



ICES-2023A
BELGOROD

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Белгородский государственный
технологический университет
им. В.Г. Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

**VII Международная
научно–техническая
конференция**

**Белгород,
30 июля 2023 г.**

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования**

**«Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ICES-2023A)

**VII Международная
научно-техническая
конференция**

Секция молодых ученых

Материалы конференции

(Белгород, 30 июля 2023 г.)

**Белгород
2023**

УДК 620.9(082)

ББК 3

Э 65

Энергетические системы (ICES-2023A) [Электронный ресурс]: материалы VII
Э65 Междунар. науч.-техн. конф., 30 июня 2023 г. Секция молодых ученых / БГТУ
им. В.Г. Шухова; отв. ред. П.А. Трубаев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. – 84 с. –
1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования: ПК; 512 Мб ОЗУ; сво-
бодное место на HDD 12 Мб; Microsoft Windows XP и выше; дисковод CD-ROM;
программа для чтения файлов формата pdf.

ISBN 978-5-361-01211-4

В сборнике опубликованы доклады студентов, магистрантов и аспирантов, пред-
ставленные в секции молодых ученых VII Международной научно-технической конфе-
ренции «Энергетические системы (ICES-2023A)».

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 статей, включенных в сборник, сохраняют исключительные права на разме-
щенные в сборнике материалы и вправе использовать свои произведения независимо
от сборника.

УДК 620.9(082)

ББК 3

ISBN 978-5-361-01211-4

© БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Горбач Д.В. Анализ эффективности использования теплонасосных установок для индивидуального теплоснабжения удаленных поселений	6
Егоров М.Ю., Патлан С.И. Контроль и диагностика характеристик изоляции электрогенерирующих элементов одно- и многоэлементных сборок.....	14
Ершова А.И. Исследование и разработка комплекса мер по повышению эффективности управления потреблением электрической энергии АО	22
Жуков И.С., Блинов В.Л. Определение степени эрозии лопаточного аппарата осевого компрессора по сдвигу характеристик.....	27
Калашников В.И. Формирование обобщённой схемы потерь и их расчёт на примере АО.....	33
Лач С.Ю., Солёный С.В. Методы диагностики турбогенераторов с использованием робототехнических средств	40
Лоза Ю.С., Кутенко Н.А. Влияние природы окислителя на полимеризацию анилина в перфторированных мембранах	46
Махиянов А.В. Магнитоэлектрический генератор с коммутируемыми бифилярными обмотками.....	51
Поленов М.В. Научное обоснование и разработка методики нормирования топливно-энергетических ресурсов на ООО	55
Поломошнов К.В. Переработка твердых коммунальных отходов в RDF-топливо с последующим производством энергии и цементного клинкера как один из перспективных способов их утилизации	60
Шевяков М.Ю., Жихарева В.Р. Исследование использования водородосодержащего газа в жаротрубном котле.....	68
Филин К.В. Определение возможности выработки пара энергетических параметров при использовании в качестве топлива лузги подсолнечника	77



ПРЕДИСЛОВИЕ

VII-я международная научно-техническая конференция «Энергетические системы (ICES-2023)» состоялась 30 июня 2023 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 был отобран 23 доклада, в том числе 13 – в секцию молодых ученых. Всего в конференции приняли участие 41 человек из 14 вузов, расположенных в 12 российских регионах.

Количественный состав авторов докладов следующий: д-ра техн. наук, профессора – 8 чел.; канд. наук, доценты – 11 чел.; инженеры, ассистенты, старшие преподаватели, мл. научн. сотруд. и др. не остепенённые – 5 чел.; аспиранты – 8 чел.; магистранты и студенты – 16 чел.

УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ

- БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород;
- Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина;
- Казанский государственный энергетический университет;
- Кубанский государственный университет, г. Краснодар;
- Новосибирский государственный технический университет;
- НЧОУ ВО "ТУ УГМК", г. Верхняя Пышма;
- СамГТУ, г. Самара;
- Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова;
- Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения;
- Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;
- Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;
- Уфимский государственный нефтяной технический университет;
- ФГБОУ ВО «ЗабГУ», г. Чита;
- ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва.



ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ



Трубаев Павел Алексеевич

Председатель программного комитета
Председатель секции «Энергосбережение и энергоэффективность»

Д-р техн. наук, доц., профессор кафедры энергетики теплотехнологии БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)



Белоусов Александр Владимирович

Председатель секции «Электроэнергетика и электротехника»

Канд. техн. наук, доцент, директор института энергетики, информационных технологий и управляющих систем, зав. каф. электроэнергетики и автоматики БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)



Бирюков Алексей Борисович

Председатель секции «Теплоэнергетика и теплотехника»

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. промышленной теплофизики ДонНТУ (г. Донецк)



Гашо Евгений Геннадиевич

Председатель секции «Энергетические системы и комплексы»

Д-р техн. наук, доц., проф. кафедры Промышленных теплоэнергетических систем Национального исследовательского университета «МЭИ», эксперт аналитического центра при Правительстве РФ (г. Москва)



Мозговой Николай Васильевич

Председатель секции «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение в технологиях»

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. Промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности ВГТУ (г. Воронеж)



Радченко Вадим Витальевич

Канд. экон. наук, Председатель Совета депутатов города Белгорода (г. Белгород)



Удовиченко Злата Викторовна

Канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской архитектурно-строительной академии (г. Макеевка Донецкой обл.)



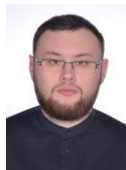
Abdouloihabi Mohamed Valid Abdouloihabi

PhD, Lecturer, University of Diyala (Baqubah, Diyala)



Marina Kozhukhova

PhD, COLLEGE OF Engineering & Applied Science, University of Wisconsin–Milwaukee (Milwaukee)



Леонов Евгений Сергеевич

технический секретарь

Инженер кафедры энергетики теплотехнологии БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)



УДК 621.577

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОСЕЛЕНИЙ

Горбач Д.В.

Научный руководитель – д-р техн. наук, доц. Трубаев П.А.

БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

Объектом исследования являлось приготовление горячей воды для отопления и ГВС в удаленных поселениях, в которых энергообеспечение происходит за счет привозного топлива. Рассматривалась теплонасосная установка мощностью 1 МВт тепловой энергии с использованием низкопотенциальной теплоты грунта. Произведен термодинамический расчет теплонасосных циклов с тремя озонобезопасными фреонами, выбранными согласно свойств хладагентов и заданным температурам цикла. Наиболее эффективна оказалась парокомпрессионная ТНУ с регенерацией теплоты и переохладителем, работающая на фреоне R123. Коэффициент преобразования энергии COP выбранной схемы составил 3,55, потребляемая мощность – 282 кВт. Предлагаемый вариант был сравнен с получением тепловой энергии непосредственно при сжигании жидкого топлива. Экономия затрат на топливо составляет 4,68 млн руб. в год, а срок окупаемости проекта – 4,2 года.

Ключевые слова: тепловой насос, теплонасосный цикл, автономное теплоснабжение, энергосбережение

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF USING HEAT PUMP INSTALLATIONS FOR INDIVIDUAL HEAT SUPPLY OF REMOTE SETTLEMENTS

Dmitry Gorbach

Scientific Director – Prof. Pavel Trubaev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Abstract

The object of the study was the preparation of hot water for heating and hot water supply in remote settlements, in which energy supply occurs due to imported fuel. A heat pump plant with a capacity of 1 MW of thermal energy was considered using low-grade heat from the soil. A thermodynamic calculation of heat pump cycles with three ozone-friendly freons, selected according to the properties of refrigerants and given cycle temperatures, was carried out. The most effective was a vapor compression HPP with heat recovery and a subcooler operating on freon R123. The energy conversion coefficient COP of the selected circuit was 3.55, the power consumption was 282 kW. The proposed option was compared with the production of thermal energy directly from the combustion of liquid fuel. Savings on fuel costs amount to 4.68 million rubles. per year, and the payback period of the project is 4.2 years.

Keywords: heat pump, heat pump cycle, independent heat supply, energy saving



Введение

В России около 30 тыс. поселений (рис. 1), в которых проживает 8% населения страны, имеют децентрализованные системы энергоснабжения [1]. Для отопления и приготовления горячей воды в изолированных посёлках используются автономные котельные и ТЭЦ, работающие, как правило, на привозном мазуте.

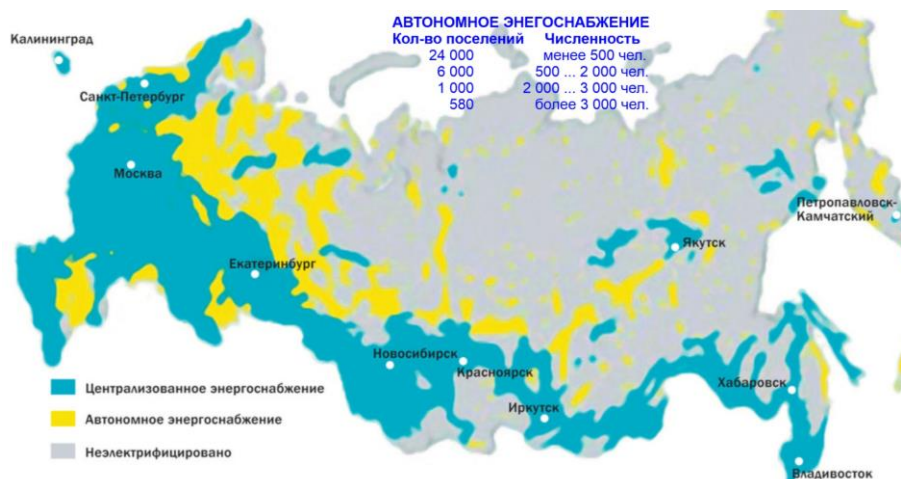


Рис. 1. Системы энергоснабжения [1]

Из-за высокой стоимости топлива, связанного с большими затратами на его доставку, стоимость электроэнергии в отдельных зонах с автономным энергоснабжением в 2017 г. достигал 200 руб/кВт·ч, а тепловой энергии – 17 тыс. руб. за Гкал [2]. Отопительный сезон в районах Крайнего Севера, где расположена большая часть таких поселений, согласно СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология» длится более 250 дней, в ряде районов Красноярского края, Ненецкого автономный округа превышает 300 дней.

Использование для теплоснабжения электроэнергии от возобновляемых источников энергии может обеспечить часть потребляемой электроэнергии, но для компенсации переменной выработки и покрытия пиковых нагрузок требует сохранения топливных электростанций и котельных.

Для снижения затрат на теплоснабжение и выработку горячей воды предлагается использовать теплонасосные установки (ТНУ). Для своей работы они используют электроэнергию и позволяют получить тепловой энергии в 3-4 раза больше, чем затрачено электроэнергии [3]. Поэтому их применение эффективно как при топливной энергогенерации, так как и при использовании возобновляемых источников энергии [4]. Эффективность теплового насоса характеризуется коэффициентом преобразования энергии COP – отношением полученной теплоты к затраченной в тепловом насосе энергии. Обычно этот коэффициент имеет значение от 3 до 5, то есть в тепловом насосе количество получаемой теплоты в 3-5 раз больше количества потребленной электроэнергии. Но это не нарушает законы физики, так в отличие от электродкотлов потребляемая энергия не преобразуется напрямую в тепловую, а используется для передачи теплоты от холодной окружающей среды к нагреваемой воде.

Несмотря на то, что тепловой насос позволяет снижать затраты электроэнергии в несколько раз по сравнению с электроотоплением, в нашей стране они широкого применения не нашли. Это связано с тем, что стоимость электроэнергии по сравнению со

стоимостью природного топлива в РФ очень высокая, поэтому отопление от газовых или угольных котельных намного дешевле электроотопления. Поэтому применение тепловых насосов эффективно только при высокой стоимости природного топлива, что имеет место в автономных системах энергоснабжения. Применение только теплонасосных насосов для отопления и ГВС при низких температурах недостаточно [5], но использование гибридных энергетических комплексов в таких случаях имеет высокую эффективность [5, 6] и позволяет сократить стоимость энергоресурсов на величину до 50% и снизить негативное воздействие на окружающую среду благодаря уменьшения количества сжигаемого топлива [7].

Цели и задачи работы

Цель работы – разработка системы теплоснабжения на базе теплового насоса для приготовления горячей воды для отопления и ГВС.

Задачи, решаемые в работе:

1. Термодинамический расчет теплонасосного цикла с определением рабочих параметров.
2. Расчет теплообменников теплового насоса.
3. Техничко-экономическое обоснование проекта.

Методы расчета

При выборе рассмотрены три схемы тепловых насосов (рис. 2). Первая схема является наиболее простой, в ней присутствуют два теплообменника, компрессор и дроссельный вентиль. Во второй схеме дополнительно для повышения надежности включен регенеративный теплообменник, в котором происходит перегрев пара, подаваемого в компрессор за счет теплоты горячего фреона, выходящего из конденсатора, что исключает попадание в компрессор капель неиспарившегося рабочего агента. В третьей схеме после конденсатора установлен еще один теплообменник для переохлаждения жидкого фреона и увеличения теплопроизводительности теплового насоса. Это наиболее эффективная схема, но из-за наличия четырех теплообменников стоимость теплового насоса самая высокая.

Расчет производился согласно методике работы [3] и был автоматизирован в электронных таблицах Excel. Для расчета свойств фреонов использовалась библиотека RefProp (<https://www.nist.gov/srd/refprop>).

