуральных единицах расхода энергоресурсов;
- простой срок окупаемости

$$T_0 = KЗ / \Delta Э,$$

где $KЗ$ – капитальные затраты (CAPEX); $\Delta Э$ – годовая экономия, выраженное в денежных единицах.

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

2. Интегральные коэффициенты, рассчитываемые с применением дисконтирования – для высокозатратных или долгокупаемых мероприятий

- чистый дисконтированный доход (разность дохода от реализации продукции и капитальных вложений)

$$NPV = \sum D/(1+r)^k - KЗ,$$

где D – доход; r – ставка дисконтирования; k – срок;

- индекс рентабельности инвестиций (соотношение прибыли и капитальных затрат)

$$PI = \sum D/(1+r)^k / KЗ;$$

- срок окупаемости с учётом дисконтирования поступающих доходов

$$T_d = -\ln[1 - rT_0] / \ln(1 + r);$$

- срок окупаемости с учётом капитализации поступающих доходов

$$T_{np} = \ln[1 + rT_0] / \ln(1 + r).$$

Перечисленные критерии характеризуются рядом недостатков:

а) интегральные коэффициенты затруднительно применять для задач, не являющихся бизнес-процессами, то есть в которых прибыль не фигурирует (например строительство и модернизация зданий);

б) дисконтирование задает одинаковое обесценивание всех факторов, тогда как для разных показателей (стоимость различных энергоресурсов, инфляции, заработной платы и т.п.) величина относительно обесценивания (увеличения стоимости) различна;

в) в методе дисконтирования доходы принимаются постоянными и учитывается их обесценивание доходов, тогда как в реальности доходы из-за обесценивания денежных средств (инфляции) будут увеличиваться.

Эти недостатки отсеивают в методе оценки стоимость жизненного цикла, которые является суммой затрат на «приобретение» и «владение»):

$$LCC = KЗ + nTЗ,$$

где $TЗ$ – текущие годовые затраты (ОРЕХ); n – срок службы объекта (изделия).

Целью работы является исследование энергоэффективности здания городской детской поликлиники №4 города Белгорода и определение наиболее оптимальных способов её повышения.

Для выполнения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Анализ методов оценки эффективности инвестиций в энерго-сберегающие мероприятия, в том числе анализ методом стоимости жизненного цикла.

2. Анализ энергопотребления и энергоэффективности здания поликлиники.

3. Разработка теплотехнического расчета здания с целью определения затрат на отопление.

4. Исследование вариантов утепления, обеспечивающих наименьшие суммарные затраты на реализацию мероприятий и отопление (методом стоимости жизненного цикла).

5. Исследование вариантов организации ГВС, обеспечивающих наименьшую стоимость энергоресурсов.

Описание объекта исследования

Особенностью здания городской детской поликлиники № 4 г. Белгорода (рис. 1) является его оригинальная архитектура. Коэффициент компактности здания равен 0,254, что более характерно для многоэтажных домов. Год постройки здания: 2000 – 2005, поэтому оно не удовлетворяет требованиям энергетической эффективности.



Рис. 1. Здание городской детской поликлиники № 4

Общая площадь здания 12 591 м², количество этажей – 3 (часть пристройки – 2 этажа), материал стен – силикатный кирпич, толщина стен 0,5 м.

По фактическим данным произведен анализ энергопотребления (рис. 2) и выполнен тепловой расчет здания (рис. 3).

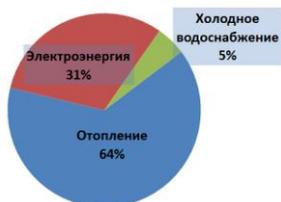


Рис. 2. Структура затрат на энергопотребление



Рис. 3. Структура потерь теплоты в здании

Расчетный расход теплоты на отопление составил 1 318,9 ГКал/год, тогда как фактический:

- 2016 г..... 1 583,6 ГКал;
- 2017 г..... 1 595,4 ГКал;
- 2018 г..... 1 764,4 ГКал;

Выявленная низкая энергоэффективность здания связана с двумя основными факторами:

- высокая температура в здании, так называемый "перетоп". При нормативном значении 20°C температура в помещении составляла 23-25°C;
- отсутствие утепления чердачного перекрытия над основным зданием и нежилыми пристройками.

Исследование вариантов утепления

Методом стоимости жизненного цикла произведено исследование вариантов утепления, обеспечивающих наименьшие суммарные затраты на реализацию мероприятий и отопление. Для этого был произведен расчет стоимости утепления стен, подвала и чердака и получаемая экономия при разных толщинах утеплителя (рис. 4)

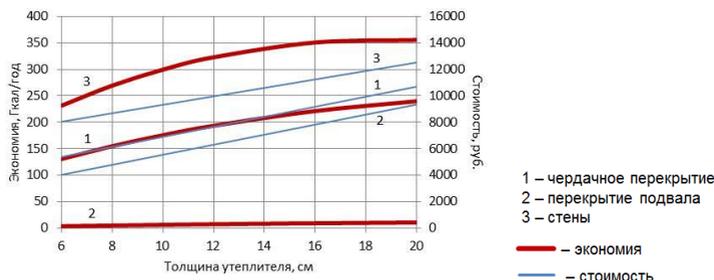


Рис. 4. Показатели утепления

МАКЕТ ДЛЯ ПРАВКИ! Номера страниц меняться не будут.

Для оценки вариантов использовались критерии:

1. Стоимость жизненного цикла мероприятия (в фактических ценах), млн. руб:

$$З = \frac{\Delta K + \frac{(Q_0 - \Delta Q)C}{1000} \sum_{i=1}^n (1+r)^{i-1}}{1000};$$

2. Дисконтированный срок окупаемости с учётом наращения (капитализации) поступающих доходов:

$$T_{np} = \frac{\ln\left(1 + \frac{1+r\Delta K}{0,001 \cdot \Delta Q \cdot C}\right)}{\ln(1+r)},$$

где ΔK – стоимость утепления, тыс. руб.; Q_0 – базовое значение расхода тепловой энергии без проведения мероприятий, Гкал/год; ΔQ – величина экономии, Гкал/год; C – стоимость 1 Гкал в базовый год, руб/Гкал; r – величина ежегодного повышения стоимости тепловой энергии; n – срок службы утепления.

Утепление перекрытия подвала характеризовалось большими затратами им алой величиной экономии, поэтому из оценки было исключено. Полученные результаты приведены в табл. 1

Таблица 1

Показатели эффективности утепления

Толщина утеплителя (стены)	Толщина утеплителя (чердачное перекрытие)						
	0	6	8	10	12	16	20
Стоимость жизненного цикла З							
0	71,5	69,8	69,2	68,9	68,7	68,7	69,2
6	67,0	65,3	64,7	64,4	64,2	64,2	64,7
8	65,6	63,9	63,3	62,9	62,7	62,7	63,3
10	64,6	62,9	62,3	61,9	61,7	61,7	62,3
12	63,9	62,2	61,7	61,3	61,1	61,1	61,6
16	63,7	62,0	61,5	61,1	60,9	60,9	61,4
20	64,7	63,0	62,5	62,1	61,9	61,9	62,4
Срок окупаемости с учётом дисконтирования поступающих доходов T_{np}							
0		16,4	15,9	15,8	15,9	16,5	17,4
6	14,4	15,1	15,0	15,0	15,1	15,4	15,9
8	13,5	14,5	14,4	14,5	14,6	14,9	15,4
10	13,2	14,2	14,1	14,2	14,3	14,6	15,1
12	13,1	14,1	14,0	14,1	14,2	14,5	15,0
16	13,5	14,3	14,3	14,3	14,4	14,7	15,1
20	14,5	15,0	14,9	14,9	15,0	15,3	15,7

Установлено, что минимальный срок окупаемости не соответствует минимуму стоимости жизненного цикла. При анализе проекта по сроку окупаемости утепление чердачного перекрытия неэффективно, тогда как оно позволяет сэкономить за 20 лет до 2 млн руб. При анализе по двум методам оптимальное значение достигается при разной толщине утеплителя. Таким образом оценка энергосберегающих проектов по сроку окупаемости неэффективна, так как небольшой срок окупаемости может соответствовать минимальным значениям затрат и экономии, и не позволит получить максимальную экономию на всем сроке жизни проекта.

Организация горячего водоснабжения

В настоящее время в поликлинике отсутствует горячее водоснабжение. Расход теплоты на нагрев воды для горячего водоснабжения (ГВС) составляет от 30 до 75% и в отопительный он сопоставим с потерями в здании от воздухообмена. Поэтому целесообразно рекуперировать теряемую теплоту и использовать ее для отопления или нагрева воды. Так как температура стоков из здания невысокая, то традиционные теплообменники-рекуператоры использоваться быть не могут. В таких случаях возможно использование теплонаносных установок (ТНУ), которые передают теплоту от среды (теплоносителя) с более низкой температурой к среде (теплоносителю) с более высокой температурой, что позволяет за счет охлаждения стоков нагреть воду, температура которой выше.

Для технико-экономического обоснования применение ТНУ для приготовления воды на горячее водоснабжение выполнены следующие расчеты:

- а) определена стоимость нагрева воды различными способами;
- б) рассчитан срок окупаемости установки ТНУ;
- в) рассчитана техническая и экологическая эффективность вариантов (табл. 2).

Стоимость нагрева 1 м³ для ГВС в ИТП составляет 100,52 руб. Наименьшую стоимость для получения горячей воды имеет вариант при ее нагреве в газовой колонке или индивидуальном газовом котле – 45,78 руб/м³. При одноступенчатом подогреве горячей воды ее себестоимость при применении геотермального теплового насоса выше, чем при централизованном теплоснабжении. Тепловой насос, утилизирующие теплоты вытяжного воздуха, позволяет получить более дешевую горячую воду, чем централизованное теплоснабжение.

Таблица 1

Показатели эффективности организации ГВС

№	Обозначение схемы	Стоимость нагрева 1 м ³ воды, руб.			Экономия по сравнению с ИТП, руб/м ³	Стоимость, тыс. руб	Стоимость жизненного цикла
		Первая ступень	Вторая ступень (догрев)	Всего			
Одноступенчатый нагрев							
1	ИТП – Базовый вариант	–	–	100,52	–	250	81
2	ГВК – Газовая колонка (котел)	–	–	45,78	54,74	80	37
3	ЭН – Электронагреватель	–	–	284,88	-184,36	–	228
4	ТН _г – Тепловой насос геотермальный	–	–	127,57	-27,05	1 903	104
5	ТН _в – Тепловой насос с рекуперацией теплоты вытяжного воздуха	–	–	81,34	19,18	2 426	68
Двухступенчатый нагрев							
6	ТН _г + ГВК	27,74	22,89	50,64	49,89	1 278	42
7	ТН _в + ГВК	25,53	22,89	48,42	52,10	1 433	40
8	ТН _г + ЭН	27,74	142,44	170,18	-69,66	1 278	137
9	ТН _в + ЭН	25,53	142,44	167,97	-67,45	1 433	136

При двухступенчатом приготовлении горячей воды для электронагревателя в качестве второй ступени стоимость воды получается больше, чем при централизованном теплоснабжении. Если в качестве второй ступени использовать газовую колонку, стоимость воды выше, чем при одноступенчатом приготовлении в газовой колонке.

Выводы

Методом стоимости жизненного цикла произведено исследование вариантов утепления, обеспечивающих наименьшие суммарные затраты на реализацию мероприятий и отопление. Установлено, что минимальный срок окупаемости не соответствует минимуму стоимости жизненного цикла. Таким образом оценка энергосберегающих проектов по сроку окупаемости неэффективна, так как небольшой срок окупаемости может соответствовать минимальным значениям затрат и экономии, и не позволит получить максимальную экономию на всем сроке жизни проекта.

Произведено исследование вариантов организации ГВС, обеспечивающих наименьшие суммарные затраты на реализацию мероприятий и энергоресурсы. Установка теплового насоса, утилизирующего теплоту вентиляционного воздуха, эффективней, чем получение горячей воды от централизованного теплоснабжения и может быть рекомендовано при отсутствии газоснабжения или невозможности использования природного газа в поликлинике.

Библиографический список

Ширрине К.Ж., Трубаев П.А. Ключевые аспекты функционирования системы энергетического менеджмента в бюджетных учреждениях // Научно-технические технологии и инновации. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. С. 224-232.

Ширрине К.Ж., Трубаев П.А. Особенности оценки индикаторов энергетической эффективности подразделений муниципалитетов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 10-2 (52). С. 123-126.

Shirrine K.J., Trubaev P.A. The analysis of the possibility of the energy management system integration in municipal institutions in Belgorod (Russia) // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т. 9, № 11. С. 862-868.

Апсалямова Я.И., Тарасюк П.Н., Трубаев П.А. Определение расхода энергетических ресурсов в зданиях // Образование, наука и производство. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 1183.

Гродецкая Е.В., Трубаев П.А. Анализ энергоэффективности учреждений управления образования г. Белгорода // Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения). Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. С. 133-138.

Власова А.А., Тарасюк П.Н., Трубаев П.А. Анализ структуры выработки и потребления тепловой энергии в России // Образование, наука, производство. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 2929-2935.

Energy efficiency analysis of educational institutions within the Belgorod city (Russia) / P. Trubaev, E. Gorodetskaya, P. Tarasyuk, K. Shirrine // World Applied Sciences Journal. 2014. Т. 30, № 8. С. 1024-1027.

Стенд и некоторые результаты испытаний топливосберегающего конденсационного водогрейного котла / Кожевников В.П., Кулешов М.И., Губарев А.В. и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 182-184.

Ковалев И.Н. Особенности оценки экономической эффективности долгосрочных инвестиций в энергосберегающие мероприятия // Энергосбережение. – 2013. – № 2. – С. 52-58.

Гагарин В.Г. Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий // АВОК, 2009 г.: часть 1: № 1. – С. 10-16; часть 2: № 2. – С. 14-23; часть 3: № 3. – С. 62-66.

Башмаков И.А. Оптимизация энергоэффективности зданий на основе оценки стоимости жизненного цикла // Энергосовет. 2015. – № 3. – С. 55-62; № 4. – С. 45-51.

Васильев Г.П., Колесова М.В. Экономически и экологически целесообразный уровень теплозащиты зданий // Вестник МГСУ. – 2011. – № 8. – С. 293-302.

Трубаев П.А., Гришко Б.М. Тепловые насосы. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 142 с.

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. Т. 7. № 5. С. 201-208.

УДК 621.311

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЕЙШИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ ОБЪЕКТА САНАТОРНО- КУРОРТНОГО КОМПЛЕКСА В КРЫМСКОМ РЕГИОНЕ

Магистрант **Иванова А.В.**

Научный руководитель

канд. техн. наук, доц. **Муровская А.С.**

*Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского, г. Симферополь*

***Аннотация.** В работе проведен анализ изношенности инженерно-технического оборудования объектов санаторно-курортного комплекса Крыма и определена целесообразность их реконструкции. Рассмотрено внедрение энергосберегающих технологий на объектах санаторно-курортного комплекса, что позволит существенно сократить потребление энергии от централизованной сети.*

***Ключевые слова:** объект санаторно-курортного комплекса, энергосбережение, возобновляемые источники энергии, Крымский регион.*

Крымский регион является курортно-рекреационной территорией и в настоящее время значительными темпами реализуется реконструкция объектов оздоровительного комплекса с целью создания наиболее комфортных условий для отдыхающих и обеспечения притока инвестиций для дальнейшего развития региона.

Благодаря строительству транспортного перехода через Керченский пролив, который соединяет Керченский и Таманский полуострова, в значительной мере возросло количество приезжающих на отдых. За последние двадцать лет объекты санаторно-курортный комплекса Крыма морально устарели, а основное инженерно-техническое оборудование значительно изношено. Следовательно, развитие инфраструктуры отдыха и туризма в первую очередь необходимо начинать с реконструкции санаториев и пансионатов для комфортного отдыха посетителей.

Для Крымского полуострова, по сравнению с другими субъектами Российской Федерации, имеет место значительная доля возобновляемых источников энергии, что повлечет за собой необходимость аккумуляции электричества, выработанного солнечными и ветровыми электростанциями. Это позволит модернизированной энергосистеме эффективно распределять

нагрузки в течение суток, а также выставлять на продажу лишние мегаватты на рынок электроэнергии.

Исходя из проанализированных метеоклиматических характеристик [2] рассматриваемого региона определена целесообразность размещения и использования оборудования на базе ВИЭ с целью энергоснабжения рассматриваемого объекта санаторно-курортного комплекса не зависимо от центральных сетей.

Целью исследования является обеспечение энергоснабжения объекта санаторно-курортного комплекса с применением современного электрического оборудования и новейших энергосберегающих технологий.

В соответствии с целью были решены следующие задачи:

- проанализировано состояние инженерных сетей рассматриваемого санаторно-курортного комплекса;
- рассмотрено внедрение энергосберегающих технологий на примере открытого бассейна переливного типа, позволяющие значительно снизить потребление электрической энергии из сети.

Объектом исследования был выбран открытый бассейн переливного типа с сопутствующими зданиями: здание душевых и раздевальных; здание технологической части.

Открытый бассейн переливного типа, находится на открытой уличной площадке, площадью $553,06 \text{ м}^2$, объем воды в бассейне 785 м^3 , на территории ОЛЦ-пансионата «Северный», который расположен по адресу: Республика Крым, г. Ялта.

Здание душевых и раздевальных размерами в осях $14,9 \times 10,0 \text{ м}$. Высота здания составляет $4,345 \text{ м}$, а высота помещений – $3,1 \text{ м}$; $3,13 \text{ м}$. Площадь участка составляет $154,43 \text{ м}^2$.

Суточное водопотребление определяется согласно СНиП 2.04.01-85* [3] исходя из общего количества человек, посещающих открытый бассейн, принимаем равным 2000 л/сут .

Расчет гелиоустановки с использованием плоских солнечных коллекторов (ПСК) выполняется с учетом географического и климатического расположения объекта, периодичности действия системы, наличия дублирующего источника энергии и потребности в горячей воде. Выбор типа солнечных коллекторов (СК) выполняется с учетом рабочих характеристик и ценовой политики.

Гелиоустановка круглогодичного действия, в качестве дублирующего источника тепловой энергии используется трубчатый электронагреватель (ТЭН).

Угол наклона солнечных коллекторов к горизонту принимаем $\beta = 44^\circ$, соответствующий системам круглогодичного действия.

Количество суммарной солнечной радиации, приходящейся на 1 м^2 горизонтальной поверхности в течение суток, рассчитывается согласно формуле (1.1):

$$\sum q_i = P_s \cdot I_s + P_d \cdot I_d, \quad (1)$$

где P_s – коэффициент положения солнечного коллектора для поступления прямой солнечной радиации; I_s – интенсивность прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность ($\text{Вт}/\text{м}^2$); P_d – коэффициент положения солнечного коллектора для поступления рассеянной солнечной радиации; I_d – интенсивность рассеянной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Значение суммарной солнечной радиации, приходящейся на 1 м^2 горизонтальной поверхности в течение суток, которое равно

$$\sum q_i = 3204 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2.$$

Коэффициент полезного действия η (КПД) установки рассчитывается по формуле (1.2):

$$\eta = 0,8 \cdot \left[\theta - \frac{9 \cdot U \cdot (0,5 \cdot (t_{w1} + t_{w2}) - T_0)}{\sum_i q_i} \right], \quad (2)$$

где $\theta = 0,84$ – приведенная оптическая характеристика СК [4]; $U = 1,75 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ – приведенный коэффициент теплопотерь СК (при скорости ветра $5 \text{ м}/\text{с}$) [4]; $t_{w1} = 18 ^\circ\text{C}$ – температура холодной воды; $t_{w2} = 55 ^\circ\text{C}$ – температура горячей воды; $T_0 = 20,81 ^\circ\text{C}$ – средняя температура окружающей среды; $\sum q_i = 3204 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ – суммарная солнечная радиация.

Рассчитаем η установки по формуле (1.2):

$$\eta = 0,8 \cdot \left[0,84 - \frac{9 \cdot 1,75 \cdot (0,5 \cdot (18 + 55) - 20,81)}{3204} \right] = 0,61 \text{ или } 61\%$$

Площадь солнцепоглощающей поверхности A , м^2 для СК, следует определять по формуле (3):

$$A = \frac{C_B \cdot G \cdot (t_{w2} - t_{w1})}{\eta \cdot \sum_i q_i}, \quad (3)$$

где $C_B = 4190 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – теплоемкость воды; $G = 2000 \text{ л/сут}$ – суточный расход горячей воды; $\sum q_i = 11,53 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^2$ – интенсивность солнечной радиации.

Рассчитаем площадь солнцепоглащающей поверхности по формуле (3):

$$A = \frac{4190 \cdot 2000 \cdot (55 - 18)}{0,61 \cdot 11,53 \cdot 10^6} = 44,1 \text{ м}^2.$$

При разработке данного проекта были использованы высокоэффективные ПСК фирмы «ЯSolar», расчетная площадь солнцепоглащающей поверхности составит (4):

$$A_p = A \cdot K, \quad (4)$$

где K – поправочный коэффициент для пересчета от площади СК к площади выбранного ПСК [4].

Вычислим площадь коллекторов по формуле (4) согласно выбранному поправочному коэффициенту K для ПСК фирмы «ЯSolar»:

$$A_p = 44,1 \cdot 0,75 = 33,1 \text{ м}^2.$$

Определим необходимое количество коллекторов исходя из расчетной площади солнцепоглащающей поверхности A_p и площади абсорбера A :

$$N_k = A_p/A = 33,1/2,04 \approx 16 \text{ шт.}$$

Рассчитанное количество гелиоколлекторов необходимо для обеспечения горячего водоснабжения здания душевых и раздевалных. Целесообразно разделить систему на две автономные гелиоустановки для раздельного функционирования мужских и женских душевых. Следовательно, каждая гелиосистема включает в себя по восемь ПСК фирмы «ЯSolar». В каждой секции соединено между собой последовательно по четыре коллектора.

Каждая из гелиосистем обеспечивает нагрев бака-аккумулятора для обеспечения нужд ГВС мужских и женских душевых. Определим требуемый объем бака-аккумулятора. Рассчитаем объем бака-аккумулятора для каждой из гелиосистем по формуле (5):

$$V = (0,06 - 0,08) \cdot A_p, \quad (5)$$

где 0,06-0,08 – коэффициент, учитывающий климатический район строительства.

Рассчитаем требуемый объем бака-аккумулятора по формуле (5):

$$V = 0,07 \cdot 33,1 = 2,32 \text{ м}^3.$$

Принимаем два стандартных бака-аккумулятора марки «БУФЕР TANK» объемом 1,5 м³ для работы двух гелиоустановок.

С целью обеспечения нагрева воды в открытом плавательном бассейне переливного типа проектом предусмотрена установка теплового насоса типа «воздух-вода».

Для расчета тепловой мощности системы подогрева воды в бассейне приняты следующие исходные данные:

- температура холодной воды на входе в систему: 18°C;
- температура подогретой воды в бассейне: 28°C;
- объем заливаемой части бассейна: $V_B = 785 \cdot 10^3$ л;
- время подогрева воды: $\tau_{\text{нагр}} = 10$ час.

Количество тепла необходимое для подогрева воды в бассейне определяется по формуле (6):

$$\begin{aligned} Q_B &= \rho_B \cdot V_B \cdot C_B \cdot (t_k - t_n) = \\ &= 785 \cdot 10^6 \cdot 4,19 \cdot (28 - 18) = 32891,5 \text{ МДж.} \end{aligned} \quad (6)$$

Мощность тепловой энергии системы определяется по формуле (7):

$$P_B = \frac{Q_B}{\tau_{\text{нагр}}} = \frac{32891,5 \cdot 10^6}{10 \cdot 3600} = 913,66 \text{ кВт} \quad (7)$$

Для расчета среднего значения мощности тепловой энергии, обеспечиваемой ТН типа «воздух-вода» принято следующее:

- электрическая мощность ТН: $P_{\text{эл}} = 54,8$ кВт;
- коэффициент трансформации ТН: $\mu = 4,1$;

Мощность тепловой энергии ТН, $P_{\text{тепл ТН}}$ рассчитывается по формуле (8):

$$P_{\text{тепл ТН}} = 54,8 \cdot 4,1 = 225 \text{ кВт} \quad (8)$$

Для объекта необходимо 3 тепловых насоса типа «воздух-вода» фирмы Meeting MD300D мощностью 85 кВт.

Выводы:

1. Проведено исследование энергоснабжения объекта санаторно-курортного комплекса Крыма с применением современного электрического оборудования и новейших энергосберегающих технологий.