Расчет для каждой схемы включал:

- а) определение параметров рабочего агента в точках теплонасосного цикла;
- б) расчет удельных тепловых нагрузок в узлах теплового насоса (испарителе, конденсаторе, и при наличии – в переохладителе и в регенеративном теплообменнике);
- в) расчет показателей эффективности (COP, эксергетического КПД, удельного расхода первичной энергии);
- г) проектирование теплообменников с определением поверхности теплообмена и металлоемкости;
- д) выбор наиболее эффективной схемы.

Рассчитанные теплонасосные циклы визуализировались на диаграммах давление-энтальпия [8]. В отличие от диаграмм температура-энтропия применяемые диаграммы позволяют визуально демонстрировать эффективность цикла.

Результаты расчета

В качестве источника низкопотенциальной теплоты рассматривалось тепло грунта. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.



Схема № 1

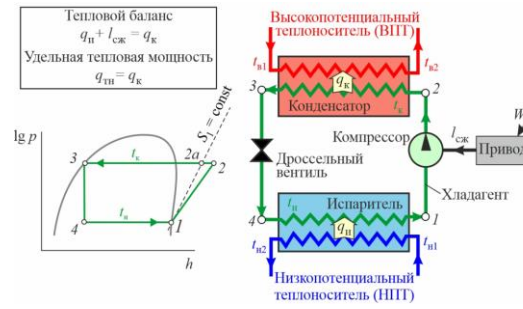


Схема № 2

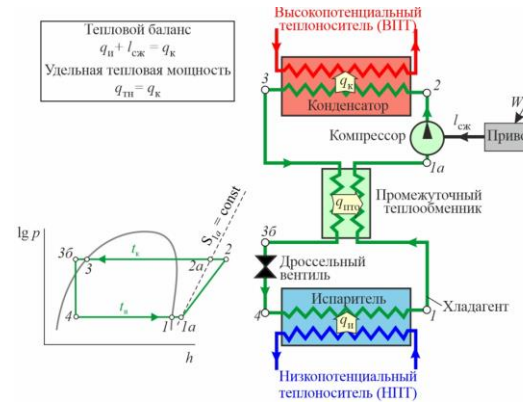


Схема № 3

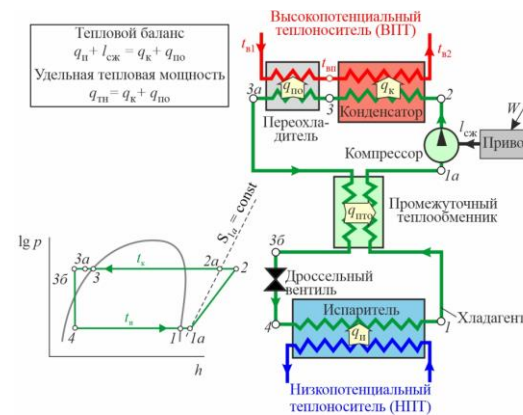


Рис. 2. Схемы ТНУ [3]

Таблица 1

Исходные данные для расчета ТНУ

№	Наименование	Обозначение	Размерность	Значение
1	Тепловая мощность	$Q_{тн}$	МВт	1
2	Температура высокопотенциального теплоносителя (НПТ):			
2.1	- на входе в тепловой насос	$t_{н1}$	°С	20
2.2	- после теплового насоса	$t_{н2}$	°С	10
3	Температура высокопотенциального теплоносителя (ВПТ):			
3.1	- на входе в тепловой насос	$t_{в1}$	°С	10
3.2	- после теплового насоса	$t_{в2}$	°С	75



В отличие от хладагентов, применяемых в холодильных машинах и кондиционерах, в тепловых насосах требуются более высокие температуры конденсации. Поэтому фреоны выбирались по следующим критериям:

- давление насыщения при температуре испарения должно быть близко к атмосферному;

- температура конденсации должна быть ниже критической температуры фреона.

Согласно анализу свойств хладагентов для сравнительного расчета были выбраны три фреона, R123, R134A, R152A, соответствующие заданным температурам в тепловом насосе, эффективность которых подтверждена рядом исследований [9].

Визуализация расчетов теплонасосных циклов представлена на рис. 3.

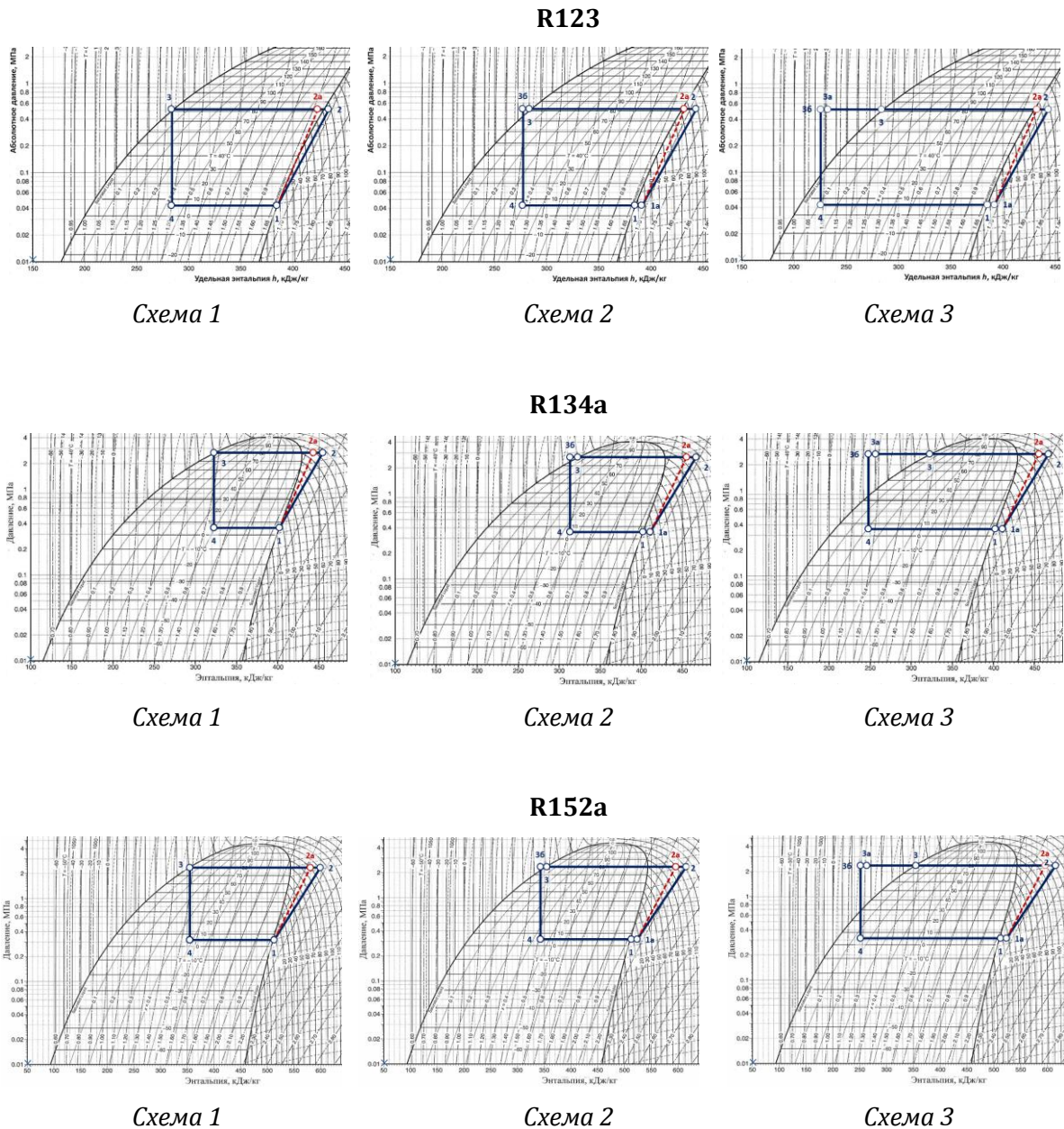


Рис. 3. Результаты расчетов теплонасосных циклов

По результатам термодинамический расчет каждой из схем с тремя фреонами определены основные показатели каждого варианта (табл. 2).



Таблица 2

Оценка эффективности циклов

Схема	Парокомпрессионная ТНУ (схема № 1)			Парокомпрессионная ТНУ с регенерацией теплоты (схема № 2)			Парокомпрессионная ТНУ с регенерацией теплоты и переохладителем (схема № 3)		
	R123	R134A	R152A	R123	R134A	R152A	R123	R134A	R152A
Наименование фреонов									
Удельные показатели эффективности									
Коэффициент преобразования электроэнергии μ_3 (COP)	2,65	2,19	2,47	2,69	2,25	2,49	3,55	3,28	3,37
Удельный расход первичной энергии ПЭ	1,20	1	1,29	1,18	1	1,27	0,89	1	0,94
Характеристики ТНУ									
Расход фреона, кг/с	6,62	7,58	4,10	6,26	6,92	3,85	4,73	4,76	2,85
Степень сжатия в компрессоре ε	12,01	7,55	7,46	12,01	7,55	7,46	12,01	7,55	7,46
Мощность ТНУ, кВт									
Потребляемая мощность	378	457	405	372	444	401	282	305	297
Тепловая мощность ТНУ	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

По наибольшей удельной теплопроизводительности на 1 кг фреона и наибольшему коэффициенту преобразования была выбрана схема № 3 с фреоном R123. По полученным термодинамическим показателям был произведен расчет теплообменников теплонасосной установки. Определены площади поверхности теплообменников и произведена компоновка трубного пучка (табл. 3).

Таблица 3

Конструктивные параметры теплообменников

Параметры	Испаритель	Конденсатор	Переохладитель	Промежуточный теплообменник
Диаметр труб, мм	23	23	23	23
Скорость среды в трубах, м/с	1,0	1,0	1,0	1,0
Скорость среды в межтрубном пространстве, м/с	-	-	2,5	10,0
Число ходов	5	4	1	1
Число труб в одном ходе	38	12	9	8
Теплоотдающая поверхность, м ²	61,2	13,8	1,5	14,8
Диаметр теплообменника, м	0,460	0,240	0,110	0,110
Длина труб в одном ходе, м	5,13	4,57	2,31	25,68

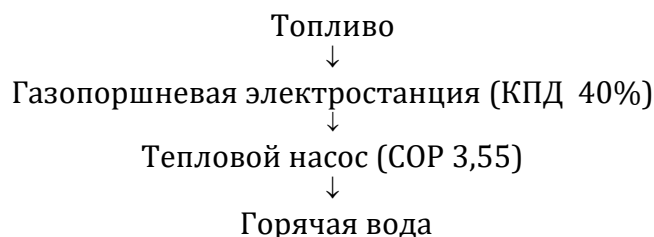
Стоимость теплонасосной установки составила около 20 млн руб, затраты на ее эксплуатацию около 30 млн руб в год с учетом потребления электроэнергии, выработанной на мазутной миниТЭЦ. Себестоимость тепловой энергии составила около 45 тыс. руб за Гкал.



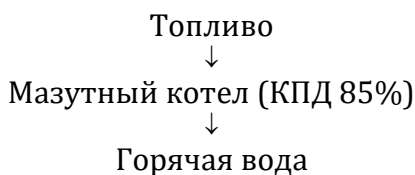
Обсуждение

Для технико-экономического обоснования предлагаемый вариант был сравнен с получением тепловой энергии непосредственно при сжигании мазута.

Предлагаемый вариант включает следующую линию:



Вариант сравнивается с базовым, включающим непосредственный нагрев воды топливом:



Стоимость тепловой энергии в этом случае 5,2 руб за Гкал.

Экономия определялась как разность затрат на эти два варианта. Результаты расчета представлен в табл. 4. В год экономится около 5 млн руб. и срок окупаемости составляет около 4 лет, что является допустимым экономическим показателем.

Таблица 4

Технико-экономические показатели проекта

Наименование	Значение
Мощность ТНУ, МВт	1,000
Вырабатываемая теплота, Гкал/год	7 150,2
Стоимость ТНУ	
удельная, млн. руб./МВт	15
затраты ТНУ со строительством руб.	19,50
срок службы ТНУ, лет	15,00
КИУМ ТНУ	95%
Затраты электроэнергии на работу ТНУ	
тыс. кВт·ч/год	2 343
себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на ГПА, руб./кВт·ч	12,6
млн. руб/год	29,5
Общие затраты на эксплуатацию ТНУ (ОРЕХ), млн руб./год	31,5
Себестоимость тепловой энергии, вырабатываемой в ТНУ, руб/Гкал	4583,4
Затраты на альтернативное топливо (топочный мазут)	
расход, т/год	748,98
стоимость топлива (с доставкой), тыс. руб/т	40
затраты, млн. руб/год	37,45
себестоимость тепловой энергии, вырабатываемой в котельной, руб/Гкал	5237,50
Экономия, млн. руб/год	4,68
Простой срок окупаемости проекта, лет	4,2



Если тепловой насос использовать в системе с возобновляемыми источниками энергии, то затраты электроэнергии на теплоснабжение снизятся в 3,5 раза. При средней стоимости электроэнергии от ВИЭ 6 руб за кВт·ч экономия составит около 9 млн руб в год и срок окупаемости еще снизится.

Выводы

Объектом исследования являлось приготовление горячей воды для отопления и ГВС в удаленных поселениях, в которых энергообеспечение происходит за счет привозного топлива. Рассматриваемая установленная мощность – 1 МВт. В работе произведен термодинамический расчет теплонасосных циклов с тремя озонобезопасными фреонами. Наиболее эффективна оказалась парокомпрессионная ТНУ с регенерацией теплоты и переохладителем, работающая на фреоне R123. Коэффициент преобразования энергии COP выбранной схемы составил 3,55, потребляемая мощность – 282 кВт. Произведена технико-экономическая оценка внедрения ТНУ. Экономия затрат на топливо составляет 4,68 млн руб. в год, а срок окупаемости проекта – 4,2 года.

Библиографический список

1. Башмаков И.А. Повышение эффективности энергоснабжения в северных регионах России // Энергосбережение. 2017. № 2. С. 47-52.
2. Башмаков И.А., Дзедзичек М.Г. Анализ финансовой нагрузки на регионы с дорогостоящим децентрализованным энергоснабжением // Энергосовет. 2017. № 47. С. 7-16.
3. Трубаев П.А., Гришко Б.М. Тепловые насосы: учеб. пособие – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 143 с.
4. Гошовский С.В., Зурьян А.В. Снижение техногенной нагрузки при использовании теплонасосных систем // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 102-107.
5. Использование тепловых насосов для обогрева и горячего водоснабжения в условиях высокогорья Кыргызстана / О.Т. Шатманов, Ю.Х. Исманов, Ж.К. Айдаралиев, Ж.А. Исакова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 7. С. 72-75.
6. Тягунов М.Г., Шевердиев Р.П. Применение цифрового двойника для исследования и оптимизации локальных гибридных энергокомплексов с генерацией на основе ВИЭ // Энергетические системы. 2022. № 1. С. 60–71.
7. Комбинированная система теплоснабжения объектов, расположенных в районах со сложными климатическими условиями / А.Ф. Шатров, О.Г. Сапунов, А.А. Кулагин, С.Ю. Немировский // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 1 (93). С. 30-32.
8. ASHRAE Handbook. Fundamentals: SI Edition. Peachtree Corners, GA: ASHRAE, 2021. 1088 p.
9. Байда Б.Ю., Карнаух В.В., Бирюков А.Б. Энергетическое и эксергетическое исследование R1234yf, R1234ze для парокомпрессионной теплонасосной установки // Энергетические системы. 2020. № 1. С. 145–152.



КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОДНО И МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ СБОРОК

Егоров М.Ю.^{1,2,3}, Патлан С.И.¹

¹ГУАП, Санкт-Петербург

²СПбПУ, Санкт-Петербург

³СПбГЛТУ, Санкт-Петербург

Аннотация

В работе проведено обоснование и выбор способа контроля и диагностики электроизоляционных характеристик изоляции для стабилизации генерируемой электрической мощности электрогенерирующих элементов и сборок термоэмиссионных преобразователей. Разработаны эквивалентная электрической модель и электрическая схема для контроля электрической изоляции во время испытаний на исследовательских ядерных реакторах. С помощью программы «Multisim» проведена экспериментальная проверка способа измерений и расчетов на одно- и многоэлементной сборках. Показано хорошее соответствие измеренных и расчетных значений токов утечки для одноэлементных электрогенерирующих сборок и значительные отклонения при увеличении числа электрогенерирующих элементов в многоэлементных. Деградация изоляционных свойств коллекторного пакета либо отдельно металлокерамического узла эмиттера не приводят к существенным потерям электрической мощности электрогенерирующей сборки, не превышая 0,2 %. На основании разработанного способа целесообразно оформление Методики измерений и расчета сопротивлений изоляции эмиттера и коллекторного пакета, тока утечки и потери выходной мощности для предприятий, проводящих реакторные испытания ЭГС.

Ключевые слова: термоэмиссионные преобразователи, одно и многоэлементные электрогенерирующие сборки, коллекторный пакет, металлокерамический узел, электрическое сопротивление изоляции, ток утечки, потери электрической мощности.

MONITORING AND DIAGNOSTICS OF INSULATION CHARACTERISTICS OF ELECTRIC GENERATING ELEMENTS OF SINGLE- AND MULTI-ELEMENT ASSEMBLIES

Mikle Egorov^{1,2,3}, Sergey Patlan¹

¹Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

³Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirova, Saint-Petersburg

Abstract

The study provides a justification and choice of a method for monitoring and diagnosing the electrical insulation characteristics of insulation to stabilize the generated electrical power of electric generating elements and assemblies of thermal emission converters. An equivalent electrical model and an electrical circuit for monitoring electrical insulation during tests at research nuclear reactors have been developed. With the help of the "multisim" program, an experimental verification of the method of measurements and calculations on single and multi-element assemblies was carried out. A good correspondence of the measured and calculated values of leakage currents for single-element power generating assemblies and significant deviations with an increase in the number of power generating elements in multi-element ones is shown. Degradation of the insulating proper-



ties of the collector package, or separately of the metal-ceramic emitter assembly, does not lead to significant losses of electrical power of the generating assembly, not exceeding 0.2%. Based on the developed method, it is advisable to design a methodology for measuring and calculating the insulation resistances of the emitter and collector package, leakage current and loss of output power for enterprises conducting EGS reactor tests.

Keywords: *thermal emission converters, single and multi-element power generating assemblies, collector package, metal-ceramic assembly, electrical insulation resistance, leakage current, electrical power loss.*

Введение

Термоэмиссионные преобразователи являются наиболее перспективными для систем автономного энергообеспечения повышенной мощности. Конструкция термоэмиссионного реактора преобразователя (ТРП) схожа с ядерным реактором, в котором вместо обычных твэлов применяют электрогенерирующие сборки [1-4]. Электроизоляционные характеристики изоляции электрогенерирующих элементов (ЭГЭ) и электрогенерирующих сборок (ЭГС), являются важными параметрами, определяющими работоспособность и выходную электрическую мощность космических ядерно-энергетических установок с термоэмиссионным преобразованием энергии. Специальные реакторные испытания и исследования в наземных условиях электрогенерирующих элементов одно и многоэлементных сборок определяют надежную и длительную эксплуатацию ядерно-энергетических установок в космосе. В процессе испытаний на исследовательских ядерных реакторах число непосредственно контролируемых параметров и характеристик крайне ограничено. Электрическое сопротивление работающей ЭГС определяется суммарным сопротивлением изоляции коллекторного пакета ЭГС и сопротивлением изоляции металлокерамических узлов, зависящих от технологии изготовления, температуры, давления пара цезия и длительности работы. В настоящее время в процессе реакторных испытаний отсутствуют способы контроля и диагностики электроизоляционных характеристик изоляции коллекторного пакета и металлокерамических узлов, совместно определяющих величины тока утечки и потери электрической мощности электрогенерирующих элементов и электрогенерирующих сборок.

Целью работы является выбор и обоснование способа контроля и диагностики электроизоляционных характеристик изоляции для стабилизации генерируемой электрической мощности электрогенерирующих элементов и сборок. Объектом исследования - одно и многоэлементные термоэмиссионные сборки при проведении реакторных испытаний и исследований. Предметом исследования служили электроизоляционные характеристики изоляции коллекторного пакета ЭГЭ и металлокерамических узлов ЭГС.

Применяемые способы контроля и диагностики электроизоляционных характеристик для используемых и разрабатываемых конструкций ЭГС

Важнейшим этапом создания, отработки режимов работы ЭГЭ и ЭГС и их последующего изготовления являются экспериментальные исследования материалов и процессов, стендовые и реакторные испытания и исследования в составе специальных устройств. Основной задачей таких испытаний является изучение процессов и факторов, приводящих к изменению энергетических и ресурсных характеристик ЭГС, а также причин выхода из строя элементов и ЭГС в целом [5-7].



В работе [1] приводится информация о разработанном в НИИ НПО «Луч» методе контроля сопротивления коллекторной изоляции ЭГС, основанном на измерении потенциала по корпусу ЭГС, вызванного пропусканием зондирующего тока между одной из токонесущих шин и корпусом. Количество, место, характер и параметры нарушения электрической прочности КП и потери мощности определяются из анализа распределения потенциала по несущей трубке ЭГС. Другой способ определения электрической прочности коллекторной изоляции термоэмиссионной сборки при реакторных испытаниях приведен в описании патента на изобретение [8]. Способ заключается в том, что во время реакторных испытаний ЭГС с одним изолированным токовыводом производят в два цикла съём вольтамперных характеристик (ВАХ) с измерением сбрасываемой каждым электрогенерирующим элементом (ЭГЭ) тепловой мощности, регистрируют в первом цикле съёма ВАХ напряжение пробоя $U_{пр}$, номер элемента, где произошел пробой, относят к элементу, где разность сбрасываемых тепловых мощностей максимальна, а расчет электрической прочности коллекторной изоляции проводят по специальной формуле. Имеется информация о применении импульсных и радиоимпульсных методов контроля электрических цепей электрогенерирующих сборок на различных этапах подготовки и проведения испытаний [1].

Для уменьшения тока утечки и потери генерируемой электрической мощности конструкторами предлагаются специальные технические решения [9 - 11]. Конструкция электрогенерирующего канала термоэмиссионного реактора-преобразователя [9], состоит из трехслойного металлокерамического коллекторного пакета, внутренний слой которого разделен электрически керамической изоляцией на несколько участков. Эти участки являются коллекторами электрогенерирующих элементов. Внутри коллекторного пакета расположены эмиттеры с топливом. Последовательное соединение эмиттеров с коллекторами осуществляется коммутационными шинами, в которых установлены керамические изоляторы в виде втулок, поддерживающих свободные концы эмиттеров и выполняют роль дистанционирующих элементов электродов ЭГК.

Разработана конструкция одноэлементного ЭГК, у которого эмиттерная оболочка, содержащая топливный сердечник, коаксиально с радиальным зазором размещена внутри металлокерамического коллекторного пакета. При этом электроды выполнены протяженными на всю длину активной зоны, снабжены дистанциаторами межэлектродного зазора (МЭЗ), а также торцовыми сильфонно-гермовводными узлами и электрическими выводами [10]. Перед конструкторами и технологами, а затем авторами изобретения [11], стояла задача создания многоэлементного ЭГК с эмиттерной оболочкой из монокристаллического сплава $Mo+(3\div 6)\%$ масс. Nb с обеспечением ее пространственной стабильности при работе ЭГК в составе ЯЭУ на тепловых и промежуточных нейтронах в течение длительного (не менее 7 лет) ресурса. Ими был предложен многоэлементный электрогенерирующий канал (ЭГК), включающий многослойный металлокерамический коллекторный пакет, внутренний слой которого разделен керамической изоляцией на отдельные участки, образующие коллекторы, и коаксиально размещенные в нем с радиальным зазором электрогенерирующие элементы (ЭГЭ) в виде цилиндрических эмиттерных оболочек из жаропрочного конструкционного материала с размещенными в них сердечниками из пористого диоксида урана.

Результаты и их обсуждение

Рассмотренные выше методы и способы контроля и диагностики одно- и многоэлементных ЭГС при проведении реакторных испытаний и исследований в основном применяются для электрической изоляции коллекторных пакетов и не позволяют контролировать полные токи утечки и, следовательно, полные потери электрической мощности ЭГС. На рис. 1 приведены конструкционная схема одноэлементной ЭГС,



электрическая модель и схема подключения амперметра и шунтирующего сопротивления к испытываемой ЭГС для контроля предлагаемым методом электрической изоляции МКУ и КП и последующего расчета тока утечки и потери электрической мощности ЭГС.