2. Рассчитана гелиосистема, полностью обеспечивающая потребность горячего водоснабжения душевых и раздевальных здания.

3. Рассчитана система подогрева воды в открытом плавательном бассейне за счет внедрения тепловых насосов с целью снижения потребления традиционных энергоресурсов.

Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание / Минэнерго России. – М.: 2018. – 330 с.

2. Климатический паспорт Крыма: стат. сб. Симферополь: Гидрометцентр в АРК, 2012. 75 с.

3. СНиП 2.04.01-85*. Внутренний водопровод и канализация зданий / Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1985. 145 с.

4. Новый Полюс. Солнечные энергоустановки с 2005 г. [Сайт]: ООО «Новый полюс» [2019]. URL: <http://www.newpolus.ru/>.

5. Гелиосистемы для нагрева воды и топления [Сайт]: ООО «Оптон Импэкс» [2019]. URL: <http://optonimpex.com/>.

6. Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма / Н.В. Багров, В.Н. Боков, С.П. Муровский и др.; под ред. Н.В. Багрова. Симферополь: Доля, 2000. 294 с.

7. **Бекман У., Клейн С., Даффи Дж.** Расчет систем солнечного тепло-снабжения: пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1982. 80 с.

8. **Иванова А.В., Муровская А.С.** Разработка проекта комбинированного энергоснабжения объекта санаторно-курортного комплекса в условиях Крымского региона // Матер. IV науч.-практ. конф. проф.-преп. состава, асп., студ. и мол. уч. «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского». Симферополь, 2018. Т. 6. С. 189-191.

УДК 620.9

РЕШЕНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОСТИ НАГРУЗОК В ПАКЕТЕ MATHCAD

Студент **Ионова В.И.**

Научный руководитель

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

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

***Аннотация.** Вопросы диспетчеризации энергетических потоков получают все большее значение в условиях повышения энергоэффективности систем электроснабжения. Становится актуальной привязка средств оптимизационного поиска к условиям непостоянства характеристик объектов систем. В статье рассматривается возможность реализации оптимизационных функций пакета MathCad при решении транспортной задачи распределения потоков в системах электроснабжения.*

***Ключевые слова:** транспортная задача, оптимизация, MathCad.*

Транспортная задача в классической постановке [1] подразумевает наличие постоянных мощностей источников и потребителей, причем совокупная мощность потребителей должна строго соответствовать совокупной мощности источников. Учитывая весовую ранжированность конкретных связей между источниками и потребителей определяется необходимость рассматриваемых потоков. В [2, 3] оптимизация энергетических связей проводится исходя из возможности изменения весовых соотношений потоков (изменение координат потребителей), мощность источников и потребителей при этом считаются постоянными. Представляет интерес рассмотрение вопроса распределения энергопотоков с учетом непостоянства нагрузочных способностей потребителей. Мощность конкретного источника в данном случае должна иметь возможность изменяться в пределах оговоренного ресурса.

Цель работы: сокращение затрат проектировщика при разработке систем электроснабжения.

Содержательная часть

Структуру связей между источниками и потребителями можно представить в виде неориентированного графа связей (рис. 1).

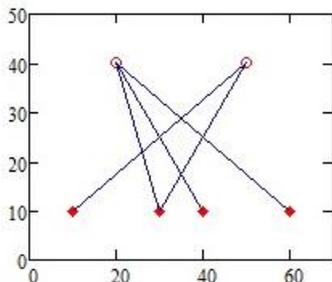


Рис. 1. Граф связей

Целевая функция, описывающая процесс, представляет собой совокупную сумму потоков мощностей и мощностей источников.

$$Z = \sum k_i \cdot x_i + \sum k_{ij} \cdot x_{ij},$$

где k_i и k_{ij} – соответственно весовые коэффициенты потока мощности и значимости источника; x_i – мощность передаваемая через канал; x_{ij} – мощность источника.

Условие оптимизации $Z \rightarrow \min$.

В математическом пакете MathCad [4] оптимизационные функции реализованы в виде подпрограмм поиска экстремума численными методами. Интерес представляет решение задачи распределения мощностей потоков при изменяющейся во времени нагрузке, для чего требуется организация циклического обращения к функциям оптимизации, на каждом шаге которого фиксируется временное значение нагрузки.

Следует отметить, что в пакете MathCad (MathCad 14), использующем интерактивный графический интерфейс, вычислительные операции программируются с учетом специфических особенностей, в частности, вызов функции оптимизации Minimize и Maximize не сочетается с организацией циклов и подпрограмм. Требуется вводить специальный оператор, объединяющий решаемые уравнения совместно с функциями оптимизации. Однако вышеуказанный блок не работает в теле цикла.

Для решения задачи организации циклической обработки данных приходится использовать команды запуска – остановки вычислительного процесса (Enable Evaluation, Disable Evaluation) в сочетании с оператором записи в файл APPENDPRN. После остановки вычислений меняются входные данные, вычисления восстанавливаются и результат решения фиксируется в файле – таблице в виде добавочной записи.

После окончания прогонки всех результатов таблица считывается из файла в массив памяти, обрабатывается и выводится в форме диаграмм.

На рис. 2 представлена диаграмма изменения во времени требуемых мощностей потребителей, а на рис. 3 – мощностей, выдаваемых источниками. Изменения потоков от источников к потребителям можно проследить на рис. 4 и рис. 5.

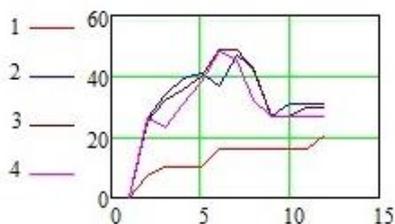


Рис. 2. Мощности потребителей

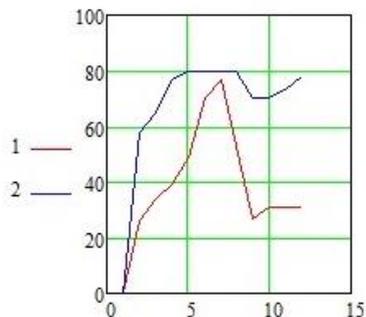


Рис. 3. Мощности источников

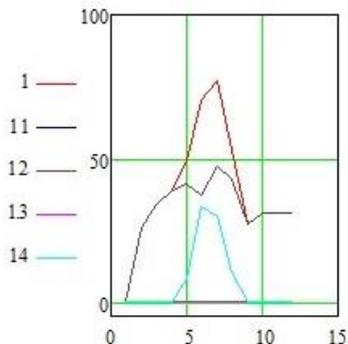


Рис. 4. Потоки от первого источника

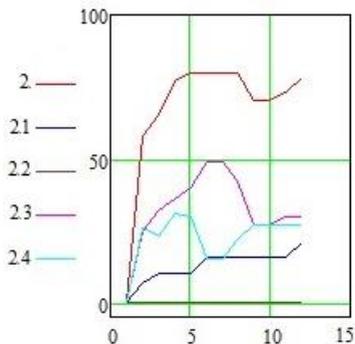


Рис. 5. Потоки от второго источника

Выводы по работе

Пакет MathCad положительно зарекомендовал себя с точки зрения удобства интерфейса, наглядности результатов и минимума затрат на обеспечение простых расчетов. Усложненные алгоритмы, даже при наличии программных ограничений, могут быть эффективно реализованы, что позволяет использовать математический пакет на этапе предварительной разработки проектов.

Учет переменности мощностей потребителей дает возможность моделировать диспетчеризацию энергопотоков с возможностью их оптимизации и давать математическое обоснование для определения необходимых и достаточных объемов ресурсов мощностей источников.

Предложенную работу можно рассматривать как предварительный этап создания систем автоматизированного управления диспетчеризацией систем электроснабжения.

Библиографический список

1. **Костин В.Н.** Оптимизационные задачи электроэнергетики: учеб. пособие. СПб.: СЗТУБ, 2003. 120 с.
2. **Комиссаров А.В.** Решение транспортной задачи электроснабжения промышленного предприятия с использованием пакета MathCad. // Энергетика 2017: 12-я межд. научно-техн. конф. студ., асп. и мол. уч. Иваново: ИГЭУ, 2017. Т.5. С. 174-175.
3. **Балашов А.А.** Оптимизация схем электроснабжения предприятий с использованием пакета MathCad. // Энергетические системы. Секция молодых ученых: 2-я межд. научно-техн. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. С. 12-15.
4. **Дьяконов В.П.** MathCad 2001: учебный курс. СПб.: Питер, 2001. 624 с.

УДК 621.31:620.92

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ВЫРАБОТКИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА РАБОТУ ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ*

Студент **Капустин Р.О.**

Научный руководитель

д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**

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

***Аннотация.** Произведен анализ работы в объединений энергосистеме Юга объектов солнечной и ветрогенерации, планируемых к вводу в 2019–2022 годы. Установленная мощность ВИЭ составит 13% от суммарной мощности, ВИЭ смогут обеспечить обеспечить 3,5% потребности в электроэнергии областей, включенных в ОЭС Юга. В отдельные периоды ВИЭ могут компенсировать до 20-30% от потребления электроэнергии, как правило это будет происходить в ночные часы, когда потребление минимально. Показано, что вследствие несовпадения максимумов потребления и выработки альтернативная генерация не позволит снизить установленную мощность традиционной.*

***Ключевые слова:** солнечные электростанции, ветроэлектростанция, ВИЭ, объединенная энергосистема.*

Альтернативные источники энергии характеризуются непостоянство выработки. Включение солнечных и ветроэлектростанций в состав единой энергосистемы требует резервирования мощности альтернативных источников и маневрирования работы традиционной генерации в зависимости от величины выработки альтернативной. В ходе конкурсного отбора проектов ВИЭ, проведенного в России в 2017–2018 г. в течении следующих трех лет планируется постройка ветрогенерации установленной мощностью 2,8 ГВт и солнечной генерации установленной мощностью 0,67 МВт. Значительная часть этих объектов будет размещена на Юге России в следующих регионах: Астраханская обл.; Волгоградская обл.; Краснодарский край; Ставропольский край; Республика Крым.

Цель работы: выполнить анализ эффективности работы солнечных и ветроэлектрических станций при их работе в составе объеди-

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

нённой электросети на примере объединенной энергосистемы Юга (ОЭС Юга).

Решаемые задачи:

1. Анализ установленной генерации и плановой альтернативной генерации регионов ОЭС Юга.

2. Прогнозирование ежечасного потребления электроэнергии в ОЭС Юга.

3. Расчет выработки энергии альтернативными источниками энергии.

Анализ ОЭС Юга

Объединенная энергетическая система Юга располагается на территории Южного и Северо-Кавказского Федеральных округов и включает 15 субъектов Российской Федерации. В ее состав входят 13 региональных энергетических систем. Общее потребление в ОЭС Юга составляет около 100 млрд кВт·ч в год.

Установленная мощность традиционной генерации в ОЭС составляет 13 ГВт, из них 25% гидроэлектростанции, 75% топливные электростанции. В 2018–2021 годах в ОЭС планируется установить объекты возобновляемой энергетики установленной мощностью 1,86 ГВт, из них 0,5 ГВт солнечные электро-станции и 1,3 ГВт ветроэлектростанции. В Краснодарском крае будут строиться ветроэлектростанции, в остальных – солнечные электростанции. После их строительства возобновляемая энергетика составит 13% от общей установленной мощности электростанций.

Анализ установленной мощности электрогенерации с учетом плановой постройки объектов ВИЭ приведено в табл. 1, общая структура выработки – на рис. 1.

Таблица 1

Установленная мощность, МВт

Область	Объекты ветро- и солнечной генерации			Имеющаяся генерация		
	СЭС	ВЭС	Всего	ГЭС	ТЭЦ, ГРЭС	Всего
Астраханская обл.	195,25	124	319,5	-	733	1052,2
Волгоградская обл.	90	-	90	2671	1501	4262
Краснодарский край	-	1218	1218	76,9	2155	3449,9
Ставропольский край	50	-	50	578	4095	4723
Республика Крым	185,56	-	185,5	-	1053	1238,5
Всего	521,08	1342	1863	3325,9	9537	14725,98

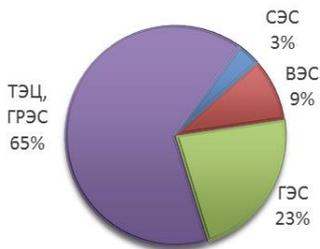


Рис. 1. Структура установленной мощности

Для определения эффективности возобновляемых источников энергии необходимо рассчитать выработку ВЭС и СЭС, и определить режим потребления электроэнергии выбранной энергосистемы.

Анализ выработки электроэнергии

Для анализа выработки электроэнергии солнечными и ветроэнергетическими станциями использовался сайт <https://www.renewables.ninja/>, представляющий погодные данные на основании глобальных моделей и спутниковых наблюдений. Сайт позволяет рассчитать фактическую выработку электроэнергии ветро- и солнечными станциями в любой точке мира. Для расчета были взяты данные в конкретных местах установки СЭС и ВЭС. Результаты расчета представлены в табл. 2 и на рис. 2, 3.

Таблица 2

Выработка электроэнергии ВИЭ

Наименование	Установленная мощность	Годовая выработка, млн кВт·ч	КИУМ
Данные по регионам			
Краснодарский край	933,0	2712,3	33,2%
Астраханская обл.	180,3	263,3	16,7%
Волгоградская обл.	100,0	140,9	16,1%
Республика Крым	185,6	280,3	17,2%
Ставропольский край	37,5	52,5	16,0%
Всего	1436,3	3449,4	27,4%
Данные по видам ВИЭ			
СЭС	503,3	737,0	16,7%
ВЭС	933,0	2712,3	33,2%
Всего	1436,3	3449,4	27,4%

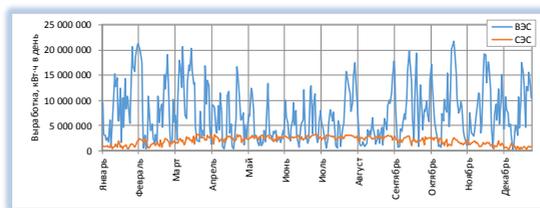


Рис. 2. Общая выработка электроэнергии, кВт·ч в день

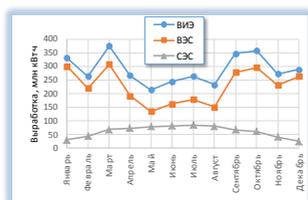


Рис. 3. Общая выработка электроэнергии ВИЭ, млн кВт·ч в месяц

Выработка электроэнергии объектами ВИЭ в разные сезоны неравномерная. В течении года выработка ветрогенерация минимальна в летние периоды, при этом солнечная генерация максимальная. Разница между выработкой СЭС в летний и зимний период составляет около 55 млн кВт·ч в месяц. Такая же разница для ВЭС составляет около 110 млн кВт·ч в месяц.

Если дневная выработка солнечной генерации в течении года стабильна и зависит в основном от времени года, то колебания выработки ветровой энергии могут составлять очень большую величину, причем выработка от максимальной величины до 0 может падать в течении всего нескольких дней. Поэтому можно сделать вывод, что ветрогенерация является ненадежным источником энергоснабжения и требует резервирования традиционной генерации или систем накопления энергии

Ветростанции, расположенные в разных местах, могут значительно отличаться по величине выработки. Поэтому для повышения надежности энергоснабжения необходимо увеличивать зону установки ветростанций и их количество. Для компенсации снижения выработки ВЭС в летний период установленная мощность ВЭС и СЭС должны быть равны, а в настоящее время мощность ВЭС превышает мощность

СЭС в два раза. Поэтому для компенсации снижения выработки ВЭС в летний период мощность СЭС необходимо удвоить.

Прогноз потребления электроэнергии

Для прогноза потребления электроэнергии в течении года использовались данные работ [] (рис. 4), а течении суток – отчета [] (рис. 5).

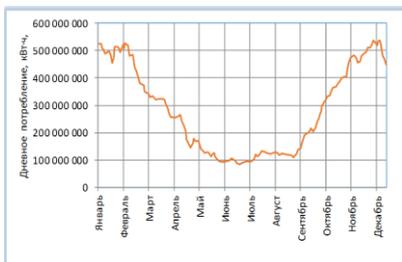


Рис. 4. Дневное потребление ОЭС Юга, кВт·ч []

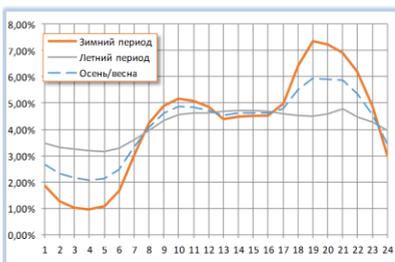


Рис. 5. Среднесуточное потребление ОЭС Юга, кВт·ч []

Потребление значительно различается в разные сезоны и в разное время суток. В летние месяцы, когда выработка электроэнергии СЭС наибольшая, потребление, наоборот, минимальное. Поэтому установка СЭС не позволит снизить установленную мощность традиционной генерации, так как она будет необходима для обеспечения повышенного потребления в зимнее время.

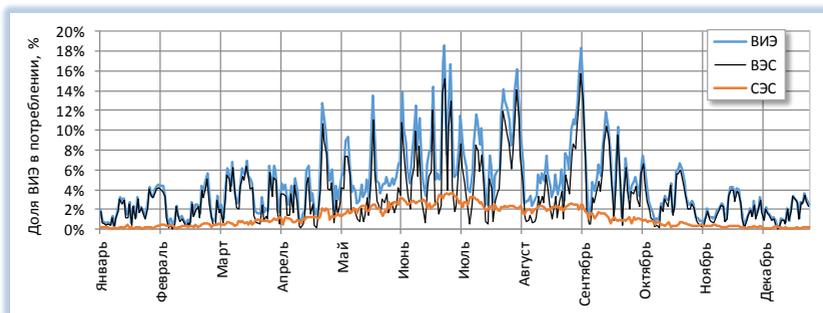
Расчет доли потребления, которое может быть обеспечено ВИЭ

Сопоставляя выработку электроэнергии ВИЭ и потребление можно оценить долю потребления, которое может быть обеспечено ВИЭ (рис. 6).

Анализ потребления в течении суток

В течении суток максимальное потребление зафиксировано в районе 11–12 часов и 19–21 часа (рис. 5). Солнечная генерация имеет максимум в полдень, поэтому она может компенсировать дневной пик потребления. В вечерние часы ветрогенерация и солнечная генерация минимальные (рис 7, 8). Поэтому для компенсации повышенного потребления они использоваться не могут и необходима традиционная генерация. Поэтому и в связи с суточными колебаниями снизить установленную мощность традиционной генерации ВИЭ не позволяют.

Среднее за сутки



Среднее за месяц

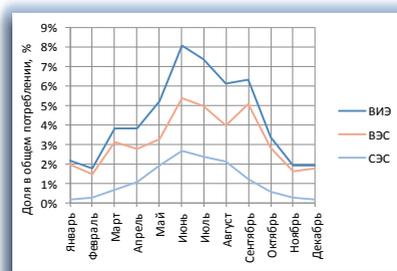


Рис. 6. Доля потребления, обеспечиваемая альтернативными источниками энергии

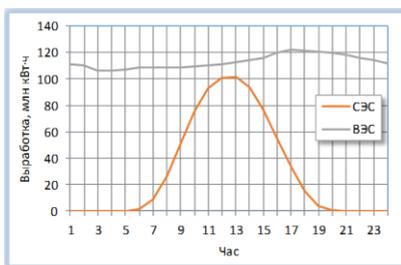


Рис. 7. Дневная выработка электроэнергии

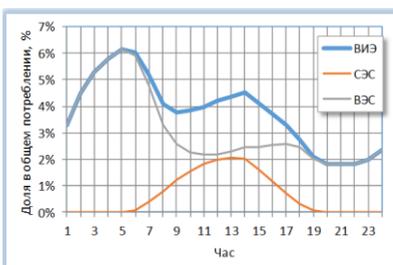


Рис. 8. Доля потребления, обеспечиваемая альтернативными источниками энергии в течении суток

Выводы по работе

1. В ОЭС Юга установлено и планируется установить до 2022 г. объекты ВИЭ мощностью 1863 МВт, из них 28% солнечной генерации и 72% ветровой. Это составит 13% от имеющегося традиционной генерации – ТЭЦ, ГРЭС и ГЭС, которая в 2019 г. составляет 14 726 МВт.

2. Анализ возможной выработки электроэнергии объектами ВИЭ показал, что в год они смогут обеспечить 3,5% потребности областей, включенных в ОЭС Юга. В отдельные периоды ВИЭ могут компенсировать до 20-30% от потребления электроэнергии, что происходит в ночные часы, когда потребление минимально.

3. Выработка электроэнергии объектами ВИЭ неравномерная. В течении года выработка ветрогенерация минимальна в летние периоды, при этом солнечная генерация максимальная. Разница между выработкой СЭС в летний и зимний период составляет около 55 млн кВт·ч в месяц. Такая же разница для ВЭС составляет около 110 млн кВт·ч в месяц. Поэтому для компенсации снижения выработки ВЭС в летний период мощность СЭС необходимо удвоить.

4. В течении суток максимальное потребление зафиксировано в районе 11–12 часов и 19-21 часа. Солнечная генерация имеет максимум в полдень, поэтому она может компенсировать дневной пик потребления. В вечерние часы ветрогенерация и солнечная генерация минимальные. Поэтому для компенсации повышенного потребления они использоваться не могут и необходима традиционная генерация. Поэтому снизить установленную мощность традиционной генерации ВИЭ не позволяют.

5. Если дневная выработка солнечной генерации в течении года стабильна и зависит в основном от времени года, то колебания выработки ветровой энергии могут составлять очень большую величину, причем выработка от максимальной величины до 0 может падать в течении всего нескольких дней. Поэтому можно сделать вывод, что ветрогенерация является ненадежным источником энергоснабжения и требует резервирования традиционной генерации или систем накопления энергии.

6. Ветростанции, расположенные в разных местах, могут значительно отличаться по величине выработки. Поэтому для повышения надежности энергоснабжения необходимо увеличивать зону установки ветростанций и их количество. Для компенсации снижения выработки ВЭС в летний установленная мощность ВЭС и СЭС должны быть равны, а в настоящее время мощность ВЭС превышает мощность СЭС в два раза.

Библиографический список

1. **Рафикова Ю.Ю.** Геоинформационное картографирование ресурсов возобновляемых источников энергии (на примере Юга России). Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУ, 2015. 176 с.

2. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2017 году [Электронный ресурс]. М.: АО «СО ЕЭС», 2018. 37 с. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2018/ups_rep2017.pdf.

3. **Макоклюев Б.И.** Особенности и тенденции потребления электроэнергии в энергосистемах России // Энергия единой сети. 2017. №5 (34). С. 64-76.

Тарасюк П.Н., Трубаев П.А. Эффективность солнечных водонагревательных установок в условиях Белгородской области // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 416-420.

Shirime K.J., Trubaev P.A. The analysis of the possibility of the energy management system integration in municipal institutions in Belgorod (Russia) // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т. 9. № 11. С. 862-868.

Гродецкая Е.В., Трубаев П.А. Анализ энергоэффективности учреждений управления образования г. Белгорода // Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения). Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. С. 133-138.

Власова А.А., Тарасюк П.Н., Трубаев П.А. Анализ структуры выработки и потребления тепловой энергии в России // Образование, наука, производство. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 2929-2935.

Energy efficiency analysis of educational institutions within the Belgorod city (Russia) / P. Trubaev, E. Gorodeckaya, P. Tarasyuk, K. Shirime // World Applied Sciences Journal. 2014. Т. 30. № 8. С. 1024-1027.

Шириме К.Ж., Трубаев П.А. Особенности оценки индикаторов энергетической эффективности подразделений муниципалитетов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 10-2 (52). С. 123-126.

Тестоседова И.В., Трубаев П.А., Тарасюк П.Н. Методы экономического анализа энергосберегающих мероприятий // Образование, наука, производство. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. С. 4306-4310.

Рычков В.В., Солдатенкова Е.И., Трубаев П.А. Оценка величины вырабатываемой электроэнергии солнечными электростанциями в Белгородской области // Энергетические, управляющие и информационные системы: Сб. докл. I межд. научно-техн. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. С. 138-141.

Оценка величины вырабатываемой электроэнергии ветряными электростанциями в Белгородской области / В.В. Рычков, К.В. Вишнякова, Е.И. Солдатенкова, П.А. Трубаев // Энергетические, управляющие и информационные системы: Сб. докл. I межд. научно-техн. конф. Бел-город: Изд-во БГТУ, 2016. С. 132-138.