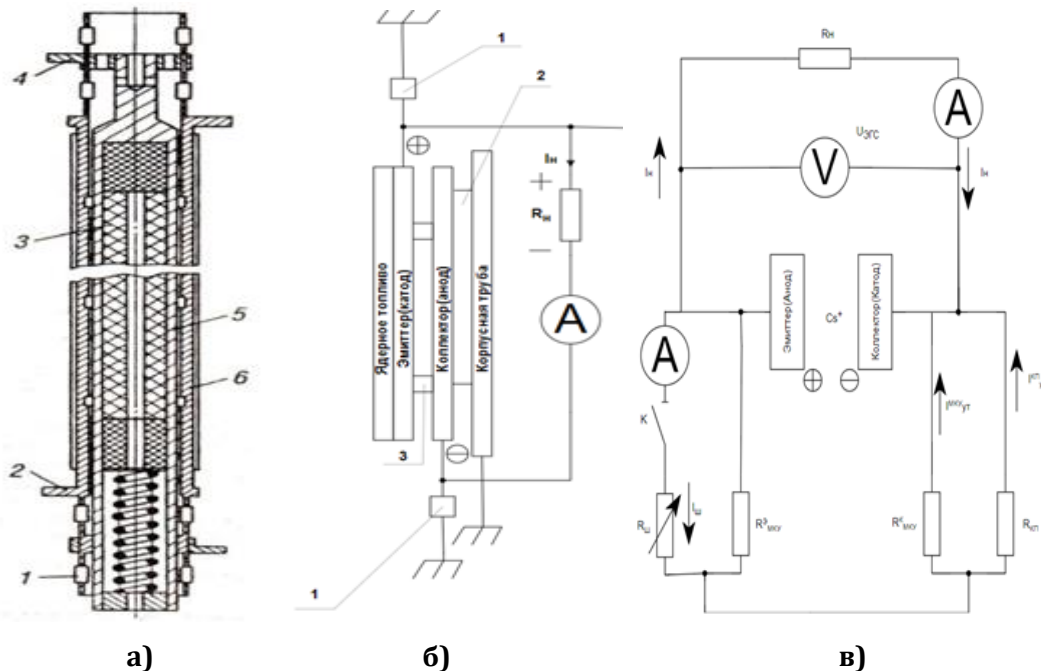


Рис. 1. Конструктивная схема одноэлементной ЭГС [1] (а), электрическая модель (б) и электрическая схема подключения шунтирующего сопротивления к испытываемой ЭГС для контроля электрической изоляции коллекторного пакета (в):

- а) 1 – металлокерамический узел (МКУ), 2, 4 – токовывод; 3 – топливный сердечник; 5 – эмиттер; 6 – коллектор;
 б) 1 – МКУ; 2 – коллекторный пакет (КП); 3 – дистанционаторы

Обозначения элементов схемы и размерности электрических величин в расчетных формулах приведены ниже:

- R_n – в электрическое сопротивление нагрузки, Ом;
- $R_{МКУ}^Э$ – в электрическое сопротивление МКУ эмиттера (анода), Ом;
- $R_{МКУ}^К$ – в электрическое сопротивление МКУ коллектора (катода), Ом;
- $R_{ш}$ – в электрическое сопротивление шунта, Ом;
- $R_{КП}$ – в электрическое сопротивление КП, Ом;
- I_n – в электрический ток нагрузки, А;
- $I_{МКУ}^Э$ – в электрический ток утечки через МКУ эмиттера, А;
- $I_{МКУ}^К$ – в электрический ток утечки через МКУ коллектора, А;
- $I_{ш}$ – в электрический ток через шунт, А;
- $I_{КП}$ – в электрический ток утечки через КП, А;
- V – вольтметр, измеряющий выходное напряжение ЭГС – U , В.

Для сохранения максимальной величины электрической мощности ЭГС эмиттер и коллектор изолируют от корпуса реактора – преобразователя таким образом, чтобы

$$R_{МКУ}^Э, R_{МКУ}^К \text{ и } R_{КП} \ll R_n. \quad (1)$$

Из условия (1) для минимизации воздействия на работу ЭГС в нагрузочном режиме при проведении реакторных испытаний величина шунтирующего сопротивления ($R_{ш}$) должна быть сравнима с величиной R_n , а $R_{ш} \approx R_n \ll R_{МКУ}^Э$ и $R_{МКУ}^К$.

Электрическая выходная мощность ЭГС - $P_{ЭГС}$ (Вт), равна



$$P_{ЭГС} = U \cdot I_H = I_H^2 \cdot R_H, \quad (2)$$

потери электрической мощности $P_{ут}$ за счет суммарных утечек тока через электрическую изоляцию $I_{ут}$ (А):

$$P_{ут} = U I_{ут}, \quad (3)$$

и тогда потери электрической мощности ΔP (%):

$$\Delta P = \frac{P_{ут}}{P_{ЭГС} + P_{ут}} \cdot 100 = \frac{I_{ут}}{I_H + I_{ут}} \cdot 100. \quad (4)$$

При шунтировании $R_{МКУ}^э$ для определения общего электрического сопротивления параллельно соединенных сопротивлений $R_{МКУ}^к$ и $R_{КП}$ (рис. 1в), расчет выполняется по формуле

$$R_{общ}^к = \frac{U - I_{ш} \cdot R_{ш}}{I_{ш}}, \quad (5)$$

при шунтировании $R_{общ}^э$ для определения электрического сопротивления $R_{МКУ}^э$, расчет по измеренной величине шунтирующего тока осуществляется по формуле

$$R_{МКУ}^э = \frac{U - I_{ш} \cdot R_{ш}}{I_{ш}}. \quad (6)$$

Суммарный ток утечки $I_{ут}$ (А) рассчитывается из соотношения:

$$I_{ут} = \frac{U}{R_{МКУ}^э + R_{общ}^к}, \quad (7)$$

а потери электрической мощности ЭГС по соотношению (4).

Экспериментальная проверка способа измерений и расчетов на одно и многоэлементной сборках

В настоящей работе экспериментальная проверка способа измерений и расчетов на одно и многоэлементной сборках проводилась на эквивалентных электрических схемах с помощью программы Multisim. На рис. 2 представлена эквивалентная электрическая схема одноэлементной ЭГС при шунтировании сопротивления изоляции КП.

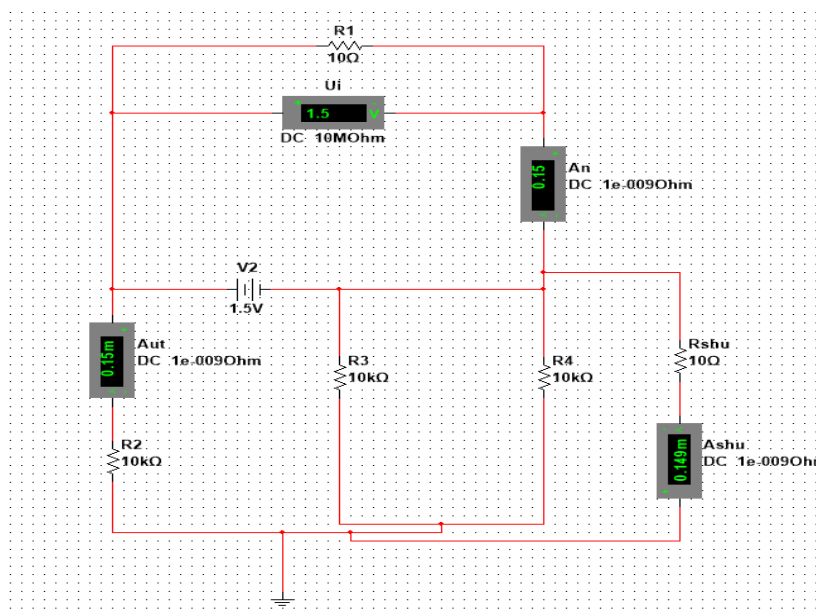


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема одноэлементной ЭГС при шунтировании сопротивления изоляции КП

В процессе реакторных испытаний или эксплуатации происходит деградация изоляционных свойств ЭГС в целом или ее отдельных узлов. Результаты моделирования такой деградации, проводимых измерений, а также расчетов тока утечки и потери выходной мощности ЭГС при постепенной потере изоляционных свойств МКУ эмиттера и общего электрического сопротивления коллектора расчетов тока утечки и потери электрической мощности приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Результаты расчетов токов утечки и потери выходной мощности при деградации изоляционных свойств МКУ эмиттера

№	Характеристики ЭГС и их значения	$I_{ут.изм},$ А	$I_{ш},$ А	$R_{кп},$ Ом	$R_{мку}^э,$ Ом	$R_{эгс(из)},$ кОм	$I_{ут.расч.},$ А	Р, %
1	U=1,5В, R _н =100Ом, I _н =0,15А, R _{мку} ^э =10кОм, R _{кп} =10кОм, R _щ =100Ом, R _{мку} ^э уменьшается (10, 5, 1, 0,1)	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	5000	10000	15	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,1
2		$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	5000	5000	10	$0,15 \cdot 10^{-3}$	0,1
3		$0,25 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	5000	1000	6	$0,25 \cdot 10^{-3}$	0,2
4		$0,29 \cdot 10^{-3}$	$14 \cdot 10^{-3}$	5000	107	5.1	$0,29 \cdot 10^{-3}$	0,2

Таблица 2

Результаты расчетов токов утечки и потери выходной мощности при деградации изоляционных свойств КП

№	Характеристики ЭГС и их значения	$I_{ут.изм},$ А	$I_{ш},$ А	$R_{кп,общ},$ Ом	$R_{мку}^э,$ Ом	$R_{эгс(из)},$ кОм	$I_{ут.расч.},$ А	Р, %
1	U=1,5В, R _н =100Ом, I _н =0,15А, R _{мку} ^э =10кОм, R _{мку} ^э =10кОм, R _щ =100Ом, R _{кп} уменьшается (10, 5, 1, 0,1)	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	5000	10000	15	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,06
2		$0,112 \cdot 10^{-3}$	$0,45 \cdot 10^{-3}$	3332	10000	13,332	$0,112 \cdot 10^{-3}$	0,07
3		$0,137 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	928	10000	10,928	$0,137 \cdot 10^{-3}$	0,09
4		$0,148 \cdot 10^{-3}$	$14 \cdot 10^{-3}$	97	10000	10,097	$0,148 \cdot 10^{-3}$	0,10

Результаты расчетов и измерений показали

– рассчитанные и измеренные величины токов утечки для одноэлементной ЭГС совпадают;

– деградация изоляционных свойств КП либо отдельно МКУ эмиттера не приводят к существенным потерям электрической мощности ЭГС.



Измерения и расчеты токов утечки на многоэлементных ЭГС (табл. 3) показали, что из-за перетоков электрического тока между отдельными электрогенерирующими элементами погрешность расчетов потери электрической мощности многоэлементной ЭГС увеличиваются с увеличением количества ЭГЭ и уменьшения электрического сопротивления коллектора каждого элемента.

Таблица 3

Результаты расчетов токов утечки многоэлементной ЭГС с помощью метода, применяемого для одноэлементной ЭГС

N	Характеристики ЭГС и их значения	$I_{ут}, A(изм)$	Шунтируемый параметр	$I_{ш}, A$	Измеряемая величина R, Ом		R _{общ} , Ом	$I_{ут}, A(рассч)$
1	U=4,5В, n _{эл} =3, R _н =100М, I _н =0,45А, R ^э _{мкУ} =10кОм, R ^э _{мкУ} =10кОм, R _{кп} =50кОм, R _ш =100М	0,24 · 10 ⁻³	R ^э _{мкУ}	0,6 · 10 ⁻³	R _{общ,кп}	7500	16500	0,27 · 10 ⁻³
2			R _{общ,кп}	0,5 · 10 ⁻³	R ^э _{мкУ}	9000		
3	U=7.5В, n _{эл} =5, R _н =100М, I _н =0,3А, R ^э _{мкУ} =10кОм, R ^э _{мкУ} =10кОм, R _{кп} =50кОм, R _ш =100М	0,4 · 10 ⁻³	R ^э _{мкУ}	1,2 · 10 ⁻³	R _{общ,кп}	6250	13750	0,5 · 10 ⁻³
4			R _{общ,кп}	1 · 10 ⁻³	R ^э _{мкУ}	7500		
5	U=4.5В, n _{эл} =3, R _н =100М, I _н =0,3А, R ^э _{мкУ} =10кОм, R ^э _{мкУ} =10кОм, R _{кп} =10кОм, R _ш =100М	0,27 · 10 ⁻³	R ^э _{мкУ}	1,3 · 10 ⁻³	R _{общ,кп}	3462	8462	0,53 · 10 ⁻³
6			R _{общ,кп}	0,9 · 10 ⁻³	R ^э _{мкУ}	5000		

Выводы

Выполнен выбор и обоснование способа контроля и диагностики электроизоляционных характеристик изоляции для стабилизации генерируемой электрической мощности электрогенерирующих элементов и сборок.

Разработана эквивалентная электрической модель и электрическая схема для контроля электрической изоляции во время проведения реакторных испытаний.

С помощью программы «multisim» проведена экспериментальная проверка способа измерений и расчетов на одно и многоэлементной сборках. Показано хорошее соответствие измеряемых и расчетных значений токов утечки для одноэлементных ЭГС. Для многоэлементных ЭГС погрешность расчетов потери электрической мощности многоэлементной ЭГС увеличиваются с увеличением количества ЭГЭ и уменьшения электрического сопротивления коллекторного пакета каждого элемента.

На основании разработанного способа целесообразно оформление Методики измерений и расчета сопротивлений изоляции эмиттера и коллекторного пакета, тока утечки и потери выходной мощности для предприятий, проводящих реакторные испытания ЭГС.



Библиографический список

1. Синявский В. В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытательных термоэмиссионных сборок. М: Энергоатомиздат, 2000. 375 с.
2. Машиностроение ядерной техники. Т. IV-25. В 2-х кн. Кн. 2 / Е.О. Адамов, П.В. Андреев, С.А. Антипов и др.; Под общ. ред. Е.О. Адамова. М.: Машиностроение, 2005. 944 с. (Машиностроение. Энциклопедия; ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др.)
3. Птицын В.Э. Современное состояние и перспективы развития метода термоэмиссионного преобразования энергии // Научное приборостроение. 2013. Том 23, № 4. С. 25-39.
4. Ptitsin V.E. Research and development of the thermionic energy conversion method // 26th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC), Chicago, USA, 2013. Chicago: IEEE, 2013. P. 341-345.
5. Корюкин В.А. Изменение свойств электродов термоэмиссионных одноэлементных ЭГК на начальном этапе работы // Атомная энергия. 2000. Том 89, Вып. 1. С. 48-57.
6. Агафонов В.Р., Ярыгин В.И. Ресурсные изменения характеристик термоэмиссионного преобразователя // Атомная энергия. 2000. Том 89, Вып. 1. С. 57-67.
7. Бабушкин, Ю.В., Зимин В. П. Методы расчета вольт-амперных характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих сборок // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 2. С. 135-139.
8. Патент 2127467С1 Российская Федерация, МПК H01J45/00. Способ определения электрической прочности коллекторной изоляции термоэмиссионной сборки при реакторных испытаниях // Синявский В. В. заявитель и патентообладатель Акционерное Общество Открытого Типа Корпорация им. С.П. Королева" 97120137/09, заявлено 1997-12-05; опубликовано 1999-03-10.
9. Патент 2465678С1 Российская Федерация, МПК H01J45/00. Электрогенерирующий канал термоэмиссионного реактора-преобразователя // Выбыванец В. И., Карагозин Р. М., Цецхладзе Д. Л. Федеральное Государственное Унитарное Предприятие Научно-Производственное Объединение «Луч», 2011123350/07, 2011-06-08, заявлено 2011-06-08; опубликовано 2012-10-27.
10. Гонтарь А.С. Усовершенствованный одноэлементный электрогенерирующий канал для термоэмиссионных ЯЭУ повышенной мощности // Международная конференция «Ядерная энергетика в космосе - 2005». М. – Подольск: АО «НИКИЭТ», 2005. С. 279-283.
11. Патент 2597875С1 Российская Федерация, МПК H01J45/00. Многоэлементный электрогенерирующий канал термоэмиссионного реактора-преобразователя // Выбыванец В. И., Гонтарь А. С., Колесников Е. Г. и др. Федеральное Государственное Унитарное Предприятие Научно-Производственное Объединение «Луч», 2015111978/07, 2015-04-02, заявлено 2015-04-02; опубликовано 2016-09-20.



УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕР ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ АО «БОГОСЛОВСКОЕ РУДОУПРАВЛЕНИЕ»

Ершова А.И.

Технический Университет УГМК, г. Верхняя Пышма

Аннотация

В условиях рыночной экономики крупные промышленные потребители электроэнергии, в частности, горнодобывающие предприятия, заинтересованы в обеспечении недорогого и надежного энергоснабжения своих производственных мощностей. Это условие позволяет сохранить конкурентоспособность продукции на рынке. Предприятия горнодобывающей промышленности, характеризуются высокой зависимостью размеров прибыли от затрат на электроэнергию. Поэтому, в условиях проводимой правительством реформы электроэнергетики, остро обозначилась проблема оптимального и эффективного управления процессом энергоснабжения крупных предприятий. Актуальность темы исследования заключается в том, что решение проблем в рамках оптимального управления энергоснабжением позволяет принимать наиболее эффективные решения в энергетической политике предприятия. Изменения, происходящие в электроэнергетической отрасли РФ, привели к необходимости исследования таких проблем, как создание стратегии поведения субъекта в рыночных условиях и построение адекватных моделей прогноза уровня цен на оптовом рынке электроэнергии.

Ключевые слова: модель прогнозирования потребления электроэнергии, энергосбережение, снижение издержек на электрическую энергию, график потребления электроэнергии, снижение величины мощности, энергопотребитель.

THE RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A PACKAGE OF MEASURES TO INCREASE THE EFFICIENCY OF ELECTRICITY CONSUMPTION MANAGEMENT OF BOGOSLOVSKOE MINE ADMINISTRATION JSC

A. Ershova

TU UMMC, Verkhnyaya Pyshma

Abstract

In a market economy, large industrial consumers of electricity, in particular mining enterprises, are interested in providing inexpensive and reliable energy supply to their production facilities. This condition allows you to maintain the competitiveness of products in the market. Mining enterprises are characterized by a high dependence of profit margins on electricity costs. Therefore, under the conditions of the reform of the electric power industry being carried out by the government, the problem of optimal and efficient management of the process of energy supply to large enterprises has become acute. The relevance of the research topic lies in the fact that solving problems within the framework of optimal energy supply management allows you to make the most effective decisions in the energy policy of the enterprise. The changes taking place in the electric power industry of the Russian Federation have led to the need to study such problems as creating a strategy for the subject's behavior in market conditions and building adequate models for forecasting the price level in the wholesale electricity market.

Keywords: electricity consumption forecasting model, energy saving, reduction of electricity costs, electricity consumption schedule, power reduction, energy consumer.



Введение

Объектом исследования является АО «Богословское рудоуправление» (АО «БРУ») – крупное горнорудное предприятие с подземной добычей руды, основано на разработке железорудных месторождений Северного Урала. Разведка и добыча железной руды была начата в шестидесятых годах восемнадцатого века.

Основными видами продукции АО «БРУ» являются железорудный концентрат, руда железно-медисто магнетитовая и строительный щебень.

Данная работа содержит анализ существующего состояния электрохозяйства АО «БРУ», включая системы учета энергоресурсов и методы управления режимами потребления электроэнергии, разработку мероприятий по повышению точности планирования потребления электрической энергии АО «БРУ» в условиях работы на оптовом рынке электрической энергии и мощности, и предложений по управлению графиком потребления электрической энергии. Предметом исследования являются принципы, способы и инструменты, способствующие повышению эффективности управления процессом энергоснабжения на крупных горно-металлургических предприятиях.

Цель данной научной работы — снижение издержек на электрическую энергию путем внедрения мероприятий по повышению качества планирования и управлению графиком потребления электрической энергии.

Достижение цели потребовало постановки и решения следующих задач:

1. Разработка мероприятий по повышению точности планирования потребления электрической энергии АО «БРУ» в условиях работы на оптовом рынке электрической энергии и мощности;

2. Разработка предложений по управлению графиком потребления электрической энергии с целью снижения величины оплачиваемой мощности на оптовом рынке и величины сетевой мощности, а также повышения эффективности участия АО «БРУ» в проекте «Управление спросом» (ценозависимое потребление);

3. Обоснование внедрения автоматизированной системы технического учёта энергоресурсов (АСТУЭ) для повышения качества планирования и управления графиком потребления электрической энергии.

Материалы и методы (Materials and Methods)

В ходе работы был проведён анализ существующего состояния электрохозяйства АО «БРУ», включая системы учета энергоресурсов и методы управления режимами потребления электроэнергии.

Был проведён энергетический анализ предприятия, в том числе показателей, характеризующих график потребления электрической энергии.

По результатам анализа выявлено, что доля потребления электрической энергии от потребления всех видов топливно-энергетических ресурсов предприятия составляет 45% (рис. 1). 36% потребления электрической энергии предприятием приходится на подразделение – шахта «Северопесчанская». Сформирован перечень значимых энергопотребителей предприятия (табл. 1).

В условиях рыночной экономики, при существовании сложной системы взаимоотношений в сфере производства, распределения и потребления электрической энергии, моделирование и прогнозирование потребления электроэнергии и мощности становится сложной задачей как на краткосрочном, так и на долгосрочном периоде, когда на первый план выходит влияние переменных рыночных факторов.

Прогнозирование потребления электроэнергии и мощности отдельными участниками оптового рынка электроэнергии и мощности важно не только для всей энергосистемы в целом, но и для отдельного предприятия, и даже для его цехов и участков.



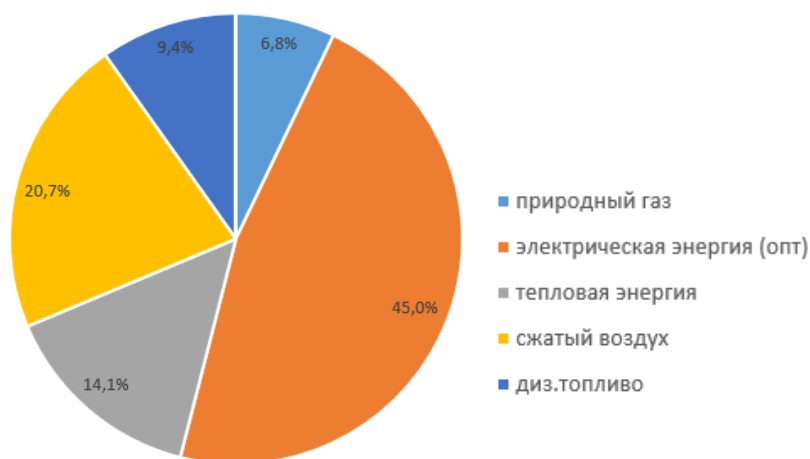


Рис. 1. Доля значимых видов топливно-энергетических ресурсов на АО «БРУ»

Таблица 1

Перечень значимых энергопотребителей АО «БРУ»

Наименование потребителя	Напряжение	Количество	Номинальная мощность, кВт
Шахта «Северопесчанская»			
Насосы главного шахтного водоотлива	6 кВ	3	2 000
Подъемная шахтная машина "Юг" (2 двиг.)	6 кВ	1	800
Подъемная шахтная машина "Север"	6 кВ	1	1 000
Подъемная шахтная машина "Запад" (2 двиг.)	6 кВ	1	1 440
Подъемная шахтная машина "Восток" (2 двиг.)	6 кВ	1	1 440
Подъемная шахтная машина №3	6 кВ	1	1 250
Дробильно-обогащительная фабрика			
Дробилки 1-й очереди	6 кВ	3	315
Дробилки 2-й очереди	6 кВ	3	250
Энергоцех			
Турбокомпрессора	6 кВ	5	1 500
Вентиляторы ВОКД 3,6 №1	6 кВ	4	1 500

Формирование универсального аппарата моделирования и прогнозирования электропотребления и мощности позволит сократить расходы на оплату электроэнергии при покупке ее на оптовом рынке электроэнергии и мощности, качественно определить влияние различных технологических условий и факторов производства на электропотребление или мощность нагрузки, выбрать наиболее эффективные стратегии энергосбережения и направления мероприятий по экономии электрической энергии [8].

В результате работы предстоит разработать интеллектуальную модель прогнозирования потребления электроэнергии при добыче горной массы шахтой «Северопесчанская».

К техническим и организационным мероприятиям по снижению издержек на электрическую энергию относится, в первую очередь, система организации учета расхода электрической энергии, дающая информацию о её параметрах.

Эта информация используется для расчетов предприятия с энергоснабжающей организацией; контроля учтенного расхода электроэнергии и оценки его соответствия фактическому; оперативного управления потреблением электроэнергии; разработки различных обоснованных норм расхода электроэнергии; составления электробалансов



как предприятия в целом, так и его отдельных участков; планирования и прогнозирования параметров электропотребления как предприятия в целом, так и его подразделений. На ее основе можно разработать систему мер поощрения или наказания за экономленную или перерасходованную электрическую энергию [8].

Как показывает мировая практика, установка современных приборов учёта, позволяет сократить расход электрической энергии на 3-5%. Экономия достигается за счёт повышения достоверности информации об объёмах потребления электроэнергии, оперативного управления процессом электропотребления и снижением потерь [9].

На данный момент предприятие оснащено 118 точками технического учёта электрической энергии. На подразделение шахта «Северопесчанская», которое является главным потребителем электрической энергии, приходится 55 точек.

Степень оснащённости предприятия приборами учёта составляет 61%.

На основании проведённого анализа оснащённости, сформирован список планируемых к установке новых точек учёта.

Результаты

На основании сбора данных с технических узлов учёта за последние 10 лет, планируется создание интеллектуальной модели прогнозирования потребления электроэнергии при добыче горной массы шахтой «Северопесчанская», в зависимости от плановых производственных показателей, методом искусственных нейронных сетей в программном комплексе Python.

Сформирован перечень точек учёта электрической энергии. Проработаны организационно-технические мероприятия по управлению энергетической эффективностью АО «БРУ», с использованием АСТУЭ. Выявлено, что степень оснащённости подразделений приборами учёта составляет 61%.

Проанализирована возможность изменения (смещения по времени) потребляемой мощности объектами энергопотребления предприятия. Сформирован перечень энергопринимающих устройств, с учетом планируемого снижения потребления электроэнергии за счёт снижения величины мощности и разработана методика определения объёмов услуг по изменению нагрузки.

Выводы

1. В ходе проведенного исследования разработан вариант модели долгосрочного прогнозирования потребления электроэнергии и мощности АО «БРУ», на основе искусственных нейронных сетей, генетического алгоритма и метода конфигурации связей нейронной сети, согласно действующей технологии производства и системы электропитания предприятия. Модель, сформированная на базе данных по потреблению электрической энергии предприятием, в период с 2022 по 2023 год, в программном обеспечении Python, дала высокую точность. Погрешность составила менее 3%, при требуемой на предприятии – 5%. Отсюда следует, что решение актуальной задачи повышения точности прогнозирования электропотребления и мощности на долгосрочный период, имеющей существенное значение для повышения эффективности эксплуатации системы электропитания АО «БРУ», возможно путём доработки модели, при этом необходимо уточнение значимых факторов, влияющих на потребление электрической энергии.

2. Необходима разработка методики определения объёмов снижения потребления электроэнергии, с использованием графика базовой нагрузки, с целью снижения величины оплачиваемой мощности на оптовом рынке и величины сетевой мощности.