Трубаев П.А. Методы автоматизации управления энергоэффективной работой насосов и насосных установок // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 140-147.

УДК 620.9

СПОСОБЫ ПОКРЫТИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ЗДАНИЙ АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ В МОСКОВСКОМ РЕГИОНЕ

Студент **Ковальчук В.В.**

Научный руководитель

д-р техн. наук, доц. **Гапо Е.Г.**

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

***Аннотация.** В статье рассматриваются различные возобновляемые источники энергии в Московском регионе и целесообразность их использования, а также сравнение с показателями в Европе и городах России. Рассмотрено развитие альтернативных источников энергии в современной России и проблема парникового эффекта.*

***Ключевые слова:** возобновляемая энергия, солнечный коллектор, тепловой насос, ветрогенератор.*

Возобновляемая энергетика может стать нашим будущим, именно тем источником энергии с минимальными отходами и без выбросов углерода, который нам нужен. Более 80% энергии создается с помощью угля, нефти и природного газа, которые усугубляют парниковый эффект. Возобновляемые ресурсы – вода, солнце и ветер – имеют свои экономические недостатки, и, хотя они постепенно набирают популярность, до будущего, зависящего от возобновляемых ресурсов, еще далеко. Вокруг возобновляемых источников энергии (ВИЭ) развернулось активное обсуждение, поэтому мы рассмотрим, что делает ее лучшим видом энергии, ее недостатки и то, как эффективно ее используют для отопления и горячего водоснабжения в Московском регионе.

Становление и развитие альтернативных источников энергии в СССР и России имеет богатую историю: от первых приливных геотермальных электростанций к тысячам мини-ГЭС в небольших поселках и деревнях. Для восстановления инфраструктуры и развития страны в послевоенный период требовалось большое количество энергии. Отсюда возросла потребность в новых источниках энергии. Несмотря на популярное мнение о том, что наша страна отстает от стран Запада в развитии возобновляемой энергетике, очень многие направления альтернативной энергетике получили свое развитие именно в СССР .

Впоследствии наша огромная страна нашла способ доставлять электроэнергию и энергоресурсы на большие расстояния: построила протяжные ЛЭП, провела газопроводы в города, и нужда во многих локальных возобновляемых источниках энергии отпала. В конце прошлого века, когда западные страны из-за экологии, истощенности и дороговизны ресурсов активно создавали индустрию ВИЭ, новая Россия развивала газовую отрасль. В последние годы активно вводятся в эксплуатацию ветровые и солнечные станции, но в масштабах нашей страны, эти мощности незначительны.

Отсутствие централизованного отопления, горячего водоснабжения и подключения дома к газу вынуждает людей искать другие источники энергии. Мы рассмотрим некоторые способы покрытия тепловой нагрузки здания и нагрузки на горячее водоснабжение с помощью альтернативных источников энергии. В Московском регионе не так много солнца и ветра, но может хватить для покрытия небольших нагрузок при использовании разнообразных аккумулирующих систем. Применение солнечного коллектора для отопления и для приготовления горячей воды экономически целесообразно.

Среднее годовое значение солнечной инсоляции в Московском регионе составляет $3,57 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. В период с апреля по сентябрь (среднее значение инсоляции $4,875 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) дом может быть полностью обеспечен горячим водоснабжением за счет энергии солнца. По этим значениям Московский регион соответствует чему-то среднему между Центральной и Северной Европы (рис. 1).

Рассчитать базовую тепловую производительность плоского солнечного или вакуумного коллектора можно по формуле:

$$Pv = \sin A * Pmax * S,$$

где Pv -мощность солнечного коллектора; $Pmax$ - средний уровень инсоляции в данной местности; A -угол отклонения плоскости коллектора от направления на юг, S -площадь коллектора.

Уровень поглощения солнечного излучения плоского коллектора порядка 95%, поэтому реальная мощность коллектора будет равна $P = Pv * 0,95$.

В остальной период года с октября по март при среднем значении инсоляции $2,256 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, когда появляется необходимость отапливать дом, солнечная система подогрева воды уже не сможет обеспечить потребности в теплоте, поэтому она только осуществляет поддержку системы отопления и горячего водоснабжения. В этом случае, оптимальным и энергоэффективным решением станет комбинация солнеч-

ного коллектора с тепловым насосом(ТНУ) и использование напольного отопления вместо стандартных радиаторов, а также бак аккумулятора, который будет хранить тепло.

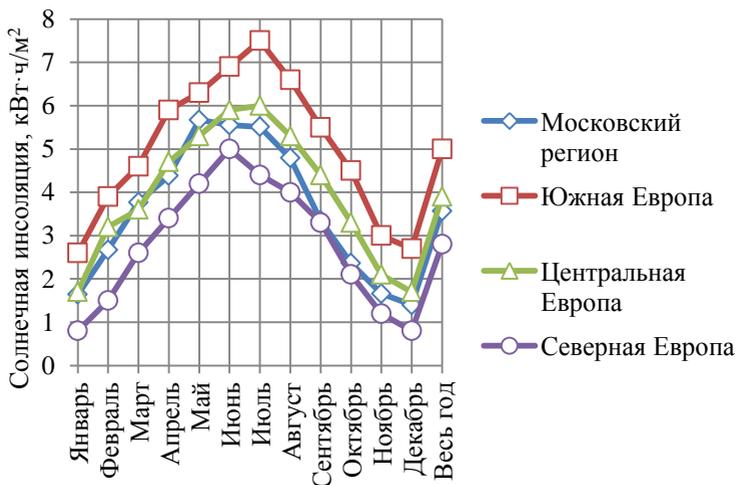


Рис. 1. Сравнительные значения солнечной инсоляции

Это особенно выгодно, когда у вас ночной тариф: ночью ТНУ нагревает воду в баке, а в дневное время дом отапливается за счет накопленного тепла. Солнечный коллектор будет нагревать воду, а тепловой насос - подогревать ее до необходимой температуры. Также, если используется геотермальный тепловой насос, то в летний период, когда в доме не используется горячее водоснабжение, с помощью коллектора можно отогреть скважину, так как чем выше температура низкопотенциального источника тепла, тем более эффективно работает тепловой насос в зимнее время года.

Еще один источник энергии – ветер. Принято считать, что экономически целесообразно и эффективно использовать ветрогенератор при средней скорости ветра (на высоте 10 метров над уровнем земли) равной 5 м/с.

Как показано на графике (рис. 2), скорость ветра в Московском регионе ниже этого показателя почти на 2 м/с. Она примерно сравнима со скоростью ветра в Санкт-Петербурге, но значительно уступает Керчи, где установка ветрогенератора действительно целесообразна. Так-

же минусом будет загрязнение территории вокруг ветроустановки шумом. Но в случае, если на ваш дом выделили слишком малую электрическую мощность и ее не хватает на покрытие электрической нагрузки, то экономическая обоснованность и эффективность встает на второй план. Учитывая непостоянность ветра, необходимо приобрести выпрямитель электроэнергии. А также, в случае отсутствия ветра, необходимо приобрести аккумулирующую батарею, чтобы подача электроэнергии не прекращалась.

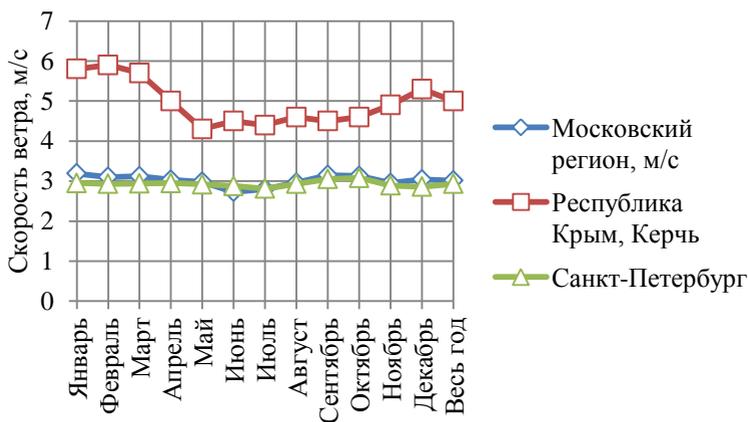


Рис. 2. Сравнительные показатели скорости ветра

Далее рассмотрим преимущества и недостатки воздушного и геотермального тепловых насосов. Новые модели воздушных тепловых насосов в среднем годовом коэффициенте трансформации тепла опередили геотермальные тепловые насосы, также их монтаж намного проще и дешевле, казалось бы, одни плюсы, но при этом есть и большой минус: при -25°C его эффективность очень низкая, а при -28°C он перестанет работать, что делает его не очень практичным без дополнительного источника тепла (пеллетный котел или камин) в Московском регионе, так как такие морозы здесь не редкость.

Геотермальный тепловой насос продолжает работать и при более низких температурах, пока температура грунта это позволяет. Его минусом является стоимость и сложность монтажа: необходимо место на участке для прокладки труб в земле или бурения скважины, также при неправильном расчете скважины тепловой насос может ее заморозить,

его эффективность снизится, и он может перестать работать. Для отогрева скважины целесообразно использовать солнечный коллектор, об этом было написано выше.

Выводы. Таким образом, в Московском регионе полное покрытие тепловой нагрузки частного дома за счет альтернативных источников энергии возможно только при гибридной системе теплоснабжения. Например: конфигурация теплового насоса, солнечного коллектора и пеллетного котла, как резервного источника и других источников тепла. Каждая гибридная система имеет свои особенности – это характер системы, объем и мощность. Кольцевая гибридная система, в которой тепло от разных источников передается между всеми элементами системы: где-то тепло утилизируют (излишнее тепло на кухне и тепло вытяжной вентиляции) и потом его передают в разные элементы системы (Ирис Конгресс Отель). Лучевая гибридная система, в которой тепло от разных источников собирается в коллекторном узле и далее расходуется на систему теплоснабжения. Достоинством гибридной системы является использование различных источников тепла, видов топлива и уменьшение негативного влияния на окружающую среду.

Библиографический список

1. **Гашо Е.Г., Кульбачевский А.О.** Возобновляемая энергетика: будущее рядом. М.: Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, 2018. 40 с.
2. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре / Е.Г. Гашо, С.А. Козлов, В.С. Пузаков и др. М., 2017. 204 с.
3. Расчет солнечного коллектора для отопления дома [Сайт]: ВТепле – информационный ресурс про отопление и микроклимат [2019]. URL: <https://vteple.xyz/raschet-solnechnogo-kollektora-dlya-otopleniya-doma/> (дата обращения 10.10.2019).
4. **Гашо Е.Г., Разоренов Р.Н.** Возобновляемая энергетика: отечественные реализованные проекты //СОК. 2019. № 4. С. 60-73.

УДК 66.067.8

КОМПЛЕКСНАЯ ОЧИСТКА ВОДЫ ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Аспирант **Коржов А.Н.**
Аспирант **Романюк Н.А.**
Студент **Бондаренко И.Д.**
Научный руководитель
канд. хим. наук, доц. **Лоза С.А.**

Кубанский государственный университет, г. Краснодар

Аннотация. *Разработка новых, инновационных, энерго-ресурсосберегающих технологий и методов предподготовки и очистки воды на ТЭС РФ в настоящее время одно из перспективных и актуальных направлений. В работе рассматривается и исследована технология безреагентной предподготовки и очистки воды для теплоэнергетики с целью снижения расхода реагентов на регенерацию ионообменных фильтров, повышению энергоэффективности и экономии природных ресурсов.*

Ключевые слова: *электромембранная коррекция рН, биполярная мембрана, катионообменная мембрана, декарбонизация.*

В настоящее время в теплоэнергетике до сих пор применяют метод ионного обмена для водоподготовки. Несмотря на относительную простоту и дешевизну метода при регенерации ионообменных колонн образуется большое количество высокоминерализованных сточных вод. Общее количество минеральных примесей, попадающее в сточные воды в 2-3 раза превышает количество извлеченных [1-4]. Применение метода биполярного электродиализа для переработки таких стоков позволит рекуперировать кислоту и щелочь, необходимые для регенерации ионообменных колонн и коррекции рН, а также значительно уменьшить количество стоков [11].

Снижение общего солесодержания, коррекция рН, снижение содержания разных форм углекислоты в воде – декарбонизация – являются одними из наиболее важных и актуальных задач предподготовки и очистки воды для теплоэнергетики. Большая часть природных вод в Российской Федерации, являются основным источником водоснабжения ТЭС, относятся к гидрокарбонатному классу [5]. Анионный состав таких природных вод представлен гидрокарбонатами кальция, магния и натрия.

Гидрокарбонаты при определенных условиях могут переходить в карбонаты, образуя отложения в трубопроводах и поверхностях нагревательных элементов, а также – в угольную кислоту, которая ускоряет коррозию стали. Согласно нормам и ГОСТам для питательных и подпиточных вод на ТЭС один из пунктов – отсутствие свободной углекислоты [1, 4]. Обычно химический процесс декарбонизации питательной воды производится на ТЭС путем известкования в осветлителях – снижение углекислоты до $0,5 \div 1,0$ мг-экв/дм³ [6, 7]. Далее карбонаты переводят в углекислоту с последующим выделением свободной СО₂.

В физических методах декарбонизации питательной воды используются декарбонизаторы различных типов и конструкций (термические, вакуумные, атмосферные, высокого давления и др.) [6, 8, 10].

Контроль содержания свободной углекислоты производят с помощью лабораторного физико-химического анализа. [6, 9].

Целью работы являлось создание бессточной безреагентной технологии очистки воды для нужд теплоэнергетики.

Водно-химический режим работы паровых котлов должен обеспечивать работу без повреждения их элементов вследствие отложений накипи и шлама, повышения относительной щелочности котловой воды до опасных пределов или в результате коррозии металла. Питательная вода для котлов должна содержать как можно меньше растворенных солей, иметь рН в диапазоне 8.5-9.5 и не содержать растворенных гидрокарбонатов и карбонатов.

В традиционных системах очистки воды методом ионного обмена требуются значительные количества кислот и щелочей для регенерации ионообменных фильтров, в результате чего образуется большое количество высокоминерализованных стоков. В предлагаемой схеме использование электродиализа с биполярными мембранами (БПМ) позволяет рекуперировать солевые стоки в кислоту и щелочь, необходимые для регенерации ионообменных фильтров [11].

Исследования проводили на электродиализаторе-синтезаторе (ЭДС с БПМ) с 3-х камерной элементарной ячейкой. Мембранный пакет состоит из чередующихся монополярных анионообменных, катионообменных мембран (Ralax СМН/АМН производства Mega a.s. Чешская Республика) и модифицированных биполярных МБ-М1, с рабочим размером 5 см*20 см=100 см².

Исходная вода (рис. 1) после механического фильтра предварительной очистки подаётся в катионообменный фильтр, где происходит её Н⁺-катионирование.

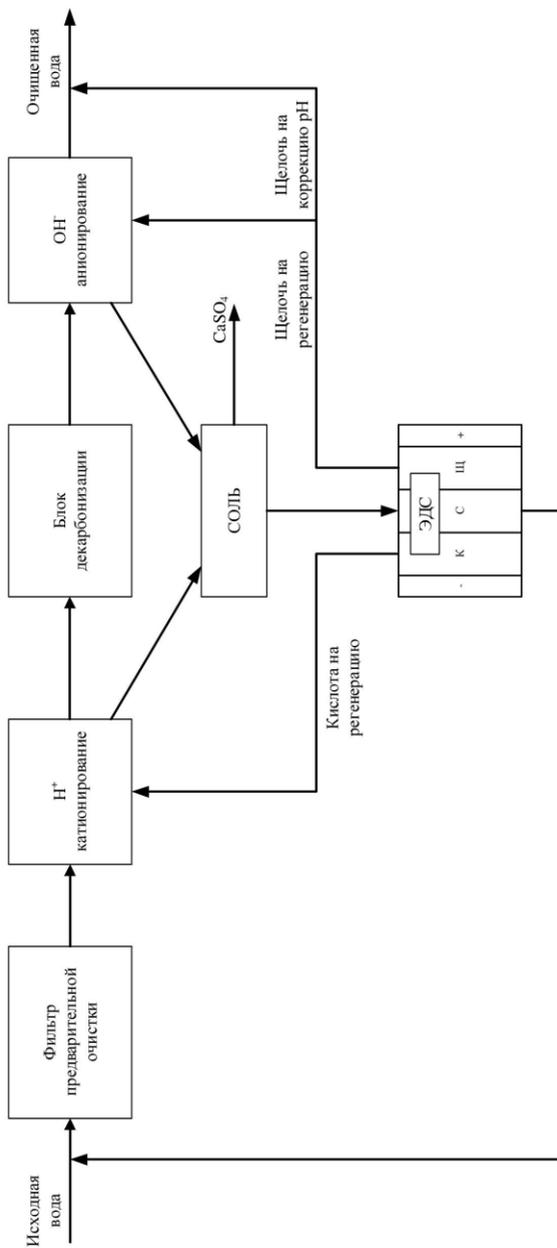
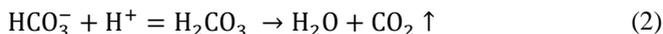


Рис. 1. Схема очистки воды для объектов теплоэнергетики

При снижении pH растворенные формы углерода переходят в угольную кислоту:



Полученная подкисленная вода подается в блок декарбонизации, где из воды удаляется растворенная угольная кислота. Затем вода поступает на ОН⁻-анионирование для удаления анионов. После исчерпания ресурса ионообменных фильтров происходит их регенерация кислотой и щелочью соответственно, которые синтезируются электрохимически электродиализаторе с БМП. Стоки после регенерации ионообменных колонн смешиваются и направляются в отстойник-осветлитель, в котором происходит выпадение малорастворимых солей, например, гипса (CaSO₄). Осветленный солевой раствор поступает в ЭДС для конверсии в кислоту и щелочь, которые используются для регенерации ионообменных фильтров. Часть щелочи смешивается с очищенной водой для корректировки pH до требуемых значений. Деминерализованный солевой раствор после ЭДС возвращается в голову процесса очистки.

Выводы. В работе разработана технологическая схема очистки воды для объектов теплоэнергетики, включающая в себя стадии ионного обмена и электродиализа с биполярными мембранами. Применение электродиализа с БМП с рекуперацией кислоты и щелочи из стоков регенерации ионообменных колонн позволяет организовать бессточную безреагентную технологию водоподготовки.

Библиографический список

1. **Кульский Л.А., Строкач П.П.** Технология очистки природных вод. 2-е изд., перераб. и доп. К.: Вища шк., 1986. 352 с.
2. **Беликов С.Е.** Водоподготовка: Справочник. М.: Аква-Терм. 2007. 240 с.
3. ПБ 10-574-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. 2008.
4. ГОСТ 20995-75. Котлы паровые стационарные давлением до 3,9 МПа. Показатели качества питательной воды и пара.
5. Справочник по свойствам, методам анализа и очистке воды / Л.А. Кульский, И.Т. Горюновский, А.М. Когановский, М.А. Шевченко. Киев: Наукова думка. 1980. Т. 1. С. 158–182.

6. **Копылов А.С., Лавыгин В.Н., Очков В.Ф.** Водоподготовка в энергетике. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 310 с.

7. Предварительная очистка воды в схемах водоподготовки: учеб. пособие / А.В. Богловский, А.С. Копылов, В.Ф. Очков и др. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 79 с.

8. **Шарапов В.И.** Термические деаэраторы. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2003. 560 с.

9. Химический контроль за водоподготовкой, водно-химическим режимом паровых котельных низкого давления, тепловых сетей и оборотных систем охлаждения / М.В. Кутуров, В.Н. Виноградов, Л.Г. Андрианова, И.А. Шатова. Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 1999. 132 с.

10. Безреагентный электромембранный процесс декарбонизации природных вод/ В.И. Заболоцкий, А.Н. Коржов, А.Ю. Бут, С.С. Мельников // Мембраны и мембранные технологии. 2019. том 9. № 6. С. 1–7.

11. **Zabolotskii V., Sheldeshov N., Melnikov S.** Heterogeneous bipolar membranes and their application in electro dialysis // Desalination. 2014. Vol.342 (2). P. 183–203.

УДК 620.9

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ МИКРОГЕНЕРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Студент **Лобья В.Е.**

Магистрант **Пономарёв Н.С.**

Научный руководитель

канд. экон. наук, доц. **Дронова Ю.В.**

*Новосибирский государственный технологический
университет, г. Новосибирск*

Аннотация

В 2018 г. на рассмотрение правительства был представлен проект изменения ФЗ «Об электроэнергетике» по вопросам микрогенерации. Вопросы создания правового поля, экономических механизмов функционирования микрогенерации являются одним из трендов энергетики не только в России, но и во всем мире. В настоящее время в этом направлении ведется научный и практический поиск, позволяющий ускорить процесс формирования перечисленных фактов. В докладе рассматриваются практические аспекты возможности реализации микрогенерации на территории Новосибирской области.

Ключевые слова: *микрогенерация, стоимость выдачи энергии в систему от микрогенератора, использование ВИЭ для микрогенерации.*

Введение

В настоящее время идет активное обсуждение проекта государственного плана по стимулированию развития микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), установленных у потребителей энергии, включая физических лиц, инициированное в рамках выполнения поручения заместителя Председателя Правительства Российской Федерации N АД-П9-776 от 11.02.2017. Различные инициативные группы, представляющие интересы потенциальных участников российского рынка микрогенерации, предлагают активно использовать имеющийся обширный зарубежный опыт государственного стимулирования микрогенерации. в том числе такие популярные стимулирующие меры, как субсидии на покупку и установку генерирующего оборудования, льготы по имущественным налогам, различные схемы продажи произведенной электроэнергии малыми генерирующими объектами в общую распределительную сеть, стандарты энергоэффективности зданий и сооружений и т. д [1].

Цель работы: определить потенциальные группы потребителей, которые могут реализовывать функции микрогенерации в системе. Предложить алгоритм расчета стоимости выдачи энергии в систему от микрогенерации. Выполнить расчет значений стоимости на примере двух потребителей Новосибирской области

1. Стимулы деятельности микрогенератора

Для развития микрогенерации необходимо создание механизмов, обеспечивающих заинтересованность потребителя в участии в этом процессе [2]. Для этого необходимо определить фактор, который может послужить стимулом для потребителя. В качестве таких стимулов мировой опыт позволяет рассмотреть [3]:

- повышение доступности присоединения к сетям энергоснабжения (стоимость и срок);
- снижение затрат на энергоснабжения;
- получение дополнительного дохода от участия в различных программах, например, по развитию ВИЭ.

Рассмотрим применимость этих стимулов в РФ. Доступность энергии, обеспеченная Постановлением Правительства РФ от 27.12.2004 N 861 (ред. от 30.01.2019), гарантирующим каждому бытовому и приравненному к ним потребителю получение возможности «дешевого» технологического присоединения к сетям, а также жесткая политика ФАС, в части соблюдения исполнения этого постановления, по сути, исключает этот стимул из рассмотрения [4]. Динамика затрат на электропотребление для потребителей, потенциально имеющих возможность стать микрогенераторами на основе данных федеральной службы государственной статистики представлена на рис. 1.

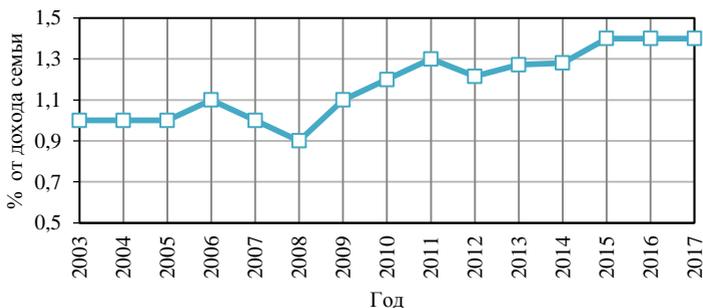


Рис.1. Доля затраты на электроэнергию от дохода семьи

Как видно, доля затрат не превышает 1,5%, что говорит о сомнительности рассмотрения этого фактора в качестве стимула. Таким образом, для развития микрогенерации потенциально может быть применен только один стимул – получение дополнительного дохода от выдачи излишков энергии в систему.

2. Экономическая модель деятельности микрогенератора

Экономическая модель для расчета стоимости энергии, выдаваемой от микрогенератора в этом случае, может быть представлена следующим образом [5]:

$$Ц = \frac{Д}{Э_{oc}} \quad (1)$$

где $Э_{oc}$ – энергия, отпущенная в сеть от микрогенератора, $Ц$ – стоимость энергии, отпущенной в сеть от микрогенератора, $Д$ – доход, получаемый микрогенератором.

$$Э_{oc} = \int (P_{CG} - P_{ПО}) dt \quad (2)$$

$Э_{oc}$ исчисляется за стандартный период расчета 1 месяц, как разница между собственной генерацией и собственным потреблением.

$$Д + З_3 > \sum З + Пр \quad (3)$$

где $З$ – затраты микрогенератора, $Пр$ – экономический стимул микрогенератора.

Основными статьями затрат являются:

$З_1$ – затраты на приобретение и монтаж установки;

$З_2$ – затраты на приобретение и монтаж приборов учета;

$З_3$ – затраты на обслуживание установки,

$З_3$ – снижение затрат на покупку энергии от энергоснабжающей компании.

Ключевым вопросом решения этой задачи является оценка значения экономического стимула, который бы удовлетворял потребности микрогенератора [6].

3. Анализ предложений по установкам ВИЭ

На данный момент на территории Новосибирской области возможна установка различного оборудования локальных энергетических установок. Для оценки целесообразности использования солнечных установок были проанализированы данные по инсоляции (табл. 1) и

фактические значения по выработки (рис. 2) установленной солнечной панели на территории города Новосибирска.

Таблица 1

Данные об инсоляции на территории НСО

Месяц	Объем среднесуточной инсоляции, кВт·ч	Продолжительность светового дня, ч
Январь	0,82	7,88
Февраль	1,68	9,78
Март	3,05	11,85
Апрель	4,41	14,08
Май	5,56	16,1
Июнь	5,91	17,23
Июль	5,75	16,72
Август	4,66	14,93
Сентябрь	3,09	12,78
Октябрь	1,81	10,58
Ноябрь	0,99	8,53
Декабрь	0,59	7,35

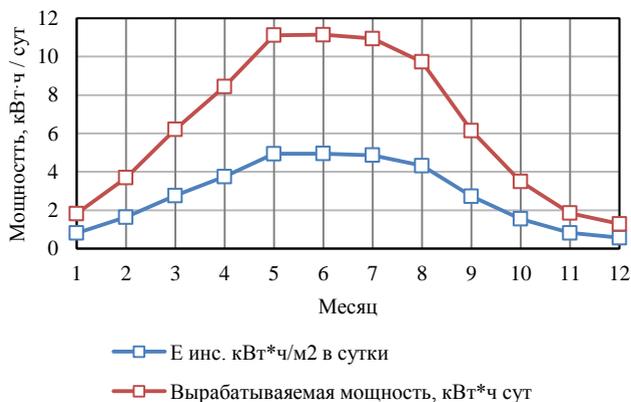


Рис. 2. Фактическая генерация электроэнергии солнечной батареей с месячной дискретностью

Территория Новосибирской области считается экономически целесообразной для установки солнечных батарей по значениям инсоляции.

4. Расчет экономических стимулов микрогенератора при использовании солнечных батарей

Для оценки экономической целесообразности рассмотрения микрогенератора с использованием солнечной установки были выбраны 2 потребителя, расположенных в том же районе, где установлена солнечная батарея:

- 1) жилое помещение, с двумя проживающими площадью 50 м²;
- 2) общественное здание, площадью свыше 500 м², оснащенное системой АСКУЭ.

На рис. 3-4 представлены типовые графики нагрузки.

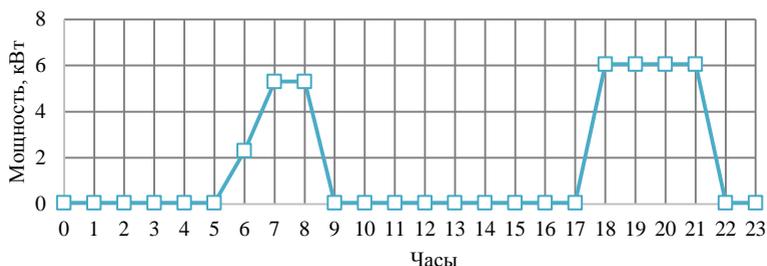


Рис. 3. Типовой график нагрузки жилого помещения

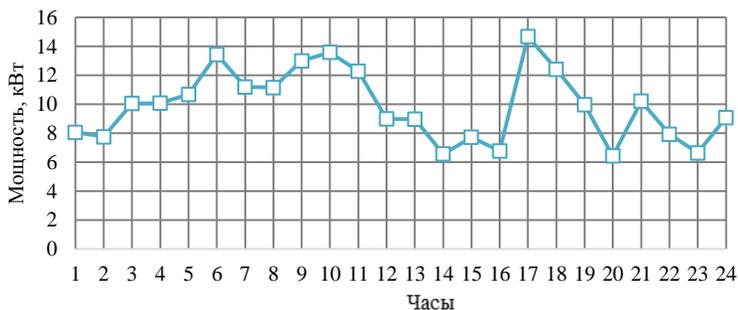


Рис. 4. Типовой график нагрузки на одной системе шин для общественного здания

Для разных вариантов солнечных панелей был проведен расчет минимальной стоимости энергии (табл. 2), генерируемой в систему при следующих исходных данных:

МАКЕТ ДЛЯ ПРАВКИ! Номера страниц меняться не будут.

- $T = 2,6$ руб/кВт·ч;
- затраты на монтаж – 10% от стоимости установки;
- затраты на техническое обслуживание – 2% в год от стоимости установки;
- затраты на установку приборов учета – 2000 руб.
-

Таблица 2

Расчет стоимости генерации энергии от микрогенератора

Наименование	Электроэнергия, генерируемая СЭС, кВт·ч/сут	Собственное потребление от СЭС, кВт·ч/сут.	Минимальная стоимость генерации
Вариант №1 (жилое помещение)	3...12	3...8	4,9 руб/кВт·ч
Вариант №2 (общественное помещение)	12...45	150 ... 250	3,4 руб/кВт·ч

Минимальная стоимость отражает только покрытие затрат на приобретение, монтаж и эксплуатацию данной установки. Такие статьи затрат, как амортизация, плата подключение к сетям не входили в расчет, так же в расчете не были учтены инфляционные факторы. При выполнении полного расчета можно предположить, что минимальная стоимость увеличится на 30-40%. Более существенным фактором, который может повлиять на увеличение стоимости покупки энергии является «стимулирующая надбавка». Ее размер в настоящее время определить достаточно сложно, можно предположить, что она должна превышать среднюю доходность безрисковых вложений, а в идеальном случае обеспечивать потребителю уровень высокой доходности. В конечном итоге минимальная стоимость с учетом всех перечисленных факторов возрастет на 80-100%. Таким образом, минимальная стоимость, которая будет интересна потребителю, начинается от 6,5 руб/кВт·ч. Для энергосистемы Новосибирской области максимальная стоимость энергии для потребителя на розничном рынке составляет 4,6 руб/кВт·ч, что значительно меньше. Это говорит о том, что при развитии микрогенерации произойдет удорожание конечной стоимости энергии, а это противоречит основной цели вносимых поправок о развитии микрогенераторов [7].

Выводы по работе

Полученные результаты показали, что при использовании ВИЭ в качестве источника микрогенерации у потребителей стоимость покуп-

ки этой энергии будет выше, чем стоимость энергии на розничном рынке данного региона. Превышение стоимости будет минимально 50%, а верхний предел ограничен только доходностью, которую будет закладывать потребитель. При условии, что в Новосибирской области стоимость энергии для непромышленных потребителей составляет от 4,5 руб/кВт·ч, то можно с уверенностью говорить, что в рамках действующих правовых норм развитие микрогенерации не имеет экономической целесообразности. Единственным выходом из этой ситуации является участие государства в части дотирования затрат на установку источников энергии.

Библиографический список

1. **Нарышкин А.А., Тюрин А.Е.** Перспективы применения в России опыта северной Европы в части использования ВИЭ // Вестник ЧГУ. 2017. № 1. С. 64-69.
2. **Tobin J.** The Theory of Portfolio Selection // The Theory of Interest Rate; Ed. by F.H.Nahn and F.R.P. Brechling. London: Macmillan, 2015. P. 3-51.
3. **Горяева К.А.** Энергосбытовая отрасль России: специфика и экономические особенности [Электронный ресурс] / Науковедение. 2015. Т. 7, № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/85EVN315.pdf>.
4. Микрогенерация на основе ВИЭ: Энергетический бюллетень / В. Гимади, А. Амирагян, И. Поминова и др.; под рук. Л. Григорьева. М.: Аналитический центр при Правительстве РФ, 2017. 27 с.
5. **Дронова Ю. В.** Организация энергетического рынка: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 88 с.
6. **Велькин В.И., Логинов М.И.** Выбор оптимального состава оборудования в кластере возобновляемых источников энергии на основе регрессионного анализа // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 3. С. 100-104.
7. Возобновляемые источники энергии в системах малой генерации / Р.В. Колосов, А.В. Пученкин, В.В. Титов, В.Г. Титов // Актуальные проблемы электроэнергетики: Матер. науч.-техн. конф. Н. Новгород, 2018. С. 207-211.

СТРАТЕГИЯ РАБОТЫ НЕЗАВИСИМЫХ ЭНЕРГОСБЫТОВЫХ КОМПАНИЙ В РОССИИ

Магистрант **Миллер И.Я.**

Магистрант **Апенькина А.И.**

Научный руководитель

канд. экон. наук, доц. **Дронова Ю.В.**

Новосибирский государственный технический университет г. Новосибирск

***Аннотация.** Для повышения уровня конкуренции энергетического рынка создаются новые условия работы, как на розничном, так и на оптовом уровне. Как следствие принятия новых нормативно-правовых актов, в будущем намечается серьезная конкуренция между гарантирующими поставщиками и независимыми энергосбытовыми компаниями. Низкий уровень активности независимых сбытовых компаний связан с реализацией ими краткосрочных целей бизнеса и отсутствием долгосрочной стратегии. В докладе приведен подход к формированию и основные элементы стратегии независимой энергосбытовой компании, которая планирует работать на розничном рынке энергии РФ в рамках ЕАЭС.*

***Ключевые слова:** энергосбытовая деятельность, гарантирующий поставщик, независимая энергосбытовая компания, естественная монополия, энерготрейдинг, ключевые показатели эффективности (КПЭ).*

Актуальность темы заключается в исследовании положении независимых энергосбытовых компании (НЭСК) на рынке сегодня и возможности адекватной конкуренции с региональными гарантирующими поставщиками (ГП) с учетом последних изменений в правилах работы оптового рынка энергии и мощности и розничного рынка энергии.

Цель работы: Разработка рекомендаций по выбору стратегии для независимой сбытовой компании.

Энергосбытовой бизнес в мире. Энергосбытовой бизнес – деятельность по продаже электрической и тепловой энергии потребителям (в значении «сбыт (продажа) энергии»). Термином «энергосбыт» также обозначают энергосбытовые организации, осуществляющие в качестве основного вида деятельности продажу произведённой или приобретённой электрической энергии [1, 3]. В мировой практике этот вид бизнеса включает следующие составляющие:

- энерготрейдинг – покупка энергии на оптовом рынке и у производителей розничного рынка (при работе в качестве отдельной компании);

- заключение договора на передачу электроэнергии и организацию взаимодействия с сетевыми компаниями (при работе в качестве отдельной компании);

- работа на розничном рынке – заключение договоров энергоснабжения с потребителями, съём показаний приборов учёта (иногда эта работа выполняется сетевыми компаниями), расчёт полезного отпуска и начисление сумм за плановое и фактическое потребление для потребителей, выписку и выставление счетов потребителям (биллинг), сбор и приём платежей, меры по взысканию задолженности потребителей-должников и неплательщиков.

По сути, энергосбытовая организация является представителем интересов потребителя в электроэнергетике (агентом) и снимает с предприятий нагрузку по взаимодействию с другими энергетическими компаниями (поставщиками) и сетевыми организациями) и инфраструктурными организациями (АО «АТС», АО «СО ЕЭС», НП «Совет рынка»).

Для защиты интересов конечных потребителей в каждой стране создается энергосбытовая компания с большой долей участия государства, которая носит название «поставщик последней инстанции» или как в РФ «гарантирующий поставщик». Чем более «развитым» или «конкурентным» является рынок, тем больше рыночная доля независимых сбытовых компаний. Например, в табл.1 представлены сравнительные показатели нескольких стран [6].

Таблица 1

Структура энергосбытовых компаний в странах мира

Страна	Пенсильвания	Канада	Австралия	Германия	Великобритания	Италия	Норвегия	Огайо (США)
Доля потребителей, обслуживаемых НЭСК	69%	75%	87%	91%	85%	73%	99%	76%
Количество НЭСК ед. на зону деятельности ТСО	50-100	28	23	80	30	> 50	> 30	35-56
Сроки смены ЭСК, дней	5	10-15	20	21	21	30	6	7

Опыт функционирования российского рынка показывает существенное отличие от иностранного по соотношению доли НЭСК к доле ГП. На рис. 1 представлена динамика изменения доли гарантирующих поставщиков по отдельным компаниям.

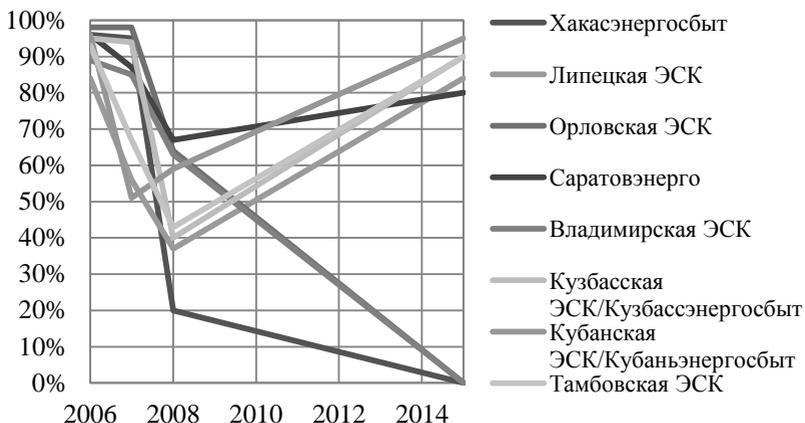


Рис. 1. Динамика изменения доли гарантирующих поставщиков [6]

Это говорит о достаточно слабой позиции НЭСК и низкой степени «развития» российского энергетического рынка. Одной из причин этого является ориентация НЭСК на краткосрочное ведение бизнеса (за исключением НЭСК, представляющих интересы крупного бизнеса) и принцип работы, основанный не на построении долгосрочной бизнес-модели, а на решении одномоментных проблем компании.

Стратегия поведения энергосбытовых компаний. На основе анализа международного опыта реформирования электроэнергетики были выделены следующие факторы, определяющие проблемное поле и влияющие на выбор бизнес-модели, организационной формы и стратегии развития ЭСК [5]:

- концептуальная модель рынка электроэнергетики,
- место на производственной цепочке ценности.

Позиционирование на цепочке ценностей осуществляется, исходя из анализа того, кому, какая и за счет чего будет создана ценность. Тем самым, в соответствии с концепцией миграции ценности определяются два главных взаимосвязанных параметра бизнес-модели [4]:

- модель ценности для потребителей (соответствие набора и качества предоставляемых услуг приоритетам целевой группы потребителей) модель прибыли (источники генерирования денежных потоков и увеличения стоимости компании).

Для каждого типа ЭСК, может быть предложено несколько вариантов классических стратегий:

Стратегия лидерства по издержкам предусматривает снижение полных издержек производства товара или услуги.

1. Стратегия широкой дифференциации направлена на придание услугам компании специфических черт, отличающих их от услуг фирм – конкурентов, в данном случае гарантирующих поставщиков. Это могут быть предложения по дифференциации стоимости энергии, реализации мероприятий по управлению спросом, предложений по изменению надежности и т.д.

2. Стратегия оптимальных издержек дает возможность фирме предложить своим покупателям более ощутимую ценность за счет сочетания низких издержек и широкой дифференциации. Задача состоит в обеспечении оптимальных (насколько возможно низких) издержек и цен по сравнению с аналогичной услугой у конкурентов. Особенности российского ценообразования позволяют НЭСК предложить потребителям, не отнесенным к категории «население», стоимость ниже, чем у ГП.

3. Сфокусированная стратегия или стратегия рыночной ниши, основанная на дифференциации продукции, ставит своей целью обеспечение представителей выбранного сегмента товарами и услугами, наиболее полно отвечающими их вкусам и требованиям.

4. Сфокусированная стратегия или стратегия рыночной ниши, основанная на низких издержках, ориентирована на узкий сегмент покупателей, где фирма опережает своих конкурентов за счет более низких издержек производства.

Возникает вопрос, что является ключевым фактором для выбора той или иной стратегии? В первую очередь, это желания собственников, которые они устанавливают в виде ключевых показателей деятельности для менеджмента компании. В таком случае алгоритм формирования стратегии НЭСК будет строиться, как показано на рис. 2.

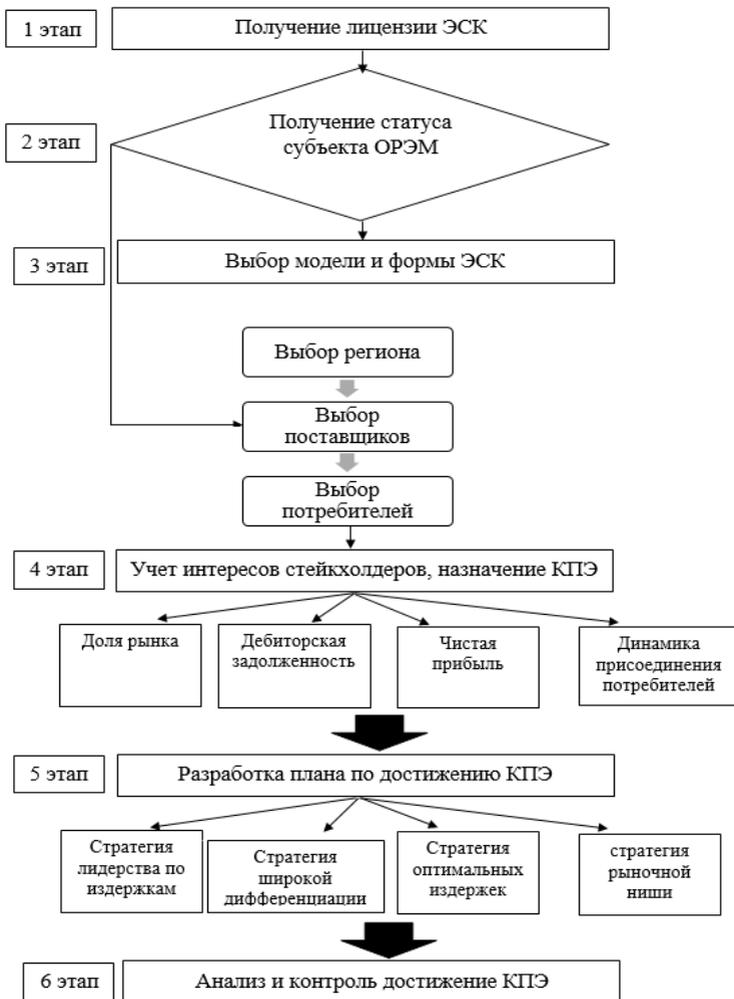


Рис. 2. Алгоритм построения стратегии НЭСК

Практический пример разработанной стратегии НЭСК. Для проверки работоспособности данного алгоритма была разработана стратегия для НЭСК, которая планирует выход на рынок энергии в Западной Сибири в рамках зоны свободной торговли ЕАЭС. В качестве основной стратегии работы была выбрана «стратегия оптималь-

ных издержек», ключевым элементов которой является возможность предложения целевой группе покупателей более низкой стоимости, чем предлагает ГП. В табл. 2-5 приведены некоторые элементы, разработанной стратегии.

Таблица 2

Разработка плана по достижению КПЭ

Стратегия	Ключевой показатель	Целевой ориентир
Стратегия оптимальных издержек	Стоимость энергии для конечного потребителя ниже, чем у ГП	Оптимизация работы на ОРЭМ (работа в секторе ДД)

Таблица 3

Выбор модели и формы НЭСК

Этап	Требования
Выбор региона	Территория Российской Федерации, и соседние государства (ЕАЭС)
Выбор потребителей	Основные требования к потребителям: <ul style="list-style-type: none"> • платежеспособность; • крупные потребители (не менее от 3000 МВт·ч в год); • не льготные (исключаются объекты опасных производств, объектов стратегического назначения, населения и т.д.); • наличие АСКУЭ; • наличие стабильных режимов нагрузки.
Выбор поставщиков	Основные условия заключения сделок на РСВ: <ul style="list-style-type: none"> • ориентирование на ДДЭ и ДДМ с ценой ниже, чем на РСВ; • минимизация работы на БР

Таблица 4

Учет интересов стейкхолдеров

Показатель	Требования
Доля рынка	Увеличение доли рынка (0,5% от рынка территории).
Дебиторская задолженность	Снижение дебиторской задолженности (максимальное значение 20% в краткосрочном периоде и 5% в долгосрочном)
Чистая прибыль	Увеличение чистой прибыли (динамика 1% в год)
Динамика присоединения потребителей	Увеличение динамики присоединения потребителей (годовая динамика 2 потребителя с перечисленными параметрами)

Таблица 5

Сценарии реализации стратегии НЭСК

Сценарий	Доля рынка	Дебиторская задолженность	Динамика присоединения потребителей
Оптимистический	20%	Снижение дебиторской задолженности (максимальное значение 20% в краткосрочном периоде и 5% в долгосрочном)	5 и более потребителей
Ожидаемый	10%	Снижение дебиторской задолженности (максимальное значение 15% в краткосрочном периоде и 3% в долгосрочном)	2 потребителя подходящих по всем требованиям
Пессимистичный	3%	Снижение дебиторской задолженности (максимальное значение 7% в краткосрочном периоде и 1% в долгосрочном)	Два и менее

На основе ключевых точек разрабатываемой стратегии с учетом трех сценариев были определены минимальные ценовые пороги, которые представлены в виде графика точки безубыточности на рис. 3.

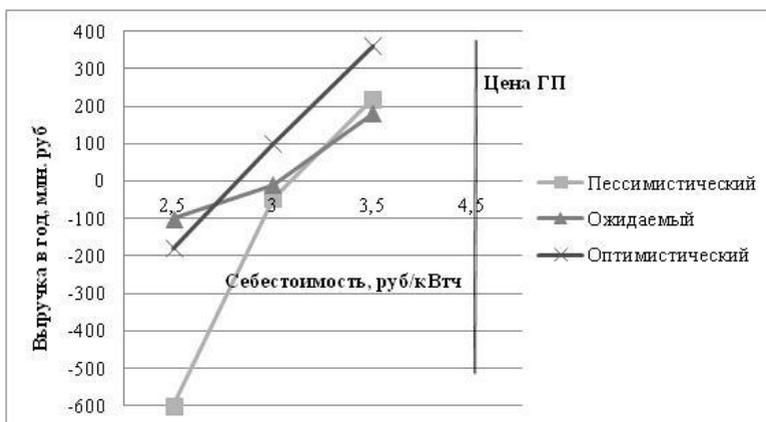


Рис. 3. Расчет цены НЭСК при различных сценариях

Вывод. Актуальность задачи развития рынка электроэнергии не снижается, ни на развитых рынках Европы, ни на российском рынке.

Одним из направлений развития рынка является увеличение доли независимых энергосбытовых компаний в регионах, но фактическая ситуация показывает, что сбытовые компании не готовы к формированию стратегий по выходу на новые территориальные рынки. В статье рассмотрены основные аспекты разработки стратегии независимой энергосбытовой компании, позволяющие получить оценки минимальных значений себестоимости энергии при выходе в конкретный регион. Такой подход формирует весь набор ключевых показателей эффективности для отслеживания этапов реализации стратегии и решает одну из проблем управления НЭСК, а именно перехода от тактического управления компанией к стратегическому.

Библиографический список

1. **Горяева К.А.** Энергосбытовая отрасль России: специфика и экономические особенности [Электронный ресурс] / Наукoведение. 2015. Т. 7, № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/85EVN315.pdf>.
2. **Полушина И.С.** Обоснование стратегии развития энергосбытовой организации на региональном рынке [Электронный ресурс] // Концепт. 2014. № 12. URL: С. 61-65. URL: <http://e-koncept.ru/2014/14345.htm>
3. Википедия. Энергосбытовая деятельность [Сайт]: Wikimedia Foundation, Inc [2019]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Энергосбыт> (дата обращения: 15.04.2019).
4. **Дронова Ю.В.** Организация энергетического рынка: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 85 с.
6. **Мельник Л.Б.** Стратегии энергосбытовых компаний в условиях перехода к конкурентному рынку электроэнергии: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. М., 2008. 165 с.
7. Ассоциация «НП Совет рынка» [Сайт]. URL: <https://www.np-sr.ru> (дата обращения: 02.04.2019 г.).