Библиографический список

1. Шакалов С.Н. Повышение эффективности управления процессом энергоснабжения на крупных горно-металлургических предприятиях: дис.... канд. экон. наук: 08.00.05. Орел: ОГТУ, 2007. 151 с.
2. Постановление Правительства РФ от 27.12.2010 г. № 1172 «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности» (с изменениями на 8 июня 2023 года).
3. Разработка мероприятий по повышению эффективности работы систем электроснабжения / В.В. Ярошевич, А.С. Карпов, А.В. Бурцев, Г.П. Фастий // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. № 8-15 (8). С. 36-40.
4. Постановление Правительства РФ от 11 июля 2001 г. № 526 «О реформировании электроэнергетики Российской Федерации» (с изм. от 1 февраля 2005 г., 20 марта 2013 г.).
5. Федеральный закон от 26 марта 2003 г. N 35-ФЗ «Об электроэнергетике» (с изменениями на 13 июня 2023 года).
6. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Краткосрочное прогнозирование электрических нагрузок с использованием искусственных нейронных сетей // Электричество. 1999. № 10. С. 14-15.
7. Жуков Д.М. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий путем оптимизации прогнозирования потребления электроэнергии: дис.... канд. техн. наук: 05.09.03. Липецк: ЛГТУ, 2007. 151 с.
8. Политов Е.А. Построение моделей долгосрочного прогноза потребления электроэнергии и мощности промышленными предприятиями: дис.... канд. техн. наук: 05.09.03. Кемерово: КузГТУ, 2012. 147 с.
9. Озеров Е.А. Организация учета и измерения расхода электрической энергии в распределительных и цеховых сетях промышленных предприятий: дис.... канд. техн. наук: 05.09.03. М.: МЭИ, 1999. 141 с.



УДК 621.438

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЭРОЗИИ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ПО СДВИГУ ХАРАКТЕРИСТИК

Жуков И.С., Блинов В.Л.

Научный руководитель: к-т техн. наук, доц. Блинов В.Л.

УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Аннотация

Газотурбинные установки являются одним из основных типов силовых установок в современной энергетике, судостроении, авиации, газовой промышленности. Широкий спектр применения таких двигателей подразумевает их работу в самых разных условиях, что требует высокую эксплуатационную надёжность агрегатов. Уменьшение показателей напорной характеристики компрессора, а также его КПД говорит о наличии эрозионного износа его лопаточного аппарата. Анализ этих характеристик даёт возможность оценить техническое состояние компрессора в условиях эксплуатации, его остаточный ресурс, а также спрогнозировать недопустимые состояния ГТД.

Ключевые слова: Компрессор ГТД, эрозионный износ, напорная характеристика, КПД осевого компрессора, наработка, запылённая атмосфера, пылевая эрозия.

DETERMINATION OF THE DEGREE OF EROSION OF AN AXIAL COMPRESSOR BLADES BY CHARACTERISTICS SHIFTS

Ivan Zhukov, Blinov Vitaly

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg

Abstract

Gas turbine plants are one of the main types of power plants in modern energy, shipbuilding, aviation, and the gas industry. A wide range of applications of such engines implies their operation in a variety of conditions, which requires high operational reliability of the units. A decrease in the pressure characteristics of the compressor, as well as its efficiency, indicates the presence of erosive wear of its blade apparatus. The analysis of these characteristics makes it possible to assess the technical condition of the compressor under operating conditions, its residual life, and also to predict unacceptable states of the gas turbine engine.

Keywords: GTE compressor, erosive wear, head characteristic, axial compressor efficiency, running time, dusty atmosphere, dust erosion.

Введение

От работы компрессора зависит работа всей энергетической установки. Прогнозирование состояния работы ОК позволяет своевременно производить техническое обслуживание и ремонт, при его необходимости. Оценка технического состояния по средствам изменения эксплуатационных характеристик компрессора позволяет оценить степень эрозии лопаточного аппарата, что даёт возможность разработки методов борьбы и диагностики эрозионного износа с целью защиты газотурбинного двигателя.

Для малой авиации, работающей в неблагоприятных условиях, вопрос пылевой эрозии очень актуален, в особенности для вертолётов, так как порой их задачей явля-



ется долгое зависание над землёй в одном месте, зачастую в облаке пыли, поднятом при взлёте ими же самими. Кроме авиации, стационарные наземные установки тоже испытывают влияние пылевой эрозии. Связано это с географическим расположением: вблизи производственных объектов и предприятий, заводов, где происходят выбросы мелкодисперсных сред в атмосферу, вблизи строящихся объектов, где также длительное время в воздухе находится взвесь из пыли, песка, извести и т.д.

Длительная работа двигателей в таких условиях требует от них высоких эксплуатационных характеристик и долгих лет работы без каких-либо сбоев, что сигнализирует о потребности в определении технического состояния лопаток и их остаточного ресурса работы для прогноза ремонтных работ.

Эрозия влечёт за собой ряд неблагоприятных последствий, сильно влияющих на работу компрессора и, как следствие, всего двигателя, таких как:

- отложение пыли в проточной части;
- ухудшение газо- и термодинамических свойств двигателя;
- рост риска разрушения рабочих лопаток;
- снижение коэффициента полезного действия вследствие износа лопаток;
- разрушения лопаток и проточной части абразивными свойствами мелкодисперсной пыли, попадающей в проточную часть;

В работе [1] разрабатывается методика оценки влияния пылевой эрозии рабочих лопаток на газодинамические характеристики компрессора путём газодинамического моделирования и анализа изменения характеристик компрессора.

В работе [2] путём CFD моделирования были проведены исследования влияния абразивных свойств пыли на лопатки с разными противозерозионными покрытиями, а также был получен режим работы компрессора при максимальном состоянии эрозионного износа.

Результатом работы [3] является анализ научных статей на тему влияния эрозионного износа лопаточного аппарата газодинамические характеристики осевого турбовального компрессора и математическое моделирование ступеней компрессора. Отмечается, что, учитывая нелинейность эрозионного износа при моделировании позволит повысить детализированность и точность течения в компрессоре на 5-10%.

В научном труде [4] авторами разработана система имитационного моделирования, позволяющая рассчитывать характеристики осевых компрессоров с учётом эрозионного износа лопаток.

В работе [5] с помощью методов машинного обучения выявлена зависимость, описывающая связь между степенью эрозии и параметрами работы ступени с точностью в 69%.

Согласно данным [6-8] досрочное снятие с эксплуатации ГТД вызвано в большинстве случаев (40%) именно эрозионным износом. В некоторых случаях прекращение работы происходит после 50-100 часов непрерывной эксплуатации в условиях сильно запылённой атмосферы.

В работе [9] рассматривается и экономический аспект влияния эрозии на лопаточные аппараты. Возрастает необходимость увеличения операционных расходов и стоимость последующего сервисного обслуживания.

Данная статья посвящена получению зависимости для определения эрозионного износа лопаточного аппарата осевого компрессора по изменению его характеристик, а именно, напорной характеристики и КПД в процессе эксплуатации ГТД в условиях сильно запылённой атмосферы.

Объектом исследования является двенадцатиступенчатый осевой компрессор вертолётного двигателя [1, 5].



Материалы и методы

Для достижения цели в качестве исходных данных были использованы зависимости напорной характеристики компрессора и его КПД от времени наработки в условиях запылённой атмосферы, представленные в работе [1].

Данные графики были полностью оцифрованы и построены в электронных таблицах с целью получения уравнений, описывающих каждую из кривых. Важно отметить, что на данном этапе уже появляется некоторая погрешность оцифровки, которая составила 2-5 пикселя при наложении точек и получении сплайнов. В результате оцифровки были получены уравнения полиномов, достаточно точно описывающих эти кривые, так как среднеквадратичное отклонение в среднем составляло $R^2 = 0,99$.

Уравнения представляют собой полиномы различной степени:

$$X = aG^6 + bG^5 + cG^4 + dG^3 + eG^2 + fG + g,$$

где X – искомая величина, напорная характеристика или КПД ОК; G – известное значение расхода; a, b, c, d, e, f, g – эмпирические коэффициенты.

Для удобства было принято решение составить таблицу выбора коэффициентов для быстрого построения новых зависимостей с помощью этих уравнений, новые полученные семейства кривых, представлены на рис. 1, 2.

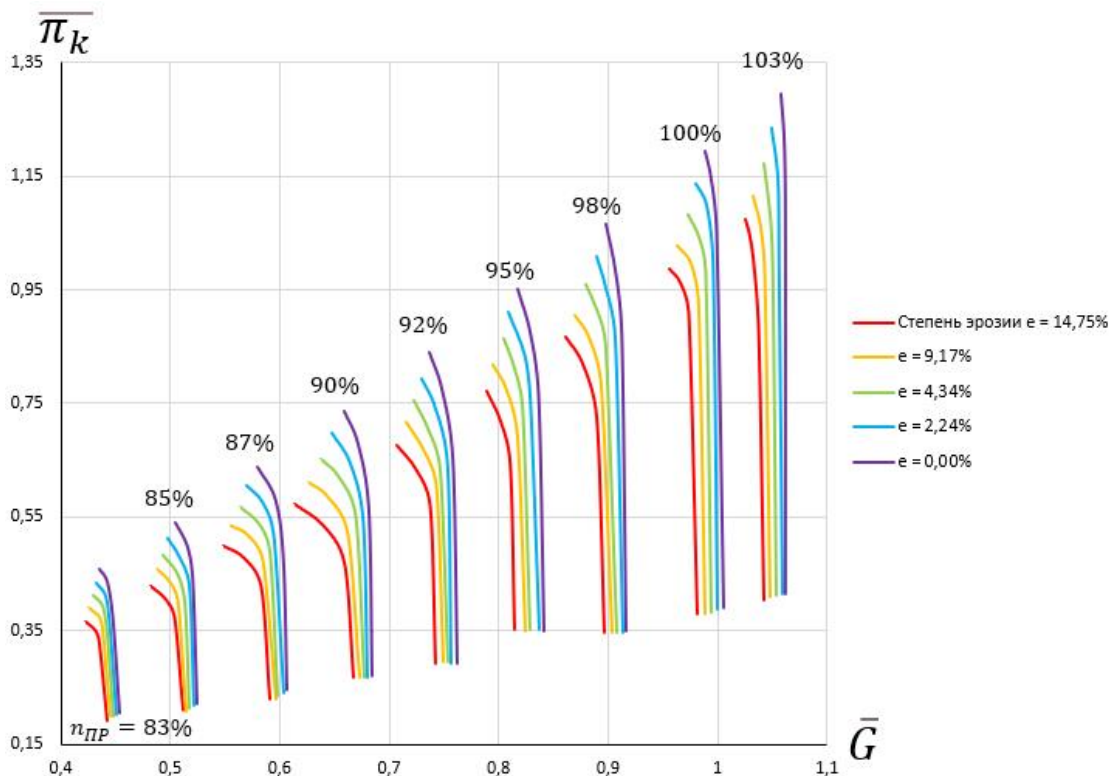


Рис. 1. Оцифрованная зависимость напорной характеристики от времени наработки

При описании этих зависимостей, видно, что эрозионный износ для данного ОК приводит к характерному сдвигу характеристик, что также может использоваться при исследовании эрозионного износа.

Данные зависимости представлены в относительных величинах, сделано это для автоматизации задачи. Переход осуществляется путём деления текущего значения параметра на номинальное, которое взято на линии рабочих режимов при частоте вращения 100% и наработке 0 часов [1].



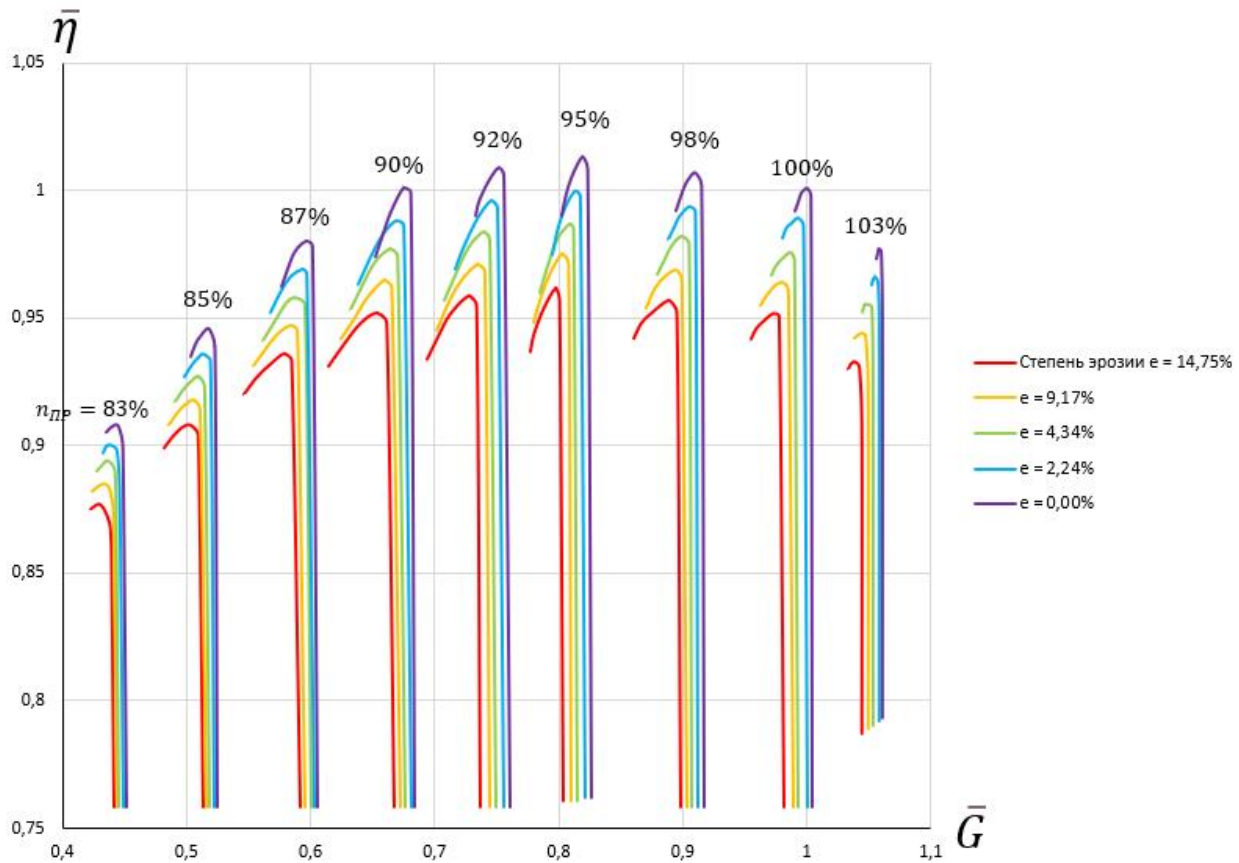


Рис. 2. Оцифрованная зависимость КПД компрессора от времени наработки

Причина перехода к относительным величинам состоит в том, чтобы данную методику определения степени эрозии можно было применять к любым осевым компрессорам, задаваясь лишь номинальными параметрами каждого из них.