УДК 621.311.24

РАЗРАБОТКА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА В ВОЗДУХОВОД С ИСКУССТВЕННЫМ И ПОСТОЯННЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

Магистрант **Мошонкин Н.Ю.**

Научный руководитель

канд. техн. наук, доц. **Дунаева Т.Ю.**

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

***Аннотация.** В статье предлагается техническое решение по ветровому генератору небольшой мощности, использующего поток воздуха в системе охлаждения ротора генератора электростанции, для выработки электроэнергии для собственных нужд ТЭС. Использование предлагаемого устройства позволит частично скомпенсировать расходы на собственные нужды электростанции.*

***Ключевые слова:** альтернативные источники питания, ветрогенератор, воздушный поток, экономическая эффективность.*

В ближайшие годы политика Правительства РФ предусматривает расширение объемов использования альтернативных источников питания (АИП) в структуре электроэнергетики, что отражено в Энергетической стратегии России на период до 2035 года и других основных документах [1]. Разработка технического решения по использованию обработанного воздушного потока системы охлаждения ротора генератора ТЭС для выработки электроэнергии соответствует этой стратегии и позволит использовать эту энергию для собственных нужд ТЭС.

Актуальность предлагаемой разработки обосновывается отсутствием в настоящее время на рынке предложений аналогичного типа и, в свою очередь, имеющимся спросом на конструкцию таких генераторных установок.

Цель работы

Создание экспериментального образца разрабатываемой установки.

Содержательная часть

Существующие ветряные электроустановки, использующие кинетическую энергию воздушного потока в раскручивании турбины электрогенератора, имеют существенный недостаток: для обеспечения эффективной работы таких установок необходимо место с постоянной и

достаточной силой ветра. Это место обычно удалено от потребителей электроэнергии, что требует прокладки длинных электрокоммуникаций, а также изготовление дорогостоящих ветроулавливающих коробов и опорных конструкций. В результате очень часто экономическая эффективность таких ветрогенераторов остается низкой.

Поток воздуха на выходе воздуховода охлаждения ротора генератора ТЭС постоянен по направлению и силе, имеет стабильную температуру. Предлагаемое решение использования энергии этого воздушного потока состоит в том, что на выходе воздуховода устанавливается ветровой генератор малой мощности. Полученную электроэнергию предлагается использовать, например, для питания части осветительных установок ТЭС и тем самым повысить энергоэффективность предприятия.

Постоянство параметров воздушного потока в канале охлаждения ротора генератора ТЭС позволит обеспечить стабильную генерацию электроэнергии круглосуточно. Инновационная составляющая проекта заключается в том, что предлагается использовать вторичный энергоресурс отработанного воздушного потока.

По предварительным оценкам, необходимые технологические параметры воздушного потока системы охлаждения ротора генератора ТЭС при установке ветрогенератора на ее выходе сохраняются, а, значит, предлагаемая конструкция и способ установки не должны нарушить требования к охлаждению ротора.

Научная новизна идеи обеспечивается тем, что патентный поиск абсолютных аналогов разрабатываемой конструкции ветрогенератора результатов не показал.

В результате патентных исследований была найдена запатентованная конструкция, схожая в отношении самой идеи применения воздуховода для генерации электроэнергии WO2009008763A1 [2]. В этом патенте на полезную модель в качестве канала для раскрутки ротора генератора и генерации электроэнергии предлагается использовать воздушный вентиляционный канал, смонтированный в типовую конструкцию жилого здания. На основе этой идеи был разработан и предлагаемый проект.

В результате работы были разработаны эскиз всей установки в целом, способ ее монтажа в воздуховод и 3D-модель ветроколеса (рис. 1, а, б).

Расчетные параметры предлагаемого проекта были получены путем математического и программного моделирования разработанного типа ветрогенератора в среде «Аэродинама» [3]. При расчетах исполь-

зован стандартный тип профиля [4]. Исходные параметры для моделирования и полученные результаты представлены на рис. 2 – 7.

Адекватность расчетов в среде «Аэродинама» подтверждены многократным апробированием и практическим применением при проектировании ветрогенераторов различного типа.

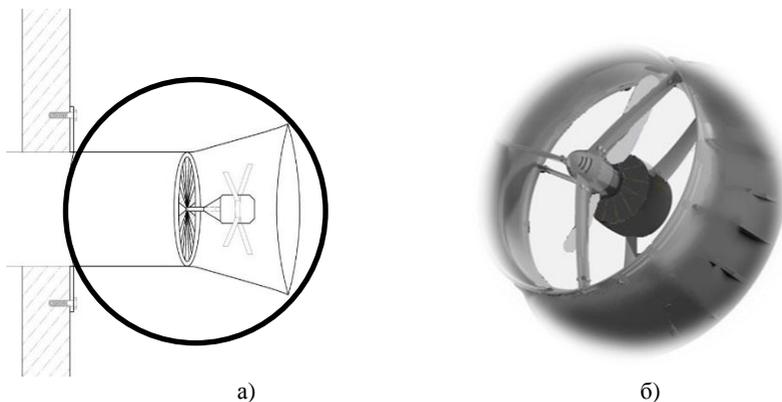


Рис. 1. Эскиз установки (а) и ее 3D-модель (б)

Среднегодовая скорость ветра:	20 м/с
Количество лопастей:	1 шт
КПД генератора:	87%
КПД мультипликатора:	Не используется
Направление вращения:	Правое
Тип профиля:	NACA 0012



Рис. 2. Исходные данные для моделирования

Скорость набегающего на лопасть потока:	20 м/с
Диаметр ветроколеса:	0.97 м
Радиус кончика лопасти:	0.48 м
Коэффициент использования энергии ветра:	0.48
Обороты при расчетном ветре:	5658 об/мин
Расчётный крутящий момент на валу генератора:	5.6 Н·м
Расчётная сила лобового давления на колесо:	593 Н
Мощность ветроколеса:	3.3 кВт

Рис. 3. Результаты аэродинамического расчета

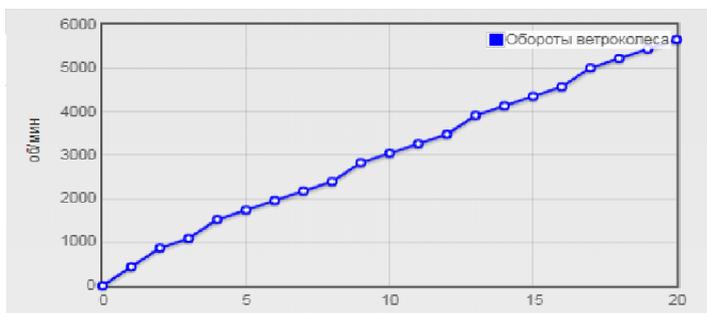


Рис. 4. Зависимость оборотов ветроколеса от скорости воздушного потока

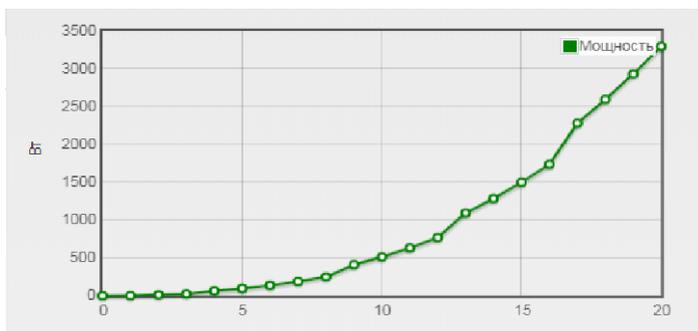


Рис. 5. Зависимость вырабатываемой электрической мощности от скорости воздушного потока

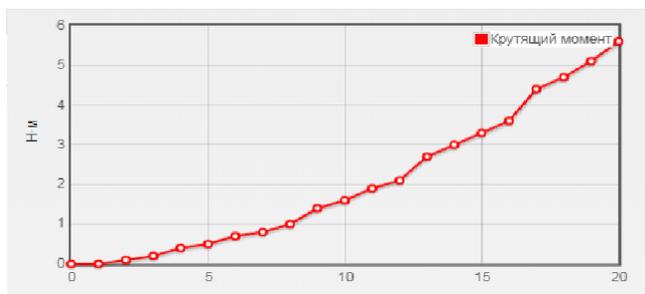


Рис. 6. Зависимость крутящего момента ветроколеса от скорости воздушного потока

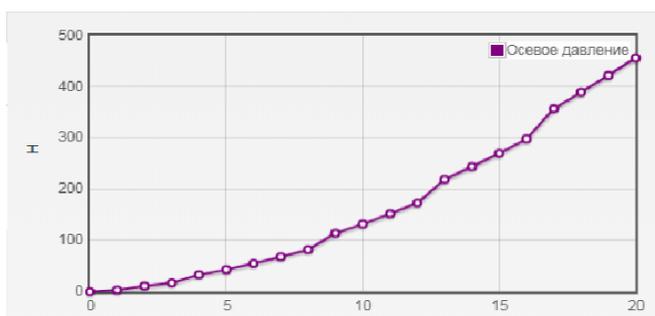


Рис. 7. Зависимость лобового давления воздушного потока от его скорости

Результаты расчетов, приведенные на рис. 2 – 7 показывают основные технические параметры для скорости потока воздуха 20 м/с. Основные технические характеристики проекта следующие:

- вырабатываемая электрическая мощность 3,3 кВт;
- выходное напряжение во внешнюю сеть 0,4 кВ;
- планируемое использование полученной электроэнергии – система освещения электростанции;
- расчетный диаметр ветроколеса 0,98 м (соответствует размерам воздуховода).

Для снижения стоимости установки и сроков ее окупаемости планируется использовать стандартную элементную базу (генератор, полупроводниковое оборудование и т.п.), широко распространенную и не требующую индивидуального изготовления. При выборе элементов будет учтен и температурный режим их работы (температура воздуха

на выходе системы охлаждения достигает 70° , что требует оборудования повышенной термической стойкости). При проектировании редуктора планируется использовать новейшие достижения в этой области, по возможности планировать в редукторе использование типовых элементов для облегчения ремонта и эксплуатации.

Предлагаемый ветрогенератор характеризуется простотой конструкции и технологичностью собственного производства. Ресурс работы установки определяется ресурсом электрогенератора и должен составлять до 25 лет работы (параметры, заявляемые производителями генераторов), определяя расчетную безотказность работы на уровне 0,995.

Электробезопасность установки соответствует требованиям нормативных документов по оборудованию подобного типа и обеспечивается типовыми решениями при его проектировании.

Таким образом, на основании проведенных расчетов и полученной 3D модели к в дальнейшем планируется выбрать элементную базу установки, электрогенератор, редуктор, сделать проверку механической прочности конструкции. В ходе исследований планируется изготовить опытный образец ветрогенератора для апробации и доработки установки.

В ходе работы были рассчитаны технико-экономические показатели проекта.

Исходные параметры расчета:

1. Норма дисконта $E = 5\% = 0,05$ (т.к. поток воздуха стабилен 24 часа в сутки, риски того, что электроэнергия не будет вырабатываться в нужном количестве – минимальны, только в результате аварии).

2. Тариф на электроэнергию: продажа $C_{э1} = 2,74$ руб./кВт · ч. Прогноз тарифов на электроэнергию с 2020 по 2035 год.

3. Отчисления на амортизацию и ремонт $p_0 = 3\%$ от капиталовложений.

4. Срок строительства принят равным – 1 год.

5. Капиталовложения распределены по годам строительства следующим образом: 1 год – 100 %.

6. Затраты на оплату труда персонала и социальные нужды – 20 тыс.руб./год (обслуживание раз в несколько лет).

Принятые капиталовложения составили 175 тыс. руб..

На рис. 8 приведено графическое определение срока окупаемости инвестиционного проекта разработки ветрогенератора в воздуховод.

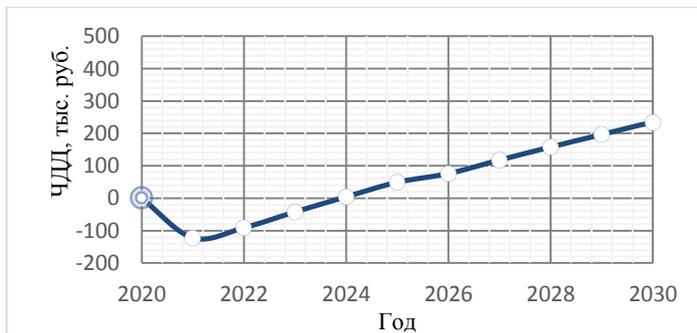


Рис. 8 – Дисконтированный срок окупаемости инвестиционного проекта

Выводы по работе

Таким образом, при $E = 5\%$ дисконтированный срок окупаемости составил 4 года с учетом времени монтажа и пусконаладочных работ. Проект разработки ветрогенератора в воздуховод с искусственным и постоянным потоком воздуха экономически выгоден и рентабелен.

Применение ветрогенераторов в качестве альтернативного вида энергии является перспективным направлением в области возобновляемых источников энергии [1], в том числе в условиях небольших хозяйств. Широкое распространение в современной промышленности оборудования, охлаждаемого направленным потоком воздуха, дает, на наш взгляд, обширные перспективы для реализации установок подобного типа с целью использования энергии этого потока и повышения энергетической эффективности предприятий.

Библиографический список

1. Проект Энергостратегии Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс]. М.: Минэнерго России, 2019. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920>
2. Patent WO2009008763A1 Wind-electric power generation by using the structure of a residential building [Электронный ресурс] / V.V. Tebuev. 2009. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2009008763A1/en>
3. **Корнелюк С.И.** Аэродинама – Математическое моделирования ветроколеса ВЕУ» // Світлотехніка та електроенергетика (СТЕЕ). 2017. №3 (50). С. 42-48.
4. Справочник авиационных профилей [Электронный ресурс]. Казань: КНИТУ им. А.Н. Туполева. URL: http://kipla.kai.ru/liter/Spravochnic_avia_profiley.pdf.

УДК 621.926.8

МАШИНЫ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ: МЕЛЬНИЦЫ И ДРОБИЛКИ*

Магистрант **Окушко В.В.**

Магистрант **Стрыжаков С.Д.**

Научные руководители

Канд. техн. наук, доц. **Орехова Т.Н.**

Ассистент **Шеремет Е.О.**

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

***Аннотация.** С развитием дорожно-строительной индустрии, для улучшения показателей и параметров технических характеристик материалов для дорожного строительства идет активное внедрение специальных добавок. Для доведения исходных кусковых материалов до более мелкого дисперсного состояния используются машины для измельчения твердых и кусковых материалов. Добавление тонкодисперсных порошков в готовый выходной продукт, главным образом улучшают и влияют на качество готовой продукции. Наличие целого класса машин для тонкого и сверхтонкого помола, выдвигает ряд вопросов о возможности получения высококачественного тонкодисперсного порошка, который не загрязнен продуктами износа и получаемого с меньшими затратами. Оборудование для измельчения твердых и кусковых материалов широко востребовано в различных отраслях производства: атомная, химическая, металлургическая промышленность, сельское хозяйство, лакокрасочное производство, горно-рудная отрасль, строительная, текстильная, бумажная, пищевая, фармацевтическая, изготовление керамики и др. Рассмотрению подлежат так же и различные виды дробилок, которые на данный момент являются неотъемлемой частью любой отрасли производства, благодаря своим техническим характеристикам и качеством выходного продукта. В данной статье рассмотрены машины, используемые для измельчения твердых и кусковых материалов. Выбран наиболее перспективный метод измельчения материала.*

Ключевые слова: струйная мельница, измельчение, мельница, дробилка, степень измельчения.

Введение. На современном этапе развития технологии производства строительных и отделочных материалов растет потребность в совершенствовании машин и оборудования для измельчения твердых материалов.

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

Процесс, при котором куски твердых материалов уменьшаются в размере, называется дроблением. Под дроблением понимают уменьшение размера крупных кусков 10 – 1500 мм. Процесс, где измельчаются мелкие куски, называется помол. Измельчению подвергают природное сырье (руды, горные породы), топливо (каменный уголь), полуфабрикаты и уже готовые продукты.

Измельчение называют крупным, когда поперечный размер обрабатываемых кусков составляет от 200 до 1000 миллиметров, средним и промежуточным, если их размер варьируется в пределах от 50 до 250 миллиметров, мелким – от 20 до 50 миллиметров и тонким (размол) – в пределах от 3 до 25 миллиметров. Измельчение может быть сухое или мокрое (осуществляется с добавлением определенного количества воды к исходному материалу) [1].

При дроблении или размоле кусков твердых материалов затрачивается много механической энергии, поэтому следует максимально правильно выбирать способ измельчения.

Цель работы. Заключается в анализе типов агрегатов для измельчения, выборе наиболее перспективных из них с точки зрения тонкости помола.

Основная часть. Существует большое количество машин, используемых для измельчения твердых и кусковых материалов. Данное оборудование разделяется по степени измельчаемого выходного продукта (табл. 1).

Щековые дробилки. Исходный материал попадает в щековую дробилку через загрузочную воронку. После попадания в дробилку кусковой материал измельчается между неподвижной и подвижной щекой. Готовый продукт дробления выходит через выпускную щель между щеками. Подвижная щека качается за счет шатуна, закрепленного на главном валу. Шатун и подвижная щека соединяются с помощью шарниров за счет распорных плит. В результате образуется коленчатый рычаг, благодаря которому наибольшее усилие возникает в верхней части щек. Там же и происходит измельчение более больших кусков материала.

Достоинства: Простая структура, низкая себестоимость на производство, удобное обслуживание, надёжная работа, невысокий корпус оборудования, что удобно для установления; при переработке влажной и вязкой руды не засорится.

Недостатки: невысокая производительность как у конусной дробилки, большое потребление энергии, большое колебание, размер фракция не равный [3].

Таблица 1

Классификация машин по степени измельчения [2]

Вид измельчения	Размер кусков, мм		Тип машины	Производители
	до измельчения	после измельчения		
Дробление	Крупное 1500...300	300...1000	Щековые дробилки	ООО «Уральские Горные Машины», Россия
			Конусные дробилки	Kefid Machinery Co, Китай
	Среднее 300...100	50...10	Валковые дробилки	ООО «ПРЕССМАКС», Россия
Мелкое 50...10	10...5	Молотковые дробилки	ОО «Молом», Россия	
Помол	Грубый 10...3	5...0,1	Ударно- центробежные дробилки	Liming Heavy Industry, Китай
			Тонкий 3...0,1	0,1...0,05	Барабанные мельницы Роликко-кольцевые мельницы	SIEBTECHNIK GmbH, Германия MAKRUSZ S.A., Польша
Сверхтонкий	-	менее 0,05	Вибрационные мельницы	DNTEK Co., Ltd., Южная Корея
			Струйные мельницы	ZozGmbH, Германия
			Коллоидные мельницы	ООО «ТЕХНОЛОГИЯ», Россия

Конусные дробилки. Конусная дробилка состоит из дробящей головки, имеющей вид усеченного конуса и производит эксцентричные вращательные движения. Эта головка непрерывно измельчает и размывает куски исходного материала. Когда дробящая головка перемещается к корпусу, раздробливаемый материал выпадает через кольцевую щель, расположенную между головкой и корпусом.

Достоинства: большая производительность, низкое потребление энергии, надёжная работа, малое колебание, большая степень измельчения, равный размер фракции.

Недостатки: Сложная структура, большие расходы на оборудование, высокий корпус оборудования, которому нужно установить в выше цехе, оборудование тяжёлое и неудобно перевозить, не подходит для переработки вязкой руды, операция и обслуживание оборудование являются сложными. [4].

Валковые дробилки. Они имеют два параллельных цилиндрических вала, вращающихся навстречу друг другу. Исходный продукт раздавливается валками, в следствие чего измельчатся. Устройство валковой дробилки помимо гладких валков включает станину. Один валок подвижен (установлен в подвижных подшипниках), второй валок статичен. Подвижный валок удерживается в определенном положении посредством пружин. Если в дробильную установку попадает излишне твердый материал, пружины сжимаются, раздвигая валки, и этот кусок материала пропускается без поломки.

Достоинства: форма конечного продукта однородна; простота конструкции; надежность; высокий КПД; экономичность и износостойкость; удобство ремонта и ТО; отсеивание недробимой (повышенной твердости) фракции;

Недостатки: налипание влажных частиц продукта на валки; крупная фракция обработанного материала; высокий износ рабочих валков дробилки; большая трудоемкость и простои оборудования; вероятность перекоса вала на передвигном валке; дробление материалов с твердостью более 160 Мпа невозможно [5].

Ударно-центробежные дробилки и мельницы. К ним относятся молотковые дробильные устройства, где исходный продукт, попадая в камеру измельчается молотками на лету. Молотки прикреплены к ротору при помощи шарниров, а сам ротор быстро вращается. Материал, измельченный молотками, разбивается о поверхность корпуса. Параллельно, материал подлежит раздавливанию и истиранию на колосниковой решетке. Скорость измельчения корректируется при помощи подбора оптимальной окружной скорости молотков или размера щелей

решетки. Данное оборудование применяется для крупного и среднего дробления.

Достоинства: высокая степень измельчения и низкое потребление энергии, осуществление крупного, среднего и мелкого дробления.

Недостатки: возможно измельчение только не абразивных пород с прочностью до 1200-1500 кг·с/см², быстрый износ молотков, дробилка загрязняется при влажности материала более 15%, невозможность дробления твердых пород с высоким пределом прочности [6].

Ролико-кольцевые мельницы. В данном оборудовании материал подлещит измельчению роликами или шарами (мелющими телами), катящимися по внутренней поверхности кольца и прижимающихся к ней посредством центробежной силы.

Достоинства: высокая эффективность работы, экономичность [7].

Коллоидные мельницы. Их принцип действия похож на принцип работы ролико-кольцевых или ударно-центробежных мельниц. В данном оборудовании измельчение материала происходит между вращающимся ротором и статором. Так же зазор может находиться между пальцами диска-ротора, которые расположены по концентрическим окружностям и корпусом мельницы. Коллоидные мельницы работают при высоких скоростях вращения ротора (до 125 м/сек) и используются для мокрого измельчения.

Достоинства: возможность удобного регулирования статор-роторного расстояния. От этого параметра зависит степень измельчения; сочетание высокого качества производительности с измельчением; возможность обработки материалов с вязкостью до 50000 мПа·с; возможность выбора измельчающих инструментов, подходящих для конкретного техзадания; компактность систем производства, в которых применяются мельницы МК 2000; легкая чистка благодаря высококачественной полировке.

Главным критерием качества компонентов сухих строительных смесей является их дисперсионная характеристика, варьируемая в широком диапазоне исходя из направления их применения – от миллиметров, для простых составов, до микронов, для клеевых составов, тонкослойных композитов и качественных красок. Гранулометрический состав, являющийся основанным показателем удельной поверхности, используется в производстве строительных смесей.

Шаровая мельница. Главный элемент данного оборудования – цилиндрический барабан. Часть его объема заполняют твердые шары из стали, чугуна, алюминия и т. д. В некоторых случаях вместо твер-

дых шаров применяются размольные тела цилиндрической, квадратной и других форм. В барабанах с небольшим объемом используется обыкновенная галька. Крутящий момент рабочему органу мельницы передает электродвигатель. Простейшие модели оснащаются ручкой вращения.

Для продления срока службы барабана, изнутри стенки мельниц покрывают износостойкими материалами: твердыми сплавами, марганцовистыми сталями, наплавочными материалами.

Самый перспективный метод тонкого и сверхтонкого помола, применяемый в промышленности – *струйный метод измельчения*.

Достоинства: высокая степень тонкости помола и возможность ее регулировать, возможность сушки материала в процессе работы мельницы, простота конструкции и эксплуатации, надежность, универсальность.

К недостаткам можно отнести высокую энергоемкость при ограниченной тонкости помола. На рис. 1 показаны данные фирмы CHRISTIANPFEIFER зависимости тонкости помола от энергопотребления.

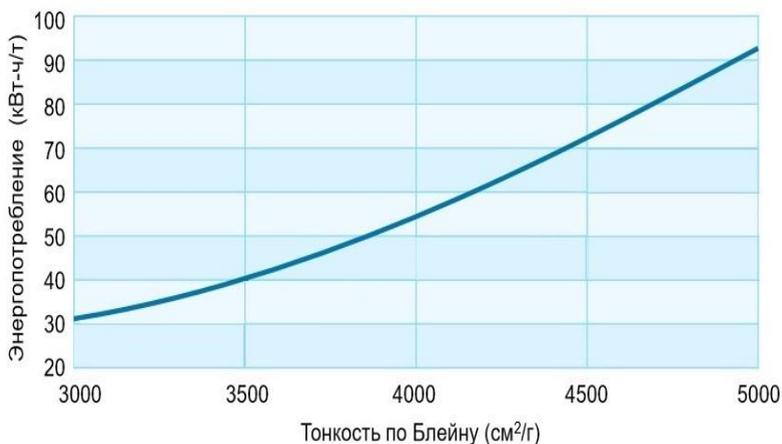


Рис. 1 Схема зависимости энергопотребления от тонкости помола шаровой мельницы фирмы CHRISTIANPFEIFER

Как видно из рис. при повышении тонкости помола наступает значительное увеличение энергопотребления, что делает нецелесообразным производство цемента на шаровых мельницах с тонкостью помола свыше 5000 см²/г.

Струйные мельницы. В основе принципа работы данных мельниц лежит использование энергии сжатого газа. При расширении газ приобретает большую скорость, используемую для разгона частиц обрабатываемого продукта. Разламывание материала происходит из-за столкновения кусков друг с другом или о преграду.

Метод использования сжатого газа дает возможность использования высокодисперсного избирательного измельчения многокомпонентных смесей материалов. Преимущества метода использования энергии сжатого газа: низкая материалоемкость, классификация частиц в соответствии с размерным рядом, совмещение измельчения с другими процессами (химическая обработка, сушка, обжиг).

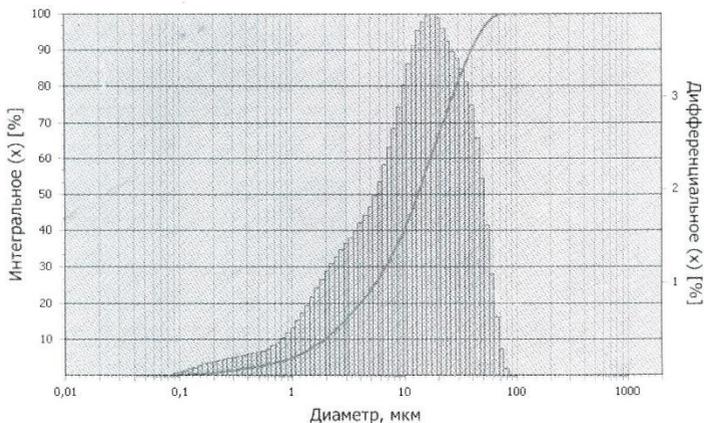
В числе наиболее актуальных моделей струйных мельниц находятся противоточные струйные мельницы. Кроме перечисленных достоинств они имеют ряд преимуществ по сравнению с другим оборудованием для измельчения: простота конструкции, малый расход энергии из-за малого количества сопел, а также их экологичность.

На современном этапе развития и использования машин для сверхтонкого измельчения установились основные направления конструктивно-технологического совершенствования струйных мельниц:

- снижение электропотребления мельницы;
- увеличение эффективности процесса измельчения за счет исключения рассеивания потока материала на входе в помольную камеру;
- повышение эффективности процесса измельчения в следствие меньшего аэродинамического сопротивления потоку готового продукта [8].

Так учеными БГТУ им. Шухова была создана пневмоструйная противоточная установка по измельчению цемента [9]. Испытания показали, что тонкость измельчения составила свыше $10000 \text{ см}^2/\text{г}$ при энергозатратах около 50 кВт/ч .

В настоящее время началась активная модернизация данного вида техники. Единственная проблема в данном оборудовании заключается в том, что на производство качественной смеси дробилки и мельницы затрачивают большое количество удельной энергии [10, 11]. В последнее время за рубежом активизированы работы по проектированию и исследованию струйных мельниц. Поэтому возрастает необходимость создания высокопроизводительного эффективного оборудования для создания однородности порошковых материалов с малыми энергетическими затратами.



Модальный диам. 17,90 μm **Размах (d90-d10)/d50** 2,88 **D[4,3]** 17,3 μm
Уд. поверхность 16085 см²/см³ **Плотность** 0

Диаметр [мкм]	Интеграл. [%]	Дифф. [%]
0,09	0	0
0,1	0,04	0,03
0,12	0,09	0,05
0,13	0,16	0,07
0,15	0,26	0,1
0,17	0,39	0,13
0,19	0,54	0,15
0,21	0,72	0,18
0,24	0,93	0,2
0,27	1,14	0,22
0,31	1,37	0,23
0,35	1,63	0,25
0,39	1,89	0,26
0,44	2,16	0,28
0,5	2,46	0,29
0,56	2,77	0,31

Перцентиль [%]	Диаметр [мкм]
10	1,92
50	13,1
90	39,69

Рис 2. Дисперсионный анализ цемента, измельченного на пневмоструйной установке

Выводы. Таким образом, из всех способов измельчения материалов наиболее качественным является струйный способ измельчения. В сравнении с другими струйная мельница обладает следующими преимуществами: низкая материалоемкость, классификация частиц в соответствии с размерным рядом, совмещение измельчения с другими процессами.

Конструкция струйной мельницы позволяет эффективно измельчать материал за счет организации распределенных потоков подачи материала в мельницу, что способствует снижению энергозатрат при получении тонкодисперсных порошков.

Библиографический список

1. **Боршев В. Я.** Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. 75 с.
2. **Сиденко П.М.** Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 368 с.
3. **Смельчакова Ю.С., Тарасенко Е.А.** Технология самоизмельчения материалов с использованием струйных мельниц // Неделя науки СПбПУ: матер. научн. форума с межд. участием. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. Ч. 1. С. 85-87.
4. **Акунов В.И.** Струйные мельницы. М: Машиностроение, 1967. 263 с.
5. **Бараковских Д.С., Шишкин С.Ф.** Движение двухфазного потока в разгонной трубке струйной мельницы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 82-89.
6. **Лоскутьев Ю.А., Максимов В.М., Веселовский В.В.** Механическое оборудование предприятий по производству вяжущих строительных материалов. М.: Машиностроение, 1986. 378 с.
7. Технология получения минеральных добавок / А.А. Романович, Т.Н. Орехова, С.А. Мещеряков, В.С. Прокопенко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 5. С. 188-192.
8. **Орехова Т.Н., Агарков А.М., Голубятников А.А.** Направления конструктивно-технологического совершенствования пневмосмесителей для производства строительных материалов // Научный альманах. 2015. № 3 (5). С. 124-127.
9. Патент на полезную модель RU 174065 U1. Струйная мельница тонкого помола / В.А. Уваров, Т.Н. Орехова, А.Н. Леонов и др.; Правообл. БГТУ им. В.Г. Шухова. Публикация 28. 09.2017.
10. Техника и технологии для экструдирования и сушки техногенных материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Гридчин и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 118-123.
11. Тепловой анализ технологической линии по экструдированию и сушке техногенных волокнистых материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Гридчин и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 78-83.

УДК 620.9

АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЗДАНИЯ ПРИ СНИЖЕНИИ ОТОПИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В НЕРАБОЧЕЕ ВРЕМЯ*

Аспирант **Свирин М.В.**

Инж. **Бычихин С.А.**

Научный руководитель

д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**

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

***Аннотация.** В статье рассматривается проблема экономии топливно-энергетических ресурсов за счет понижения отопительной нагрузки учреждений в нерабочее время. Проводится анализ нестационарного теплового режима при помощи систем дифференциальных уравнений, предлагается методика понижения тепловой нагрузки на существующем объекте.*

***Ключевые слова:** энергосбережение, отопление, тепловой режим, нестационарная теплопроводность, математическое моделирование, отопительная нагрузка.*

Актуальность работы

На сегодняшний день в России на коммунальное хозяйство расходуется около трети топливно-энергетических ресурсов, при этом около 60% энергии расходуется на отопление [1]. Таким образом, уменьшение затрат на отопление зданий – приоритетное направление снижения энергозатрат. Снижение отопительной нагрузки – нестационарный инерционный процесс, требующий исследования.

Цель работы: анализ нестационарного теплового режима при помощи математической модели, основанной на системах дифференциальных уравнений, и оценка результатов моделирования на реальном объекте.

Метод расчета

Нестационарная теплопроводность через стены здания находится следующим образом [2]:

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

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность кг/м³; c – удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C); τ – время, сек.; T – температура, °C, x – шаг сетки, м; λ – коэффициент теплопроводности, кВт/(м·°C).

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности ограждающей конструкции стена разбита пространственной сеткой на 10 точек с номерами 0–9 (рис. 1) [3]. Для случая, когда применяется утепление здания, используется 6 точек (0-5) для нахождения температурного поля через стену и 3 точки (7-9) для нахождения температурного поля через утепление.

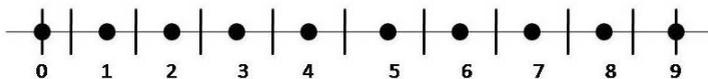


Рис. 1. Пространственная сетка

Для крайних точек пространственной сетки были заданы граничные условия третьего рода [4]:

– для левой границы:

$$q = \alpha_{\text{вн}} \cdot (T_0^1 - T_{\text{вн}}^1), \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·K); T_0^1 – температура в соответствующей точке в текущий момент времени, °C; $T_{\text{вн}}^1$ – температура внутри помещения в соответствующей точке в момент времени предыдущей итерации, °C;

– для правой границы:

$$q = \alpha_{\text{нар}} \cdot (T_{\text{нар}} - T_n^1), \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{нар}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·K); $T_{\text{нар}}$ – наружная температура, °C; T_n^1 – температура в соответствующей точке в текущий момент времени, °C.

В результате дискретизации уравнения (1) на сетке [5], приведенной на рис. 1, получаются уравнения для нулевой точки, i точки и n точки.

Уравнение теплопроводности для нулевой точки, T_0 :

$$\frac{\rho c}{\Delta \tau} \cdot (T_0^1 - T_0^0) = \frac{\lambda}{\Delta x} \cdot (T_1^1 - T_0^1) - \alpha_{\text{вн}} \cdot (T_0^1 - T_{\text{вн}}^1), \quad (4)$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; c – удельная теплоёмкость материала, кДж/(кг·К); $\Delta \tau$ – шаг по времени, сек; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); Δx – шаг сетки, м; $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·К); T^1 – температура в соответствующей точке в текущий момент времени, °С; T^0 – температура в соответствующей точке в момент времени предыдущей итерации, °С.

Уравнение теплопроводности для точек i ($i = 1 \dots 8$), T_i :

$$\frac{\rho c}{\Delta \tau} \cdot (T_i^1 - T_i^0) = \frac{\lambda}{\Delta x} \cdot (T_{i+1}^1 - T_i^1) - \frac{\lambda}{\Delta x} \cdot (T_i^1 - T_{i-1}^1). \quad (5)$$

Уравнение теплопроводности для точки n , T_n :

$$\frac{\rho c}{\Delta \tau} \cdot (T_n^1 - T_n^0) = -\frac{\lambda}{\Delta x} \cdot (T_n^1 - T_{n-1}^1), \quad (6)$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; c – удельная теплоёмкость материала, кДж/(кг·К); $\Delta \tau$ – шаг по времени, сек; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); Δx – шаг сетки, м; $\alpha_{\text{нар}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·К).

Для решения методом прогонки [6] система представляется в стандартном виде:

$$\begin{cases} a_0 \cdot T_1^1 + b_0 \cdot T_0^1 & + d_0 = 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_i \cdot & + b_i \cdot & + c_i \cdot & + d_i = 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_n \cdot & + c_n \cdot T_{n-1}^1 & + d_n = 0 \end{cases} \quad (7)$$

где

$$a_0 = \frac{\lambda}{\Delta x}; \quad b_0 = \frac{\rho c}{\Delta \tau} + \alpha_{\text{вн}} + \frac{\lambda}{\Delta x}; \quad d_0 = \left(-\frac{\rho c}{\Delta \tau} \cdot T_0^0 + \alpha_{\text{вн}} \cdot T_{\text{вн}}^1 \right);$$

$$a_i = \left(-\frac{\lambda}{\Delta x} \right); \quad b_i = \left(\frac{\rho c}{\Delta \tau} + 2 \cdot \frac{\lambda}{\Delta x} \right); \quad c_i = \left(-\frac{\lambda}{\Delta x} \right); \quad d_i = \left(-\frac{\rho c}{\Delta \tau} T_1^0 \right);$$

$$b_n = \left(\frac{\rho c}{\Delta \tau} + \alpha_{\text{нар}} + \frac{\lambda}{\Delta x} \right); \quad c_n = \left(-\frac{\lambda}{\Delta x} \right); \quad d_n = \left(-\frac{\rho c}{\Delta \tau} \cdot T_n^0 - \alpha_{\text{нар}} \cdot T_{\text{нар}} \right).$$

Аналогичным способом рассчитывается температурное поле через слой утепления.

Уравнение теплопроводности для нулевой точки, T_0 :

$$\frac{\rho_1 c_1}{\Delta \tau} \cdot (T_0^1 - T_0^0) = \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \cdot (T_1^1 - T_0^1 - \alpha_{\text{вн}} \cdot (T_0^1 - T_{\text{вн}}^1)) \quad (8)$$

Уравнение теплопроводности для i ($i=7-9$) точки, T_i :

$$\frac{\rho_1 c_1}{\Delta \tau} \cdot (T_i^1 - T_i^0) = \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \cdot (T_{i+1}^1 - T_i^1 - \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \cdot (T_i^1 - T_{i-1}^1)). \quad (9)$$

Уравнение теплопроводности для n точки, T_n :

$$\frac{\rho_1 c_1}{\Delta \tau} \cdot (T_n^1 - T_n^0) = \alpha_{\text{нар}} \cdot (T_{\text{нар}} - T_n^1 - \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \cdot (T_n^1 - T_{n-1}^1)) \quad (10)$$

В результате получилась система уравнений:

$$\begin{cases} a_0 \cdot T_1^1 + b_0 \cdot T_0^1 + d_0 = 0 \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ a_i \cdot T_{i+1}^1 + b_i \cdot T_i^1 + c_i \cdot T_{i-1}^1 + d_i = 0 \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ b_n \cdot T_n^1 + c_n \cdot T_{n-1}^1 + d_n = 0 \end{cases} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{\lambda_1}{\Delta x_1}; \quad b_0 = \frac{\rho_1 c_1}{\Delta \tau} + \alpha_{\text{вн}} + \frac{\lambda_1}{\Delta x_1}; \quad d_0 = \left(-\frac{\rho_1 c_1}{\Delta \tau} \cdot T_0^0 + \alpha_{\text{вн}} \cdot T_{\text{вн}}^1 \right); \\ a &= \left(-\frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \right); \quad b = \left(\frac{\rho_1 c_1}{\Delta \tau} + 2 \cdot \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \right); \quad c = \left(-\frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \right); \quad d = \left(-\frac{\rho_1 c_1}{\Delta \tau} \cdot T_1^0 \right); \\ b_n &= \left(\frac{\rho_1 c_1}{\Delta \tau} + \alpha_{\text{нар}} + \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \right); \quad c_n = \left(-\frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \right); \quad d_n = \left(-\frac{\rho_1 c_1}{\Delta \tau} \cdot T_n^0 - \alpha_{\text{нар}} \cdot T_{\text{нар}} \right) \end{aligned}$$

Дискретный аналог уравнения [7] теплопроводности на границе слоев (точка б) выглядит следующим образом:

$$a_i \cdot b_i + c_i \cdot d_i = 0, \quad (12)$$

где

$$a = \left(-\frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \right); b = \left(0,5 \cdot \frac{\rho c \Delta x}{2 \Delta \tau} + 0,5 \cdot \frac{\rho_1 c_1 \Delta x_1}{2 \Delta \tau} + 2 \cdot \left(0,5 \cdot \frac{\lambda}{\Delta x} + 0,5 \cdot \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \right) \right);$$

$$c_i = \left(-\frac{\lambda}{\Delta x} \right); d = \left(- \left(0,5 \cdot \frac{\lambda}{\Delta x} + 0,5 \cdot \frac{\rho_1 c_1 \Delta x_1}{\Delta \tau} \right) \cdot T_i^0 \right)$$

Решение дифференциального уравнения теплопроводности методом прогонки было выполнено при помощи программы *Microsoft Excel*.

Метод определения экономии

Для расчета температуры внутри помещения используются зависимости между теплоемкостями воздуха, отопляемым объемом, рассматриваемым промежутком времени, динамически изменяющимися количествами прихода и расхода тепловой энергии [8]. Динамику изменения температуры воздуха внутри рассматриваемого объекта возможно исследовать благодаря следующей формуле:

$$t_{i+1} = \frac{c_{возд} \cdot V_{от} \cdot t_i - \Delta \tau \cdot (Q_{вент} + Q_{кр} + Q_{подв} + Q_{окн} + Q_{ст} - Q_{пр})}{c_{возд} \cdot V_{от}}, \quad (13)$$

где t_{i+1} – температура внутри помещения в следующий момент времени, °С; $c_{возд}$ – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(м³·К); $V_{от}$ – отопляемый объем здания, м³; t_i – температура внутри помещения в предыдущий момент времени, °С; $\Delta \tau$ – шаг по времени, сек.; $Q_{вент}$ – потери теплоты через вентиляцию, кВт; $Q_{кр}$ – потери теплоты через чердачное перекрытие, кВт; $Q_{подв}$ – потери теплоты через подвальное помещение, кВт; $Q_{окн}$ – потери теплоты через окна, кВт; $Q_{ст}$ – потери теплоты через стены, кВт; $Q_{пр}$ – приход теплоты от системы теплоснабжения здания, кВт.

При снижении отопительной нагрузки не менее важным фактором является наблюдение за температурой внутренней поверхности стены, поскольку излишнее понижение температуры может приводить к конденсации на поверхности стен [9]. Температура внутренней поверхности стены рассчитывается следующим образом:

$$t_{вн.ст.} = \frac{t_{вн} - (t_{вн} - t_{нар})}{\alpha_{вн} \cdot R_{ст}}, \quad (14)$$

где $t_{вн.ст}$ – внутренняя температура стенки, °С; $t_{вн}$ – температура внутри помещения, °С; $t_{нар}$ – наружная температура окружающей среды, °С; $\alpha_{вн}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·К); $R_{ст}$ – термическое сопротивление стены, м²К/Вт, принимаемое с учетом результатов исследований в работе [10].

Температура наружной поверхности стены находится по формуле:

$$t_{нар.ст} = \frac{t_{нар} - (t_{вн} - t_{нар})}{\alpha_{нар} \cdot R_{ст}}, \quad (15)$$

где $t_{нар.ст}$ – наружная температура стенки, °С; $t_{вн}$ – температура внутри помещения, °С; $t_{нар}$ – наружная температура окружающей среды, °С; $\alpha_{нар}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·К); $R_{ст}$ – термическое сопротивление стены, м²К/Вт.

Принцип экономии тепловой энергии заключается в снижении отопительной нагрузки. В расчете он реализован коэффициентом отопительной нагрузки:

$$K = \frac{Q_{от}}{Q_{от\ нач}}, \quad (16)$$

где K – коэффициент отопительной нагрузки; $Q_{от}$ – текущее расходуемое количество тепловой энергии на отопление помещений, кВт; $Q_{от\ нач}$ – начальное расходуемое количество теплоты на отопление здания, кВт.

Результаты моделирования

Была исследована регулировка отопительной нагрузки продолжительностью 1 неделя, что позволяет более полно провести анализ температур и недопустимости нарушений требований СанПиН 2.2.4.548-96. Исследование проводилось на нескольких реальных объектах. Результаты расчета приводятся для МБОУ СОШ № 4.

Получившиеся изменения температур воздуха в помещении и средней температуры стены представлены на рис. 2.

Понижение отопительной нагрузки происходит с 20:00 с ее плавным повышением до 2:00. С 2:00 происходит повышение отопительной нагрузки до коэффициента, равного 1,2, с целью выхода к началу рабочего дня в 9:00 на начальные показатели температуры воздуха в здании. В связи с этим на графике заметен кратковременный перегрев помещений до 9:00, однако к началу рабочего дня температура будет той же, что и днем ранее. Изменения температуры показаны на рис. 3.

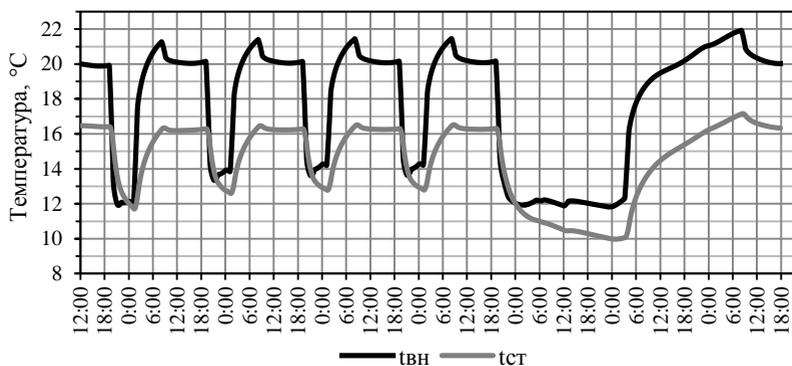


Рис. 2. График зависимости температуры воздуха в МБОУ СОШ №4 с понижением до 12°C и средней температуры стены в течение недели от регулировки отопительной нагрузки

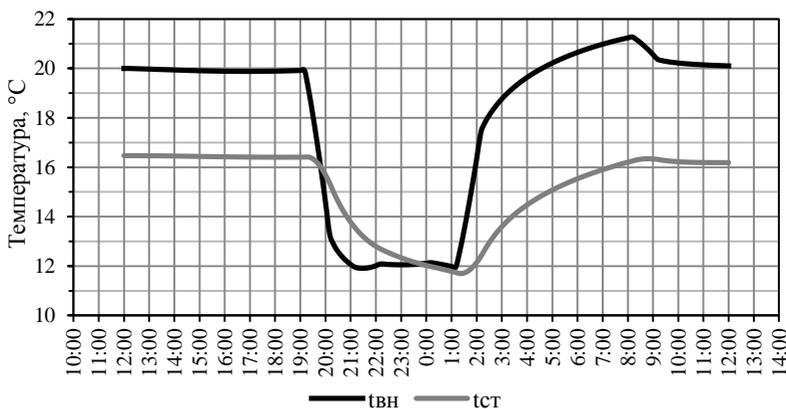


Рис. 3. График зависимости температуры воздуха в МБОУ СОШ №4 с понижением до 12°C и средней температуры стены в будний день от регулировки отопительной нагрузки

В конце пятницы на графике температур заметно длительное понижение температуры до 12°C. Поскольку бюджетные учреждения в большинстве случаев не работают в указанный промежуток времени, то становится возможным снизить нагрузку на все выходные дни. По-

нижение начинается в пятницу в 20:00 с поддержанием температуры 12°C путем постепенного увеличения коэффициента (рис. 4).

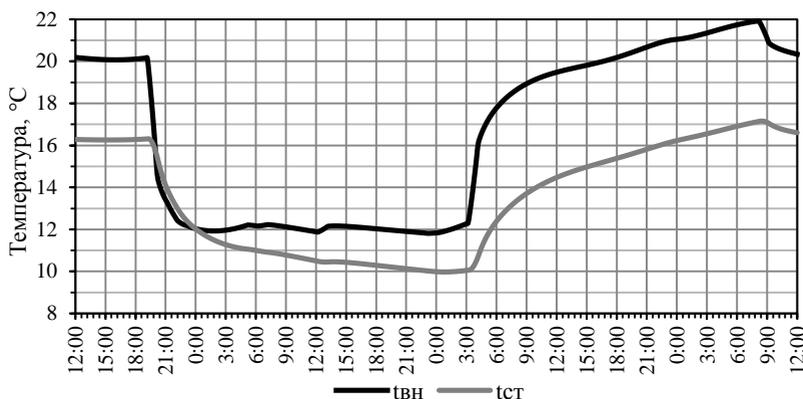


Рис. 4. График зависимости температуры воздуха в МБОУ СОШ №4 с понижением до 12°C и средней температуры стены в выходной день от регулировки отопительной нагрузки

Чтобы выйти на рабочий режим, расчет показал, что повышать отопительную нагрузку необходимо начинать в воскресенье в 4:00 и держать коэффициент отопительной нагрузки равным 1.18 до 9:00 понедельника следующей недели. За это время температура в помещении и температура внешней стены приобретают начальные значения, комфортные для работы персонала и полного функционирования здания в целом.