Для связи этих параметров возникла необходимость в построении трёхмерных зависимостей, чтобы получить поверхности, а затем уравнения, описывающие взаимосвязь между степенью эрозии и параметрами работы компрессора: частотой вращения, временем наработки, относительным расходом, относительной напорной характеристикой, относительным КПД.

Результаты

В результате было построено семейство трёхмерных поверхностей для получения зависимости, связывающую расход, напорную характеристику и степень эрозии. Пример одной из поверхностей показан на рис. 3.

Аналогично построив зависимости для всех остальных частот в (103, 100, 98, 95, 92, 90, 87, 85) % и обработав их через математический аппарат, было получено общее уравнение, описывающее каждую из поверхностей с точностью аппроксимации $R^2 > 0,97$, вида (2):

$$\bar{\pi}_k = a + b \cdot e + c \cdot \bar{G} + d \cdot e^2 + k \cdot (\bar{G})^2 + f \cdot e \cdot \bar{G} + g \cdot e^3 + h \cdot (\bar{G})^3 + i \cdot e \cdot (\bar{G})^2 + j \cdot e^2 \cdot \bar{G}$$

где: $a, b, c, d, k, f, g, h, i, j$ – эмпирические коэффициенты; $\bar{\pi}_k$ – напорная характеристика в относительных единицах; \bar{G} – расход в относительных единицах; e – степень эрозии, %.



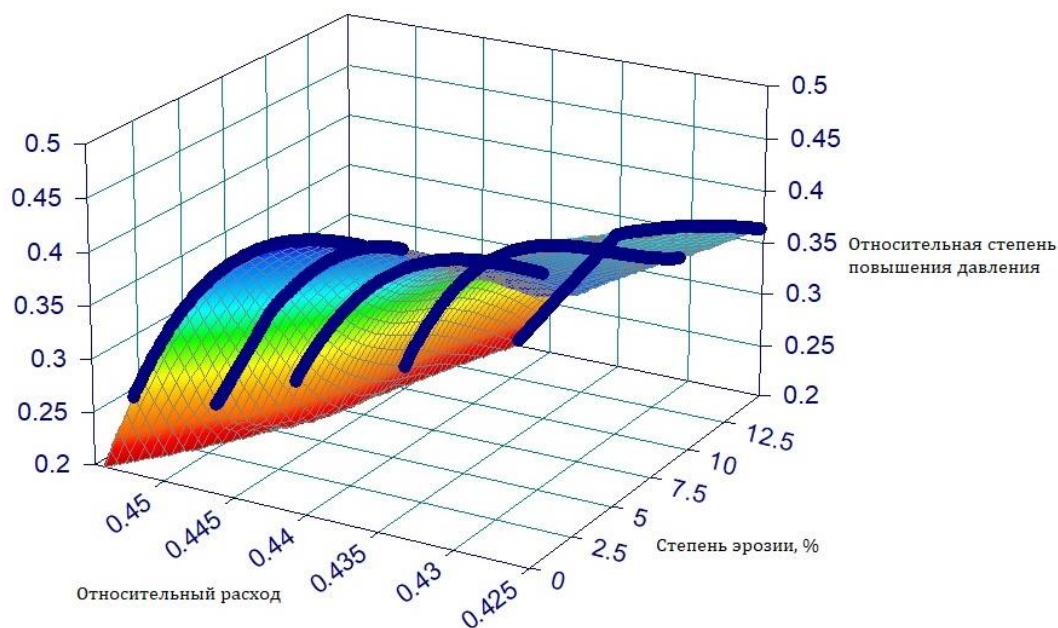


Рис. 3. Трёхмерная зависимость напорной характеристики от степени эрозии и расхода при частоте вращения 83%

Обсуждение

Анализируя данные по другим компрессорам, можно собрать значения коэффициентов из данного уравнения и проанализировать влияние конструкции компрессора на значение коэффициента.

Для этого необходимо построить зависимости каждого эмпирического коэффициента от частоты вращения и получить уравнения этих зависимостей.

Для исследуемого в данной статье компрессора, уравнения эмпирических коэффициентов представляют собой уравнения квадратной параболы, вида:

$$N = K_1 x^2 + K_2 x + K_3;$$

где K_1, K_2, K_3 – соответствующий эмпирический коэффициент; x – частота вращения;

Проделав эту операцию для каждого коэффициента, были получены данные, пример которых приведён в табл. 1.

Таблица 1

Данные для определения эмпирического коэффициента для конкретной частоты вращения

Эмпирические коэффициенты	K_1	K_2	K_3
<i>a</i>	-2031,742409	369339,571426	-16715263,905694
<i>b</i>	5,909873	-1078,101982	48942,593389
<i>c</i>	5821,593222	-1058701,749843	47922378,304165
<i>d</i>	-0,009626	1,749944	-79,224589
<i>k</i>	-5538,718426	1007051,752341	-45558921,207578
<i>f</i>	-11,286848	2060,502209	-93578,376310
<i>g</i>	0,000007	-0,001282	0,057832
<i>h</i>	1728,462680	-313704,016098	14157431,693791
<i>i</i>	5,366670	-979,667096	44466,237313
<i>j</i>	0,009208	-1,676637	76,025643

Аналогично проводя эти действия для каждого исследуемого компрессора, может быть получена база данных для каждой из характеристик.

Такой подход даёт возможность оценки влияния эрозии на конкретный компрессор, а также классификации уровня и глубины эрозии [5], что в дальнейшем может быть использовано для создания математического аппарата для описания эрозионного износа лопаточного аппарата ГТД и ГТУ, а также создания базы данных для машинного обучения и создания цифровых двойников.

Кроме приведённого примера аналогично можно вывести зависимости и для других параметров, что позволит расширить возможность оценки эрозии лопаточного аппарата компрессора [5].

Выводы

Полученная в ходе исследования зависимость, даёт хорошую точность аппроксимации в диапазоне рабочих режимов компрессора, что говорит о том, что данная методика анализа и изучения эрозионного износа эффективна и может быть применима.

Практическая значимость данной методики заключается в том, чтобы, исследуя один ОК, можно было получить зависимости и применять их для других компрессоров. Для этого необходимо получить базу данных для эмпирических коэффициентов в найденной зависимости.

В дальнейшем планируется перейти на анализ величины сдвига характеристик в относительном виде и его взаимосвязи со степенью эрозии для различных конструкций ОК.

Библиографический список

1. Двирник Я.В., Павленко Д.В. Предельное состояние осевого компрессора ГТД, эксплуатируемого в условиях запылённой атмосферы // Системи озброєння і військова техніка. 2018. № 1(53). С. 97-107.
2. Гумеров А.В., Акмалетдинов Р.Г. Моделирование эрозионного износа лопатки компрессора // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3(27). С. 223-239.
3. Потапов В.А., Санько А.А. Моделирование характеристик многоступенчатого осевого компрессора турбовального газотурбинного двигателя с учётом нелинейности эрозионного износа его лопаток // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Том 23, № 05. С. 39-52.
4. Разработка метода параметрической диагностики состояния лопаток в ГТД и ГТУ с использованием имитационного моделирования / И.А. Кривошеев, К.Е. Рожков, М.А. Соболев и др. // Нефтегазовое дело. 2012. № 5. С. 375-383.
5. Блинов В.Л., Дерябин Г.А., Зубков И.С. Классификация уровня эрозии проточной части изолированной ступени осевого компрессора // Энергетические системы. 2022. №1. С. 8-18.
6. Р. Курц и К. Брун. Degradation of gas turbine performance in natural gas service // J. Nat. Gas Sci. Eng. 1 (3), 95–102 (2009).
7. Meher-Homji S., Bromley A.F., Stalder J.P. Gas turbine degradation and compressor flushing // 2nd Middle East Turbomachinery Symposium. Doha, 2013. P. 1–43.
8. Шпилев К.М. Эксплуатация авиации в горно-пустынной местности. М.: Воен. изд., 1991. 223 с.
9. Исследования эрозионного износа лопаточного аппарата осевых турбокомпрессоров (обзор) / В. Л. Блинов, И. С. Зубков, С. В. Богданец и др. // Теплоэнергетика. 2023. Том 70, № 6. С. 41-55.



УДК 621.311

ФОРМИРОВАНИЕ ОБОБЩЁННОЙ СХЕМЫ ПОТЕРЬ И ИХ РАСЧЁТ НА ПРИМЕРЕ АО «СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ»

Калашников В.И.

Научный руководитель: д-р техн. наук, проф. Гильфанов К.Х.

ФГБОУ ВО КГЭУ, г. Казань

Аннотация

Электрическая энергия является единственным видом продукции, для транспортировки которой от мест производства до мест потребления не используются другие ресурсы, для этого расходуется часть самой передаваемой электроэнергии, поэтому потери электрической энергии при её передаче неизбежны, но необходимо определить их экономически обоснованное значение. Потери электроэнергии появляются при передаче электроэнергии в любой части электросети. Для исследования элементов электрических потерь на всех участках сети и проведения мероприятий, направленных на снижение потерь электроэнергии, производится мониторинг структуры потерь. Термин «потери» используется не только в электроэнергетике, его можно найти в любом процессе, будь то производство, оказание услуг различного характера, здравоохранение и так далее. Для того что бы устранить данные потери, необходимо уметь их распознавать и знать способы борьбы с ними. В данной статье раскрывается вопрос потерь электроэнергии, виды и причины потерь. Проведен анализ фактических потерь электроэнергии в электрических сетях АО «Сетевая компания» с 2015 по 2020 год.

Ключевые слова: потери, потери электроэнергии, фактические потери, технологические потери, коммерческие потери, анализ потерь.

FORMATION OF A SIMPLIFIED SCHEME OF LOSSES AND THEIR CALCULATION ON THE EXAMPLE OF "GRID COMPANY"

Kalashnikov Valentin

Kazan State Power Engineering University, Kazan

Abstract

Electric energy is the only type of product for which no other resources are used to transport it from the places of production to the places of consumption, part of the transmitted electricity itself is consumed for this, therefore, losses of electrical energy during its transmission are inevitable, but it is necessary to determine their economically justified value. Electricity losses occur during the transmission of electricity in any part of the electric grid. To study the elements of electrical losses in all sections of the network and to carry out measures aimed at reducing electricity losses, the structure of losses is monitored. The term "losses" is used not only in the electric power industry, it can be found in any process, be it production, provision of various services, healthcare, and so on. In order to eliminate these losses, it is necessary to be able to recognize them and know how to deal with them. This article reveals the issue of electricity losses, types and causes of losses. The analysis of the actual losses of electricity in the electric networks of Grid Company from 2015 to 2020 was carried out.

Keywords: losses, power losses, actual losses, technological losses, commercial losses, loss analysis.



Введение

Актуальность работы состоит в том, что анализ потерь электроэнергии востребован и имеет высокую практическую значимость, поскольку вопрос рационального расхода в настоящий момент очень важен. Одним из глобальных направлений, является организация энергосбережения и энергоэффективности – задача чрезвычайно сложная. Данные термины из популярного лозунга постепенно превращаются в насущную необходимость. Истощение полезных ископаемых таких как, природный газ, а также глобальная борьба с выбросами парниковых газов диктуют необходимость кардинального изменения отношения к энергопотреблению, не только в России, но и во всем мире. Цель данной статьи рассмотреть виды потерь, их природу, сформировать обобщенную схему потерь и рассчитать их на примере АО «Сетевая компания»

1. Потери электрической энергии. Виды и причины

1.1. Фактические потери электроэнергии

Вопрос потерь электрической энергии волновал ученых на протяжении многих лет. Поднимались темы анализа, методов расчета, мероприятий по снижению потерь и так далее. Однако перед предложением путей снижения потерь электроэнергии, необходимо разобраться в причинах их возникновения и разделить их по видам. Для решения первой задачи мы обратились к книге Юрия Станиславовича Железко «Расчёт и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях».

Фактические (или отчетные) потери вычисляются по формуле разности электроэнергии, поступившей к потребителю, и отпущенной в сеть. Эти два значения определяются показаниями счётчиков: учет поступившей электроэнергии идет непосредственно у потребителя, объем отпущенной электроэнергии фиксируется в начале сети (например, по каждому фидеру подстанции).