Анализ результатов и выводы

В процессе работы была создана математическая модель с целью анализа нестационарного теплового режима зданий при снижении отопительной нагрузки в нерабочее время, для удобства расчет производится в программе *Microsoft Excel*. Также была предложена методика снижения тепловой нагрузки с дальнейшим расчетом экономии для МБОУ СОШ №4 г. Белгорода. Расчетная экономия на объекте составляет 6%.

Библиографический список

1. **Shirime K.J., Trubaev P.A.** The analysis of the possibility of the energy management system integration in municipal institutions in Belgorod (Russia) // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т. 9. № 11. С. 862-868.
2. **Апсаямова Я.И., Тарасюк П.Н., Трубаев П.А.** Определение расхода энергетических ресурсов в зданиях // Образование, наука и производство. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 1183.
3. **Свирин М.В., Трубаев П.А.** Энергосберегающие технологии в отоплении зданий // Энергетические системы: сб. докладов III Междунар. науч.-техн. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. – С. 141-144.
4. **Тарасюк П.Н., Трубаев П.А., Сухорослова В.В.** Повышение энергоэффективности в индивидуальном жилищном строительстве в условиях белгородской области // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 410-415.
5. **Свирин М.В., Бычихин С.А., Трубаев П.А.** Оценка энергосберегающего эффекта при установке автоматизированных тепловых пунктов в образовательных учреждениях // Энергетические системы: сб. докладов III Междунар. науч.-техн. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. – С. 129-133.
6. **Гродецкая Е.В., Трубаев П.А.** Анализ энергоэффективности учреждений управления образования г. Белгорода // Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения). Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. С. 133-138.
7. **Власова А.А., Тарасюк П.Н., Трубаев П.А.** Анализ структуры выработки и потребления тепловой энергии в России // Образование, наука, производство. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 2929-2935.
8. Energy efficiency analysis of educational institutions within the Belgorod city (Russia) / P. Trubaev, E. Gorodeckaya, P. Tarasyuk, K. Shirime // World Applied Sciences Journal. 2014. Т. 30. № 8. С. 1024-1027.
9. Тарасюк П.Н., Трубаев П.А. Эффективность солнечных водонагревательных установок в условиях Белгородской области // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 416-420.
10. Анализ термического сопротивления ограждающих конструкций различного типа по результатам инструментальных измерений / П.Н. Тарасюк, Д.А. Ващенко, П.А. Трубаев, В.В. Радченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 152-158.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Магистрант **Хабидуллин И.Р.**

Научный руководитель

канд. пед. наук, доц. **Булатова В.М.**

*Казанский государственный энергетический
университет, г. Казань*

***Аннотация.** В данной статье рассмотрены вопросы влияния различных эксплуатационных факторов, таких как уровень освещённости, затенение солнечного элемента и температура солнечной панели на эффективность их работы. При этом был определён эксплуатационный фактор, оказывающий наиболее сильное влияние на эффективность работы солнечной панели.*

***Ключевые слова:** солнечная панель, эксплуатационные факторы, эффективность работы солнечной панели, вольт-амперная характеристика.*

Интерес к возобновляемым источникам энергии, таким как солнечные панели, с каждым годом неуклонно растёт. Это связано в основном с необходимостью сохранить экологическую обстановку всего мира, поскольку традиционные источники энергии наносят колоссальный ущерб окружающей среде. Однако эффективность солнечных панелей находится не на высоком уровне и к тому же зависит от многих факторов. Именно поэтому в данной статье рассмотрен вопрос влияния эксплуатационных факторов на эффективность работы солнечных панелей.

Цель работы: Определение факторов, которые оказывают сильное воздействие на эффективность работы солнечных панелей.

1. Влияние уровня освещённости на эффективность работы солнечных панелей.

Уровень освещённости (интенсивность солнечного излучения) существенным образом влияет на выходное напряжение солнечной панели (рис. 1). Измерения проведены 29 апреля 2019 года в течение каждых пяти минут (с 13:15 до 14:15) в ясный солнечный день на солнечной панели SUNWAYS FSM 30M (максимальная мощность 30 Вт).

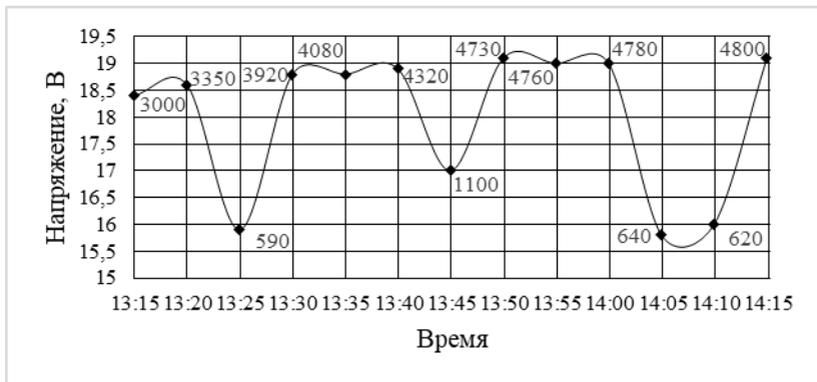


Рис. 1. Влияние изменения уровня освещённости на выходное напряжение солнечной панели

Значения на графике соответствуют измеренным с помощью люксметра значениям интенсивности солнечного излучения.

Следует отметить, что солнечные панели производят электричество даже тогда, когда нет прямого солнечного света. Поэтому, даже при облачной погоде фотоэлектрическая система будет производить электричество [1].

2. Влияние затенения солнечных элементов на эффективность работы солнечной панели.

Тень, закрывающая одну ячейку солнечной панели, снижает ее силу тока прямо пропорционально снижению освещения (рис. 2).

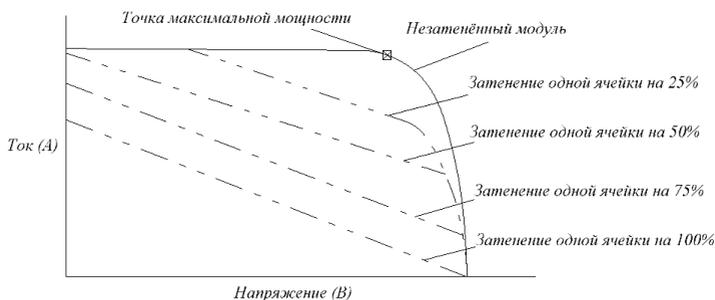


Рис. 2. ВАХ солнечной панели при затенении солнечного элемента

Как видно, даже незначительное затенение одного фотоэлемента в солнечной панели приводит к серьезному снижению генерации элек-

троэнергии. При этом, чтобы избежать сильного падения эффективности, в солнечные панели встраивают шунтирующие диоды (в основном применяют диод Шоттки [2]), еще их называют байпасными диодами. Назначением таких диодов является отсечение элемента с низкими показателями, чтобы избежать сильного падения мощности во всей солнечной панели [3].

3. Влияние температуры солнечных панелей на эффективность их работы.

Температура, при которой работают солнечные панели, является одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность их работы. Солнечные элементы имеют ограниченный КПД, т.е. они не в состоянии преобразовать всю полученную от Солнца энергию в электричество; остальная энергия при этом преобразуется в тепло [4].

Чем более горячими становятся солнечные панели, тем больше падает их эффективность из-за нагрева элементов и рассеивания большей части энергии [5].

Ниже приведён график изменения вольт-амперной характеристики солнечной панели при различных значениях температуры её поверхности (рис. 3), при этом измерения проводились при уровне освещённости 1000 Вт/м^2 , созданного при помощи портативного прожектора мощностью 500 Вт .

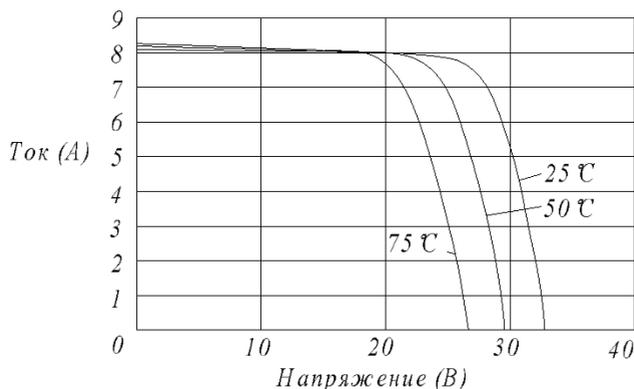


Рис. 3. ВАХ солнечной панели при различных значениях температуры

Как видно, в результате нагрева поверхности солнечной панели, снижается её выходное напряжение, а, следовательно, и мощность. При этом, солнечные панели, расположенные в условиях жаркого

климата, сильнее подвержены нагреву. Помимо уменьшения эффективности, высокая температура поверхности солнечных панелей негативно сказывается и на продолжительности их работы, за счёт увеличения скорости деградации солнечных элементов.

Именно поэтому необходимо решать проблему охлаждения солнечных панелей с целью увеличения эффективности их работы и сохранения сроков эксплуатации.

Выводы:

1) рассмотрены различные эксплуатационные факторы (изменение уровня освещённости, затенение солнечного элемента и температура), снижающие эффективность работы солнечных панелей;

2) температура поверхности солнечной панели является фактором, оказывающим наиболее сильное влияние на снижение эффективности её работы по сравнению с другими рассмотренными эксплуатационными факторами. Связано это с тем, что ни изменение уровня освещённости, ни затенение солнечного элемента не оказывают на солнечную панель такого негативного влияния как её температура. Поскольку, кроме снижения эффективности, также снижается и срок эксплуатации солнечной панели из-за деградационных процессов, возникающих при повышении температуры её поверхности.

Библиографический список

1. Влияние препятствий солнечным лучам на выработку энергии солнечными панелями [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solarhome.ru/basics/pv/techorient.htm> (дата обращения 10.10.2019).

2. **Алехин В.А.** Солнечная энергия и диоды Шоттки // Известия ТГУ. 2013. № 12. С. 18-22.

3. Влияние тени на работу солнечных батарей [Электронный ресурс]. URL: <http://solarsoul.net/vliyanie-teni-na-rabotu-solnechnyx-batarej> (дата обращения 10.10.2019).

4. **Коротков К.Е.** Исследование влияния температуры на эффективность преобразования солнечного излучения: дис. ... магистра. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2018.

5. **Кузнецов В.** Найден способ повысить эффективность работы солнечных батарей на 80% [Электронный ресурс]. URL: <https://hi-news.ru/technology/najden-sposob-povysit-effektivnost-raboty-solnechnyx-batarej-na-80.html> (дата обращения 10.10.2019).

УДК 620.9

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ОТХОДАМИ И ПОЛУЧЕНИЕ ЭНЕРГИИ В ЕВРОПЕ И В РОССИИ

Студент **Чехранова О.А.**

Научный руководитель

д-р техн. наук, доц. **Гашо Е.Г.**

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

***Аннотация.** В статье представлен аналитический обзор ситуации в секторе «управление отходами» в Европе и в России. Составлена классификация способов утилизации отходов в разрезе энергоэффективности и элекгической безопасности. Рассмотрены лучшие практики удаления отходов. Так же проведен анализ метода получения энергии из отходов и его роль в иерархии пирамиды управления отходами.*

***Ключевые слова:** управление отходами, энергоэффективность, экологическая безопасность, энергия из отходов.*

В настоящее время, когда население стремительно растет, ожидается, что численность жителей планеты за 20 лет возрастет больше, чем на четверть – на 26%, неминуемо с этим возрастает большая потребность в ресурсах от коммунальных до топливо-энергетических, также стремительный экономический рост ряда Азиатских стран приводит к росту потребления. Жизненный цикл продукта, сырьё заканчивается тогда, когда его утилизируют. Сейчас наблюдается наиболее острый период угрозы экологической и энергетической безопасности планеты. Города становятся одной большой свалкой, приводящей к «мусорному кризису» и социальным противостояниям, миллиарды тон просто складировать. Управление отходами – это отрасль, которая вращается вокруг сбора, хранения и утилизации отходов, начиная от обычных бытовых отходов до отходов, образующихся на атомных электростанциях. Разработка эффективных стратегий обращения с отходами имеет решающее значение для стран во всем мире, так как многие формы отходов могут перерасти в серьезную проблему, если с ними неправильно обращаться. Несколько правительств также регулируют промышленность по управлению отходами для обеспечения безопасности и эффективности.

Сокращение первичных запасов топлива: угля, газа, нефти – является еще одной причиной для развития такого сектора как «энергия из

отходов». Такая форма переработки мусора является одной из наиболее востребованных в мире, поэтому разработка механизма стимулирования применения указанного подхода, а также его внедрение обладают высокой актуальностью. В России пока данная форма переработки не развита из-за недостатков систем управления.

Цель работы сравнительный анализ механизма управления отходами на примере Европы и России, а также выявления и систематизации барьеров, препятствующих развитию генерации «энергии из мусора» в Российской Федерации.

Общие положения в системе утилизации отходов

Благосостояние населения повышается в последние годы, а также наблюдается его рост – появляется потребность в большем количестве товаров и услуг, все это является причиной увеличения отходов. Также необходимо избежать дефицита энергии. По данным Eurostat [1] образование отходов в Европе в период 2008-2016 гг. увеличилась на 80 млн тонн.

Можно отметить корреляцию между этими явлениями. В 2010 году общий объем производства отходов в ЕС составил 2,5 миллиарда тонн. Из этого общего количества была переработана только ограниченная (хотя и увеличивающаяся) доля (36%), а остальная часть была захоронена или сожжена, из которых около 600 миллионов тонн можно было бы переработать или использовать повторно. [2]. Принимая тот факт, что средняя теплотворная способность твердо бытовых отходов равна порядка 2400 ккал/кг, рационально рассматривать их в качестве топлива для получения вторичной энергии (электроэнергия, тепло). Необходимо отметить, что утилизация отходов должна быть не только экономически выгодной, но и экологически безопасной, перед международным сообществом стоит главная задача – найти баланс. По мнению автора, на решение в сфере «управления отходами» могут влиять шесть основных факторов (табл. 1).

Один из главных факторов – политический, от того какую поддержку будет оказывать государство, зависит развитие всей отрасли. Поскольку система управления отходами является многоуровневой, появляется необходимость тщательного составления стратегий развития государства, планов развития регионов. Технический прогресс также является важным звеном в достижении эффективности работы, но важно создавать спрос на новые технологии. С экономической точки зрения, новые технологии, как правило, сталкиваются с трудным выходом на рынок из-за отсутствия эффекта масштаба и еще не созданных цепочек поставок и рыночных структур [2].

*Таблица 1***Факторы влияния на управления отходами**

Фактор	Инструменты
Политический	Государственное регулирование (налоги, льготы), оценка и сбор информации, мониторинг, направление политики
Экономический	Бизнес-модель, прозрачность создания стоимости
Окружающая среда	Оценка влияние на экологию, здоровья человека
Технический прогресс	Инновации, инфраструктура
Научный прогресс, просвещение	НИОКР
Социальный	СМИ, восприятие обществом

Сектор утилизации «отходы в энергию, с точки зрения экономического фактора, имеет широкие границы реализации, новые бизнес-модели позволяют снизить к минимуму риски внедрения. Общественное мнение, сознание людей является еще одним, несомненно, ключевым фактором.

Близость переработки и утилизации отходов к городам, вызывает реакцию у населения. Для сокращения протестов у населения необходимо выделять преимущества сектора «отходы в энергию» – использование отходов в качестве ВИЭ, сокращение свалок, мусоросжигательных заводов в густонаселенных районах, рост доходов.

Научный прогресс и просвещение также является важным звеном в функционирование всего механизма. В Европе существует ряд программ, предназначенных для взаимодействия государств и университетов, бизнеса и консультации населения. Выполнение стратегии не должно противоречить основным принципам «управления отходами». В основе принципов по повышению экологической безопасности и энергетической эффективности с целью перехода на круговую экономику лежит иерархия управления отходами (как указано в Статье 4 «Директивы 2008/98 / ЕС Европейского Парламента и Совета об отходах и отмене некоторых Директив», OJ L 312, 22.11.2008, р. 3.) упрощенная схема представлена (рис. 1).

Такая схема управления направлена на сокращение негативного воздействия на окружающую среду и на повышение эффективности переработки.

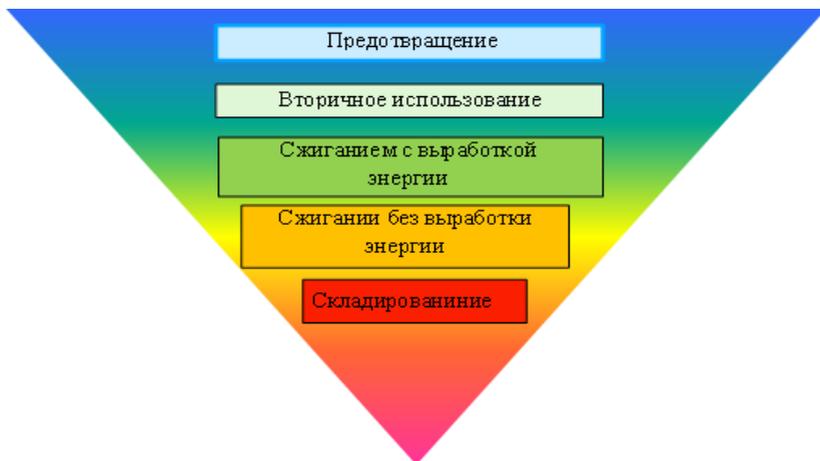


Рис. 1. Упрощенная схема иерархии управления отходами

Самый нежелательный способ управления – это складирование, свалки и сжигание с минимальным или нулевым получением энергии, в то время как наиболее желательным способом является повторное использование и сжигание с получением энергии.

Опыт Швеции в отрасли переработки бытовых отходов

По данным с официального сайта Швеции [3] в стране перерабатывается 99% всех бытовых отходов, 50% сжигается для производства энергии. В Швеции на высоком уровне развита система управления отходами. Стоимость утилизации отходов составляет от 130 до 210 евро в месяц в зависимости от типов жилья. В стране функционирует более 33 заводов по переработке мусора и дальнейшего использования его в энергию. В 2016 году [3] было произведено 18,1 ГВт·ч энергии, разделенное на 15,9 ГВт·ч тепла и 2,2 ГВт·ч электроэнергии. В таблице 7 представлена статистика по выработке энергии в период 2015-2017 гг. [1]. Кроме того, три завода сообщили, что они поставили 86 500 МВт·ч для централизованного охлаждения. В Швеции функционирует централизованная система отопления, благодаря ей осуществлять отопление и подачу на ГВС легче. Один из крупнейших заводов располагается в Липченге, весь мусор отправляется на завод «Йерстадсвепкен». Более 80% мусора – органического происхождения, остальное пластик. Ежегодно сжигается 330 тыс. тонн ТБО и вырабатывается топливо для производства электроэнергии и тепла для 90% домовладельцев. Примерная мощность составляет 1000 ГВт·час. В процессе

образуется зольный остаток-шлак из печи составляющий около 16 процентов по массе от количества вводимых отходов, а остатки обработки дымовых газов составляют 4,6 процента по массе. Шлак состоит из материалов, которые не горючи или не испаряются во время сгорания, также известные как инертные материалы. Примерами таких материалов являются стекло, фарфор, железный лом, гравий и многое другое. После того, как более крупные объекты и остатки металла были отсортированы для переработки материала, материал просеивается и стабилизируется с образованием гранулированного шлака. Это в основном используется в качестве строительного материала на свалках, но было бы полезно иметь возможность использовать его вместо песка и гравия из природных месторождений в дорожном строительстве.

Песок и гравий из природных месторождений являются ограниченным ресурсом, который следует резервировать для соответствующих областей применения [4]. Однако, мощность большинства заводов позволяет утилизировать большее количество энергии, поэтому Швеция покрывает свой дефицит сырья за счет импорта из других стран, но продукты золоудаления, Швеция обратно экспортирует в эти страны для дальнейшего захоронения.

В успехе Швеции есть ряд причин: эффективная работа по управлению отходами, взаимодействия государства, бизнеса и населения.

Проект «Энергия из отходов» в России

Поскольку получение энергии из отходов, является успешным проектом во многих европейских странах, то государство заинтересовано в продвижении этого сектора и делает большое количество шагов в данном направлении. Так, госкорпорация «Ростех» презентовала свой новый проект «энергия из отходов». Данный проект предусматривает строительство ТЭС на территории Московской области и города Казани. Предполагается, что 1 завод в Москве будет производить порядка 485 млн кВт*ч мощности, что позволит обеспечивать потребность населения численностью около 250 тыс., а завод в Казани будет производить порядка 381 млн кВт*ч мощности, что позволит обеспечивать потребность населения численностью около 200 тыс., всего заводов предполагается построить 5. Приблизительно, инвестиционные вложения составят порядка 150 млрд руб. [5]. Технологии для осуществления процесса будут от компании Hitachi Zosen Inova – она является лидером в своей отрасли. Выбранные технологии способны обеспечить минимальное негативное воздействия на экологию, либо предотвратить совсем. Также проект предусматривает создания циркуляционного производства, для перехода к круговой экономике, по

примеру западных стран. Для этого планируется строительство завода для переработки золы, получаемой в процессе сжигания.

Был проведен SWOT-анализ, данного проекта, выявлены сильные стороны – это создание новых рабочих мест, новые мощности, не допущение дефицита энергии, создание более энергоэффективной системы удовлетворения потребности в энергии потребителей. Слабые стороны – это отсутствие собственного опыта в столь масштабном проекте, «непроверенная» нормативная база, нет уверенности в эффективности ее функционировании, нет сильного «фундамента» – для переработки нужен хорошо отлаженный механизм в сортировке отходов [6], в нашей стране такого механизма на данном этапе не существует, нет собственных технологий производства, также существует ряд угроз как внешних – это введение новых санкций, которые приведут к ограниченному доступу технологий и внутренние угрозы – это могут быть коррупция на местах, а также «неработающая» законодательная база. Но не стоит забывать о возможностях – переход на новый уровень управления отходами даст сильный скачок в экономике и рост ВВП.

Выводы по работе. В результате исследования были выявлены факторы влияющие на формирование стратегии развития стран: политические, научно-технические, экономические, фактор просвещения населения. Развитая система управления отходами дает широкие возможности для развития бизнеса, роста научно-технического прогресса и поднимает привлекательность отрасли в целом. В частности, сектор «энергия из отходов» является ключевым для развития экономики, в странах у которых данный сектор развит на продвинутом уровне наблюдается больший рост ВВП. Так, у лидера – Швеции рост ВВП порядка 2,5%, в то время как у отстающих стран в этой отрасли наблюдается рост не более 1%, в частности, у России и Италии. Анализ пирамиды иерархии управления отходами в призме перехода на круговую экономику показал, что, самый низкий уровень занимает сектор захоронения, а наивысший уровень занимает вторичная переработка. В иерархии сектор «энергия из отходов», занимает среднее положение. Данный вид переработки привлекателен тем, что возможен отказ от первичных ресурсов для получения энергии, таких как газ и нефть, в связи с их сокращением и зависимостью некоторых государств от данных ресурсов. Поскольку «энергия из отходов» является высокотехническим процессом, есть жесткие требования к оборудованию, что является стимулом для развития наукоемкого производства и привлечения инвестиций. На примере Швеции мы видим, как хорошо слаженная структура управления дает множество эффектов: страна

является лидером в экологической безопасности, в энергоэффективности и стремится стать полностью ресурсно-независимым государством.

Россия занимает на данном этапе «догоняющие» позиции, но с недавним изменением законодательной базы, а также с созданием крупномасштабного проекта «энергия из отходов», страна также может подняться на новый уровень. Поскольку и Швеция, и Россия являются странами северного климата и с централизованной системой отопления и ГВС, Российская Федерация имеет возможность рассматривать опыт Швеции с учетом своих особенностей.

Библиографический список

1. Generation of waste-by-waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity [Сайт]: Eurostat [2019]. Режим доступа: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasgen&lang=en (дата обращения 10.10.2019).

2. Energiätvervinning [Сайт]: Avfall Sverige [2019] URL: <https://www.avfall.sverige.se/avfallshantering/avfallsbehandling/energiätvervinning/> (дата обращения 10.10.2019).

3. Swedish Waste Management 2018 [Электронный ресурс]. Malmö: Avfall Sverige, 2018. 39 с. URL: https://www.avfallsverige.se/fileadmin/user_upload/Publikationer/Avfallshantering_2018_EN.pdf (дата обращения 10.10.2019).

4. Техника и технологии для экструдирования и сушки техногенных материалов // Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Гридчин А.М. и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 118-123.

5. Энергия из отходов: новейшие технологии против мусора [Сайт]: Корпорация Ростех [2019]. Режим доступа: <https://rostec.ru/news/energiya-iz-otkhodov-zelenye-tehnologii-protiv-musora/> (дата обращения 10.10.2019).

6. **Щекин И.И., Трубаев П.А.** Методы утилизации твердых бытовых отходов // Научно-технические новинки и инновации. 2014. С. 247-250.

УДК 622.22

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ РАБОТЫ ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОПТОВОМ РЫНКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ В РОССИИ

Магистрант **Шинкарьюк Д.**

Магистрант **Калачева В.**

Научный руководитель

канд экон. наук **Дронова Ю.В.**

*Новосибирский государственный
технический университет, г. Новосибирск*

***Аннотация.** В данной статье идет речь об использовании гидроаккумулирующих станций или ГАЭС в выравнивании графика нагрузок. Также рассматривается разница использования ГАЭС в зависимости от режимов работы станции и от уровней воды в водохранилище. Рассчитывается экономический эффект использования указанных станций.*

***Ключевые слова:** гидроаккумулирующие станции.*

Гидроаккумулирующие станции получили широкое распространение во многих странах мира за счет хорошего экономического эффекта, достигаемого от разницы цен в ночные часы, когда происходит заполнение водохранилища и в дневные часы при его сработке.

Цель работы анализ экономического эффекта от работы ГАЭС в условиях первой ценовой зоны ОРЭМ РФ.

Мировые тенденции развития ГАЭС. На сегодняшний день в мире около 500 ГАЭС, в табл. 1 приведены страны-лидеры по производству энергии на ГАЭС [1]. Мировая тенденция последних десятилетий это строительство ГАЭС в Азии, таких странах как Китай, Индия, Япония (рис. 1) [2].

Эффекты от работы ГАЭС. Основными преимуществами работы ГАЭС являются возможность выравнивания графика нагрузки и снижение стоимости пиковых мощностей в энергосистеме. Это происходит за счет того, что ГАЭС в ночное время, когда нагрузка снижается, электростанция работает в насосном режиме – потребляет дешевую электроэнергию, а в часы пиковой нагрузки работает в генераторном режиме, сбрасывает накопленный ресурс – производит дорогую электроэнергию. Пример торгового графика работы ГАЭС приведен на рис. 2 [2]. Еще одним эффектом от работы ГАЭС является покрытие «пиковых» нагрузок энергосистемы (пример на рис. 3) [2].

Таблица 1

Топ-стран по генерации энергии на ГЭС и ГАЭС

Страна	Общая мощность (МВт)	Гидроэлектростанции (МВт)	Гидроаккумулирующие станции (МВт)
Китай	251,520	140,120	111,400
Индия	65,315	61,815	3,500
Бразилия	35,455	35,455	0
Пакистан	31,168	31,168	0
Непал	25,993	25,993	0
Мьянма	25,697	25,697	0
США	21,625	1,712	19,913
Бутан	20,554	20,554	0
Индонезия	20,400	15,120	5,280
Филиппины	18,860	7,270	11,590
Турция	10,201	10,201	0
Эфиопия	9,202	9,202	0
Иран	8,976	7,976	1,000
Лаос	8,632	8,632	0
Колумбия	8,100	8,100	0
Перу	6,994	6,994	0
Аргентина	6,771	6,771	0
Эквадор	6,561	6,561	0
Канада	5,859	4,359	1,500
Вьетнам	5,326	4,126	1,200

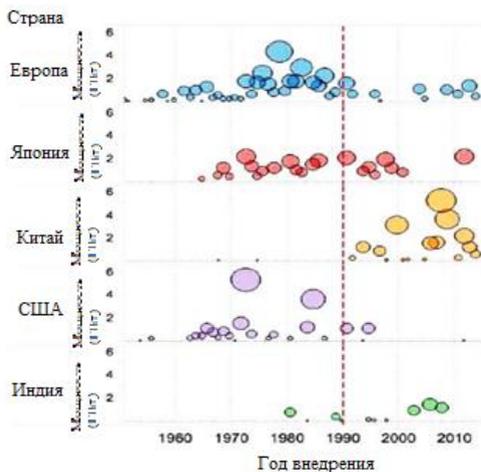


Рис. 1. Мировая выработка мощности

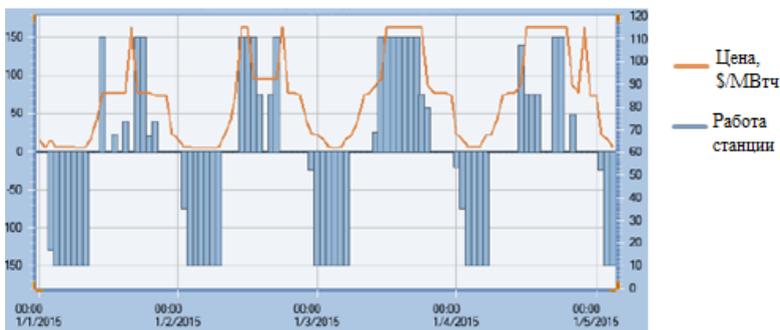


Рис. 2. Пример торгового графика работы ГАЭС

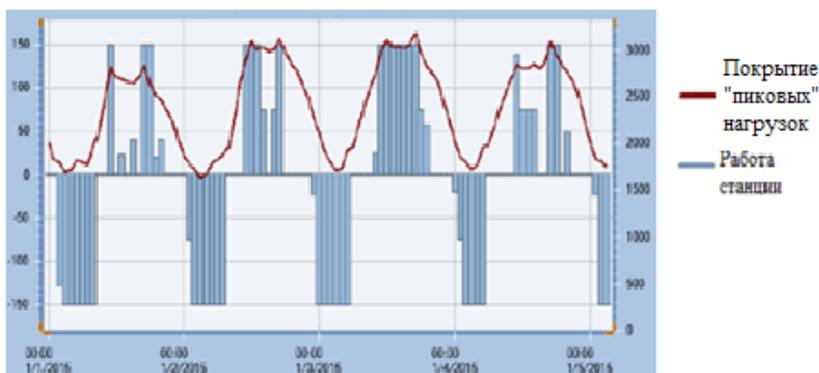


Рис. 3. Покрытие "пиковых" нагрузок энергосистемы

ГАЭС в России. Как видно из табл. 1, Россия не входит в состав этих стран. В России ГАЭС не получили большого распространения, а имеющийся опыт использования ГАЭС скорее негативный. В России 5 ГАЭС: Кубанская ГАЭС, Зеленчукская ГЭС-ГАЭС, Ленинградская ГАЭС, Сходненская ГЭС и Загорская ГАЭС.

Сходненская ГЭС имеет большинство гидроагрегатов, которые могут работать как в насосном так и в турбинном режиме, но фактически электростанция не эксплуатируется в режиме ГАЭС. Ленинградская ГАЭС была спроектирована еще в 80-х года, но в связи с перепадами экономического состояния страны, так и не была построена. Зеленчукская ГЭС-ГАЭС – одна из трех действующих ГАЭС в России.

Была ведена в эксплуатацию в 2016 году, использует сток притоков реки Кубань. Установленная мощность электростанции в насосном режиме 156,18 МВт. Кубанская ГАЭС – самая первая ГАЭС в России. Используется для сезонного регулирования воды в Большом Ставропольском канале, обеспечивая наполнение его водой в маловодный осенне-зимний период. Установленная мощность в насосном режиме 14,4 МВт. Загорская ГАЭС. Состоит из двух очередей, первая из которых завершила строительство в 2000 году. Судьба второй очереди до сих пор не определена. 17 сентября 2013 года на строительстве Загорской ГАЭС-2 произошла техногенная авария – из-за осадки здания Загорской ГАЭС-2 произошло подтопление машинного зала и пристанционной площадки. В результате той аварии никто из людей не пострадал, но под зданием ГАЭС размыло грунт так, что правая часть машинного зала просела на 1,2 м, а левая часть поднялась на 20см. После аварии стройку законсервировали, провели мероприятия по стабилизации здания. В данный момент реализуется проект по выравниваю здания, после чего компании РусГидро предстоит принять решение о дальнейшей судьбе Загорской ГАЭС-2.

В то же время Загорская ГАЭС-1 достаточно эффективно эксплуатируется, выравнивая суточный график нагрузки энергосистемы Московского региона, в котором имеется ярко выраженный пик в утреннее и вечернее время, и провал в ночное время. КПД гидроаккумулирования станции составляет 73%. Тем не менее, в ночное время остаются избыточные мощности порядка 2-3 ГВт, что подтверждает необходимость строительства новых ГАЭС [4].

Оценка экономического эффекта от работы ГАЭС. Для оценки экономической эффективности ГАЭС необходимо выделить основные ключевые параметры, определяющие его значение. Так как ГАЭС характеризуется наличием не только режимом генерации, но и насосным режимом, расчет экономической эффективности производится по следующему выражению:

$$\Delta_{\Phi} = \sum_i^{t_1} C_i \cdot P_i^{\text{ген}} - \sum_j^{t_2} C_j \cdot P_j^{\text{нас}}, \quad (1)$$

где ключевыми факторами являются:

- t_1 – длительность работы ГАЭС с режиме генерации (ч);
- t_2 – длительность работы ГАЭС в насосном режиме (ч);
- $P_{\max}^{\text{ген}}$ – максимальная мощность в режиме генерации (МВт);
- δC_n и δC_d – разница цен в ночной и дневной периоды, соответственно (руб./МВтч)

На рис. 4 представлена динамика работы ГАЭС в насосном режиме и выработка по месяцам.

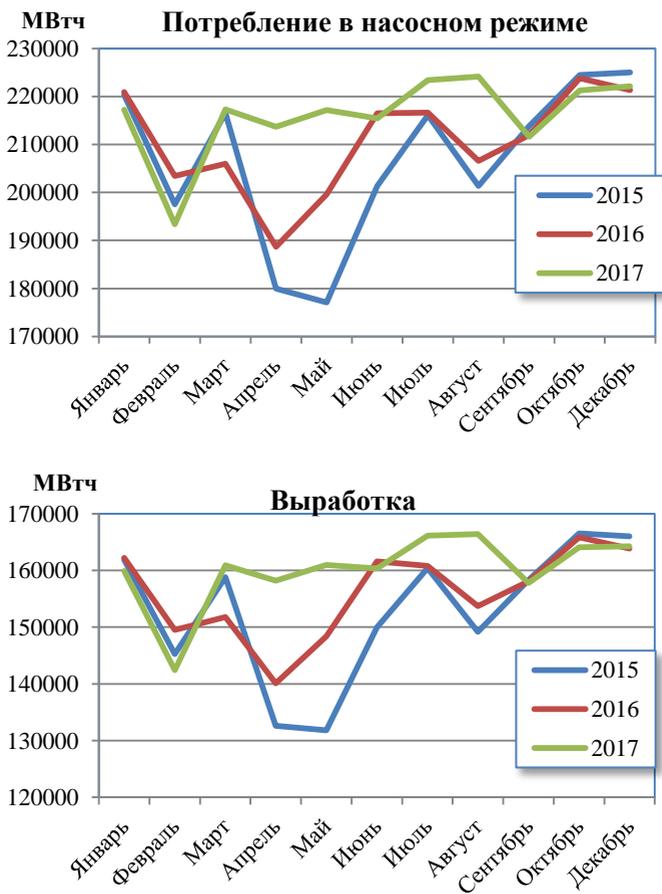


Рис. 4. Показатели работы ГАЭС:

\mathcal{E}_1 – зарядка (насосный режим); \mathcal{E}_2 – разрядка (режим генератора)

Технические параметры работы, такие как время работы в насосном режиме и объем гидроресурсов является расчетным параметром, определяемым на этапе проектирования станции. Поэтому основным оптимизируемым фактором, от которого зависит совокупный эконо-

мический эффект ГАЭС является цена рынка на сутки вперед (РСВ), а именно разницы цены в ночные и дневные часы [5].

Для оценки ожидаемой разницы цен, были рассмотрены 3 характерных периода работы ГАЭС:

1) зимний период, характерный высоким потреблением и покрытием значительной части баланса за счет тепловой генерации, что приводит к росту цен;

2) период гидрологической межени, при котором в структуре баланса значительно возрастает доля гидрогенерации, как следствие цены РСВ снижаются;

3) лето, период снижения нагрузки из-за окончания отопительного сезона.

Для определения разницы цен между ночным и дневным средним значением цен были взяты значения с сайта АО «Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии» (табл. 1) [3].

В табл. 2 приведены примеры средних цен в различные периоды работы станции.

Таблица 2

Примеры средних цен в различные периоды работы станции

Период	Межень	Половодье	Паводок	Межень	Паводок
Средняя цена в период работы в насосном режиме (руб/МВт·ч)	712,1	610	692,33	968,12	663,741
Средняя цена в период генерации (руб/МВт·ч)	848,37	783,69	907,16	1727,22	

Складывающаяся конъюнктура рынка в первой ценовой зоне ОРЭМ приводит к следующим результатам работы ГАЭС (рис. 5).

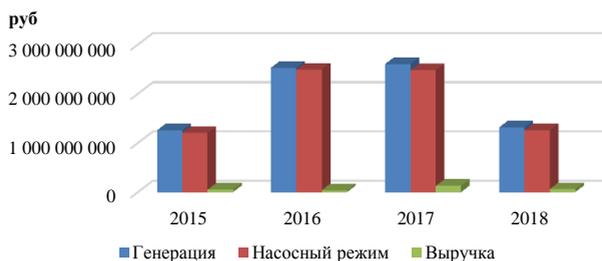


Рис. 5. Структура доходов ГАЭС

Значительные колебания в цене РСВ приводят к непостоянству выручки ГАЭС.

Выводы по работе. ГАЭС это особенный вид энергетических станций, несущий как системный эффект от выравнивания графиков нагрузки, так и экономический от наличия возможности работы в часы максимальной стоимости. Для эффективного управления станцией необходимо создание экономико-математических моделей, позволяющих определять минимально допустимые колебания цен в течении суток.

Библиографический список

1. Hydropower Market Report [Сайт]: U.S. Department of Energy [2019]. URL: <https://www.energy.gov/eere/water/hydropower-market-report> (дата обращения 10.10.2019).

2. Design of a Pumped Hydroelectric Energy Storage (PHES) System For Jordan [Сайт]: PHES System for Jordan, Advisor S. Akour [2017]. URL: www.researchgate.net/publication/317645651_Design_of_a_Pumped_Hydroelectric_Energy_Storage_PHES_System_For_Jordan (дата обращения 10.10.2019).

3. Суточные индексы и объемы РСВ [Сайт]: АО «АТС» [2019]. URL: <https://www.atsenergo.ru/results/rsv/index> (дата обращения 10.10.2019).

4. Загорская ГАЭС [Сайт]: Филиал ПАО «РусГидро» – «Загорская ГАЭС» [2019]. URL: <http://www.zagaes.rushydro.ru/> (дата обращения 10.10.2019).

5. **Кароль Л.А.** Водноэнергетические расчеты гидроаккумулирующих электростанций: учеб. пос. для вузов. М.: МЭИ, 1977. 104 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

, утепление.....	357	выпрямитель.....	113
MathCad	88, 89, 371, 372, 374	высоковольтные изоляторы	133
RDF-топливо	243	высоковольтные шины	107
SmartGid.....	102, 107	высоковольтные	
аварийные отключения.....	140	электродвигатели	113
аварийный режим	67	вычислительная газовая	
адресные волоконные		динамика	260, 268
брэгговские структуры	231	газификация.....	152
альтернативная энергетика	218	газоперекачивающий агрегат	268
альтернативные и		газопоршневая установка	152
возобновляемые источники		газотурбинная генерация.....	295
энергии.....	224	газотурбинная установка.....	44, 74, 268
альтернативные источники		гарантирующий поставщик.....	400
питания	408	генетический алгоритм.....	183
анализ отключений линий.....	334	гибридное транспортное средство ..	231
аномалии скорости ветра.....	140	гибридный автомобиль.....	231
антенны.....	128	гидравлическая турбина	218
атомная электростанция	81, 190	гидравлическое сопротивление.....	61
Бакальское рудоуправление	295	гидроаккумулирующие станции	444
безотказность	145	главный циркуляционный насос.....	190
безреагентная градирня	61	горение.....	243
бенчмаркинг	119	горячее водоснабжение	357
бесперебойность	145	датчик напряжения	102
биогаз.....	243, 252	датчик температуры.....	107, 231
биполярная мембрана	388	датчик Холла	327
борная кислота	67	декарбонизация	388
ВБР.....	102, 107, 231	диффузионная модель	51
ВВЭР.....	67	диэлектрик.....	102
ветер.....	140	дожиг.....	243
ветрогенератор	383, 408	домохозяйства	237
ветроэлектростанция	375	дробилка	415
ВИЭ214, 225, 226, 229, 237, 238, 239, 240, 242, 366	375, 383, 384, 393, 394, 395, 398, 399, 439	дымовые газы	33
влажность	307	естественная монополия.....	400
водяной пар	44	звено размерной цепи	183
воздушные линии.....	133	зеленое строительство	207
воздушные линии		зона свободного перетока.....	152
электропередачи.....	140	измельчение.....	313, 319, 415
воздушный поток.....	408	изокванты	95
возобновляемая энергия	383	изоклинали	95
возобновляемые источники		изоляторы.....	334
энергии.....	214, 365	изоляция.....	334
волоконная брэгговская решетка.....	102, 107, 231	имитационная модель	341
вольт-амперная характеристика.....	433	имитационное моделирование.....	176, 183, 341
восстанавливаемость	145	инвертор тока	113
вспенивание шлака	281		

индикативные показатели	
надежности электроснабжения ..	145
индикатор	133
катионообменная мембрана	388
<i>качество теплоснабжения</i>	19
качество электроэнергии	341
<i>квалиметрия</i>	19
кварц	102
кварцовый стержень	102
климатические изменения	140
клинкер	288
ключевые показатели	
эффективности	400
когенерация	152
кокс	351
комбинированная система	
энергоснабжения	214
компактирование	319
компенсация реактивной	
мощности	88
компьютерное моделирование	133
конденсационный водогрейный	
котел	25
короткое замыкание	327
котел	25
котел-утилизатор	44, 74
котельная	152
коэффициент полезного действия	44
кристалл кварца	102
крупнозернистый кварц	288
Крымский регион	214, 365
лопаточный аппарат	260
магнитное поле	159
мазут	347
малая генерация	152
математическое моделирование	33, 424
мелкодисперсные частицы	40
мельница	415
метод Монте-Карло	88
микрогенерация	393
микрогранулирование	275
минимизация потерь	
электрической энергии	169
многокритериальная	
оптимизация	260
многофункциональная	
дополнительная	
паротурбинная установка	81
моделирование	95
модернизация	33, 196
мониторинг	128, 252
монооксид углерода	351
мультикамерный разрядник	334
мультиколлинеарность	33
МЭК 6185	128
нагрев сидеритоплезитовой руды	351
направленные антенны	128
насадка	61
независимая энергосбытовая	
компания	400
нестационарная	
теплопроводность	424
нефтяной кокс	347
нечёткие нейронные сети	169, 176
обмен информацией	128
объединенная энергосистема	375
объект санаторно-курортного	
комплекса	365
однофазные электроприемники	341
оптимизация	88, 371
оптовый рынок электроэнергии и	
мощности	176
ороситель	61
ослабляющая среда	51
отопительная нагрузка	424
отопление	424
охлаждение кокса	351
очистка газа	40
паровой привод компрессора	74
парогазовая турбина	74
парогазовая установка	44
парокомпрессионный тепловой	
насос	13
пароперегреватель	44
паропроводы	200
пароснабжение	200
переработка и утилизация	313
переходной процесс	113
пластифицирующие реагенты	307
пневмомеханический аппарат	275
<i>показатели качества</i>	19
полигон ТКО	252
полупроводниковые	
преобразователи	113
поток отказов	334
преобразователи	
полупроводниковые	113
прогноз теплопотребления	33
прогнозирование расхода	
тепловой энергии	33

прогнозирование		сушильный агент.....	300
электропотребления.....	176	сырьевой шлам.....	307
производственная функция.....	95	твердые коммунальные отходы.....	319
промежуточный		температура горения.....	288
пароперегреватель.....	44	тепловая мощность.....	74
промышленный объект.....	214	тепловая электростанция.....	13
просьюмер.....	237	тепловой аккумулятор фазового	
противоаварийное регулирование..	190	перехода.....	81
противодавленческая паровая		тепловой насос.....	13
турбина.....	74	тепловой насос.....	357
псевдооживленный слой.....	300	тепловой насос.....	383
пыль.....	40	тепловой режим.....	424
радиационный теплоперенос.....	51	тепловой эффект	
размерная цепь.....	183	клинкерообразования.....	288
разность потенциалов.....	102	теплообмен.....	61
распределенная генерация.....	237	теплопроводность.....	424
распределенная энергетика.....	152	теплотехнология.....	295
распределительная сеть.....	145	термолиз.....	319
регрессионный анализ.....	33	техико-экономическое	
резервирование собственных		обоснование.....	214
нужд АЭС.....	81	техническое состояние.....	268
результаты испытаний.....	25	техногенные полимерные	
рельеф.....	218	материалы.....	313
реновация.....	196	техногенный волокнистый	
ресурсосберегающие технологии... ..	218	материал.....	275
ресурсосбережение.....	313, 319	ТКО.....	319
рециклинг тепловых и		топочная система.....	347
материальных потоков.....	319	точность прогнозирования.....	169
рукавный фильтр.....	275	транспортная задача.....	371
САПР.....	183	трехфазные линии.....	159
свалочный газ.....	243, 252	трудоемкость и периодичность	
свойства.....	67	ремонта.....	119
сепаратор.....	40	<i>турбина паровая</i>	
сидерит.....	295	<i>противодавленческая</i>	74
силикагель.....	300	угар кокса.....	351
система теплоснабжения.....	33	углеводород.....	347
<i>система централизованного</i>		удельный расход топлива.....	307
<i>теплоснабжения</i>	19	указатель коротких замыканий.....	327
скважина.....	218	управление отходами.....	437
солнечная панель.....	433	управление строительством.....	207
солнечные панели.....	237	условное топливо.....	44
солнечные электростанции.....	375	условные единицы ремонта.....	119
солнечный коллектор.....	383	устройство контроля.....	133
стандарты серии МЭК 6185.....	128	центробежный нагнетатель.....	260
степень измельчения.....	415	циклон.....	40
степень очистки.....	275	циклонная установка.....	275
стоимость выдачи энергии в		частичные разряды.....	128
систему от микрогенератора.....	393	частота.....	190
стоимость жизненного цикла.....	357	частотно-регулируемый привод.....	190
струйная мельница.....	415	численное моделирование.....	51, 260

экологическая безопасность.....	319, 437	элементы программного	
экономическая эффективность	408	комплекса	169
экономические стимулы	176	энергетическое топливо.....	347
экономия	44	энергия из отходов	437
эксплуатационные факторы	433	энергобезопасность	224
эластичность	95	энергонезависимость	224
электрическая и тепловая		энергоресурсы	307
мощность	74	энергосберегающие технологии	214
электрическая энергия	341	энергосбережение	200, 319, 365, 424
электродвигатели		энергосбыт	400
высоковольтные	113	энергосистема.....	95, 190
электролиз меди	327	энерготрейдинг	400
электролизная ванна	327	энергоэффективное	
электроmemбранная коррекция		оборудование.....	313
pH	388	<i>энергоэффективность</i> 19, 196, 207, 224, 357, 437	
электропотребление на		эффективность	95
расплавление	281	эффективность работы солнечной	
электропривод	113	панели	433
электроэнергетика.....	159	эффективность систем	
электроэнергетические системы.....	169	охлаждения конденсаторов	13

МАКЕТ ДЛЯ ПРАВКИ! Номера страниц меняться не будут.

Научное издание

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ**

**IV Международная
научно-техническая
конференция**

Материалы конференции



Подписано в печать 30.11.19 г.
Формат 60×84¹/₁₆. Усл.-печ. л. 21,75.
Адрес размещения в сети Интернет:
<http://es.bstu.ru/archive/2019>

Макет подготовлен в Белгородском государственном
технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46