Из определения отчетных потерь следует, что их величина будет отличаться от фактических значений потерь электроэнергии в элементах сети из-за неизбежных погрешностей приборного учета.

Электрическая энергия, поступившая в сеть, определяется в виде разности: отпуск электроэнергии с шин электростанций и расхода электроэнергии на собственные нужды энергосистемы (освещение электростанций, энергоснабжение вспомогательного оборудования, ремонтных площадок и т.д.).

Обобщенно фактические потери характеризуются двумя частями:

- технологические;
- коммерческие.

1.2. Технологические потери электроэнергии

Технологические потери можно разделить на две составляющие:

А. Расход электроэнергии при ее передаче. Они обусловлены физическими процессами, происходящими в оборудовании при передаче энергии по сетям, и выражаются в преобразовании энергии в тепло. Технологические потери можно определить расчетами технических потерь и расходом на собственные нужды подстанций.

Технические потери делятся на следующие компоненты:

– нагрузочные потери, определяют в линиях, силовых трансформаторах, трансформаторах тока, в высокочастотных заградителях связи и токоограничивающих реакторах;

– условно-постоянные потери холостого хода вычисляются в силовых трансформаторах, компенсирующих устройствах (синхронных компенсаторах, батареях статических конденсаторов, шунтирующих реакторах и т.д.), трансформаторах напряжения и



счетчиках, в устройствах высокочастотной связи, а также в изоляции кабельных линий;

– климатические потери, составляют потери на корону и от токов утечки по изоляторам воздушных линий и подстанций.

Б. Особенностью технологических потерь являются именно физические процессы, происходящие в оборудовании, поэтому к ним мы можем отнести и отрицательную погрешность приборов учета электроэнергии. Их относят к технологическим потерям при реализации. Отсюда и возникает термин «потери недоучета» [1].

1.3. Коммерческие потери

Возникают из – за хищения электроэнергии. Наличие недобросовестных потребителей, определяется несоответствиями между показаниями приборов учета и оплатой и другими причинами контроля учета [2].

Коммерческие потери не подлежат самостоятельному расчету и их можно определить только путем вычитания объема технологических потерь от фактических.

Получается природу возникновения фактических потерь можно определить до двум группам:

- зависят от оборудования, участвующего в процессе передачи и распределения электроэнергии;
- потери, причиной которых является недобросовестный потребитель.

Основным инструментом борьбы с коммерческими потерями в Республике Татарстан является перенос приборов учета электроэнергии за домовую территорию на границу балансовой принадлежности и онлайн доступ к показаниям, что обеспечивает интеллектуальные системы учета.

Четкий контроль отданной в сеть электроэнергии, электроэнергии, использованной потребителем, и расчет технологических потерь дает ясную картину об объеме коммерческих потерь и не оставляет шансов недобросовестному потребителю безнаказанно подключаться к сетям через «серые» схемы.

1.4. Обобщенная схема потерь электроэнергии

Для структурирования всех рассмотренных потерь и более ясного понимания причинно-следственных связей возникновения потерь автором была составлена обобщенная схема фактических потерь. Она представлена на рис. 1.

Существует множество причин возникновения потерь, следовательно, и методы их снижения будут разнообразны. Все авторы по-своему интерпретируют схемы различных видов потерь, что усложняет понимание данной тематики. Поэтому в ходе изучения материала по данной тематике автором была составлена обобщенная схема фактических потерь.

Схема технических потерь и места их возникновения представлены на рис. 2.

2. Расчет и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях АО «Сетевая компания»

Важным показателем эффективности работы сети является уровень ее фактических потерь, и для многих компаний цель снижения отчетных потерь является основополагающей [3]. Поэтому было решено провести анализ потерь именно для крупнейшей компании энергетической отрасли в Республике Татарстан - АО «Сетевая компания».

Для проведения анализа динамики уровня и величины потерь электроэнергии использовались значения из ежегодных отчетов АО «Сетевая компания» за 2015-2020 года [4]. Для более понятного представления была составлена общая таблица значений мощности, поступившей в сеть, и мощности полезного отпуска (табл. 1).



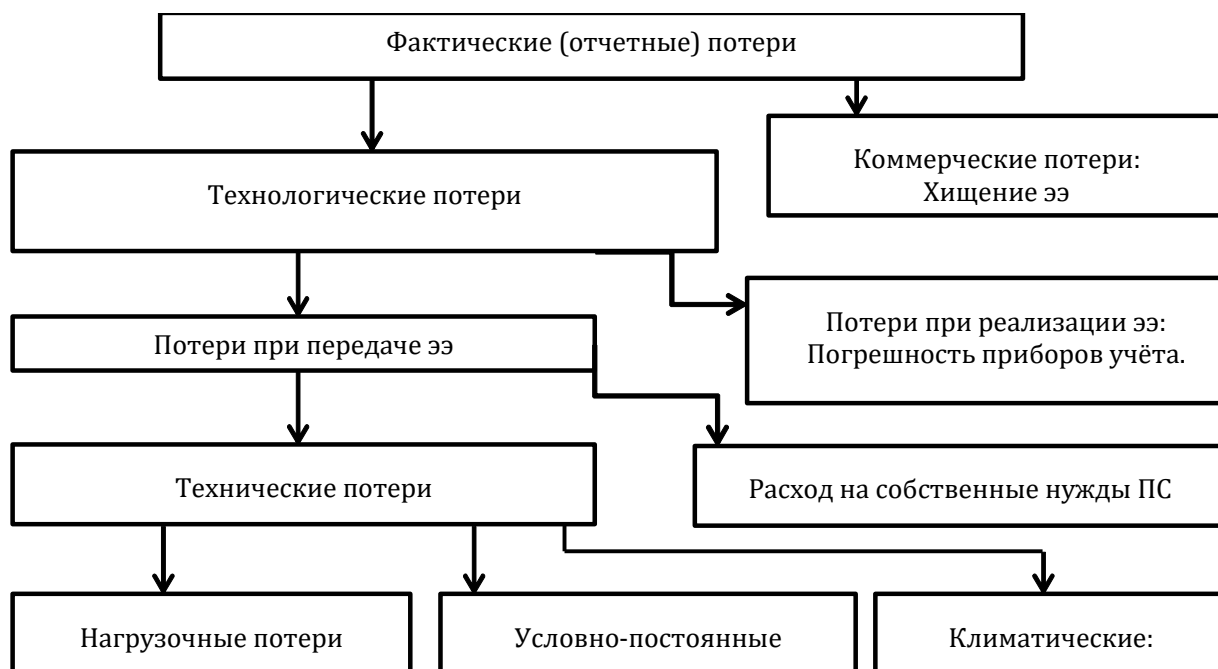


Рис. 1. Схема фактических (отчетных) видов потерь

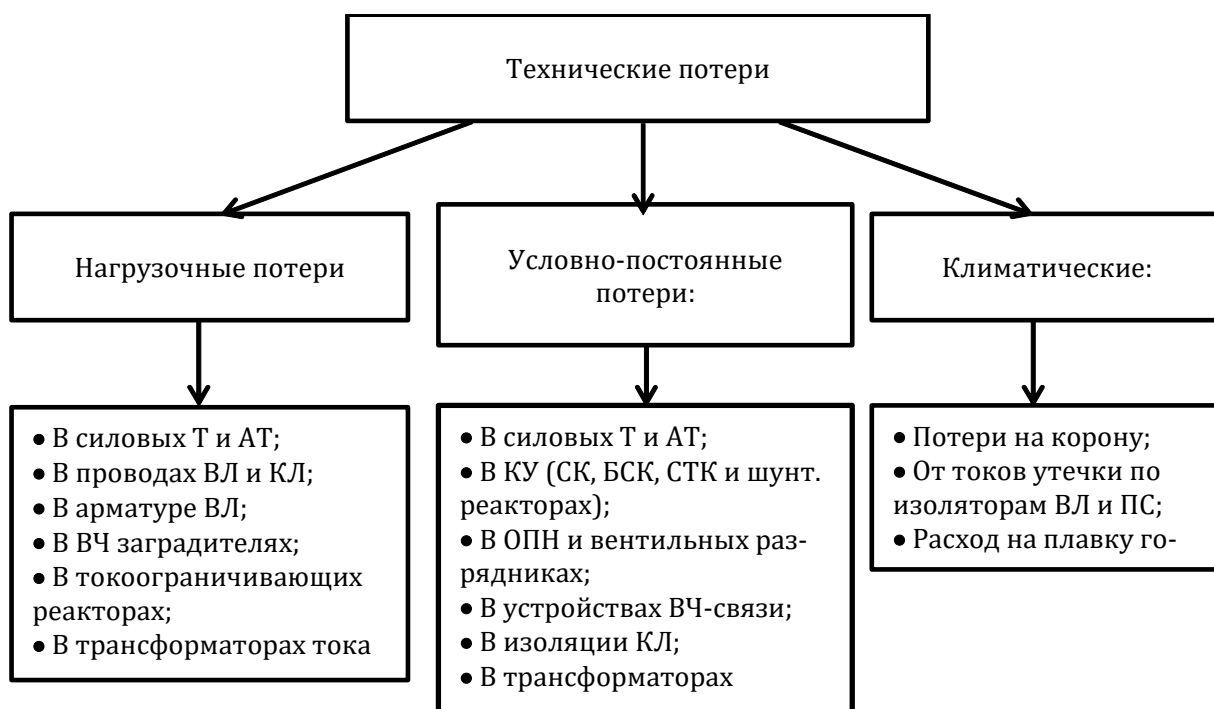


Рис. 2. Схема технических потерь

Таблица 1

Данные годовых отчетов АО «Сетевая компания» по уровню потребления и полезного отпуска мощности за 2015-2020 г.

Год	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Поступившая в сеть мощность $W_{\text{пос}}$ (млн. кВт·час)	20604	21404	22008	22575	22751	21509
Мощность полезного отпуска $W_{\text{по}}$ (млн. кВт·час)	19121	19882	20513	21011	21252	20039



Используя за основу значения этих данных, проведем расчёты величины и уровня потерь в АО «Сетевая компания». Отметим, что в значении млн. кВт·час мы выражаем величину потерь, а в процентом отношении – их уровень [5]:

$$W_{II} = W_{IIOC} - W_{IIO};$$

$$W_{II2015} = 20604 - 19121 = 1483 \text{ млн. кВт·ч};$$

$$W_{II2016} = 21404 - 19882 = 1522 \text{ млн. кВт·ч};$$

$$W_{II2017} = 22008 - 20513 = 1495 \text{ млн. кВт·ч};$$

$$W_{II2018} = 22575 - 21011 = 1564 \text{ млн. кВт·ч};$$

$$W_{II2019} = 22751 - 21252 = 1499 \text{ млн. кВт·ч};$$

$$W_{II2020} = 21509 - 20039 = 1470 \text{ млн. кВт·ч},$$

где W_{IIOC} – мощность, выданная в сеть, млн. кВт·час, W_{IIO} – мощность полезного отпуска, млн. кВт·час.

Переведём полученные данные на числовой график, показывающий величину потерь АО «Сетевая компания» за 2015-2020 г. (рис. 3).



Рис. 3. Потери АО «Сетевая компания», млн. кВт·час

Получился достаточно привлекательный график с красивым ежегодным уменьшением величины потерь, однако обольщаться не стоит. Необходимо смотреть не только величины потерь в сети, но и объем потребления электроэнергии и их динамику.

Количество потребителей в электрическом районе может увеличиваться, что неизбежно приведет к увеличению отпускаемой энергии в сеть, потреблению и соответственно росту потерь. Поэтому более правильным является анализ не только количества потерь, но и процентное отношение количества потерь к отдаваемой энергии в сеть [6]. Оно показывает, какую долю энергии мы теряем ежегодно, еженедельно, а то и ежечасно.

Процентные значения потерь рассчитывались исходя из значений W_{II} и W_{IIOC} [7]

$$W_{\%} = \frac{W_{II} \cdot 100}{W_{IIOC}};$$

$$W_{\%2015} = \frac{1483 \cdot 100}{20604} = 7,197 \%;$$



$$W_{\%2016} = \frac{1522 \cdot 100}{21404} = 7,11\%;$$

$$W_{\%2017} = \frac{1495 \cdot 100}{22008} = 6,793\%;$$

$$W_{\%2018} = \frac{1564 \cdot 100}{21011} = 6,928\%;$$

$$W_{\%2019} = \frac{1499 \cdot 100}{22751} = 6,589\%;$$

$$W_{\%2020} = \frac{1470 \cdot 100}{21509} = 6,834\%.$$

Объединим исходные и рассчитанные данные в единую таблицу и построим график уровня потерь в процентах для их сравнения (табл. 2).

Таблица 2

Данные готовых отчетов АО «Сетевая компания» по уровню потребления, полезного отпуска мощности и вычисленные данные уровня потерь

Мощность/Год	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Поступленная в сеть мощность $W_{\text{пос}}$ (млн. кВт·час)	20604	21404	22008	22575	22751	21509
Мощность полезного отпуска $W_{\text{по}}$ (млн. кВт·час)	19121	19882	20513	21011	21252	20039
Значение потерь $W_{\text{п}}$ (млн. кВт·час)	1483	1522	1495	1564	1499	1470
Процентное значение потерь $W, \%$	7,198	7,111	6,793	6,928	6,589	6,834

Для визуального восприятия был составлен график уровня потерь рассматриваемых сетей (рис. 4).

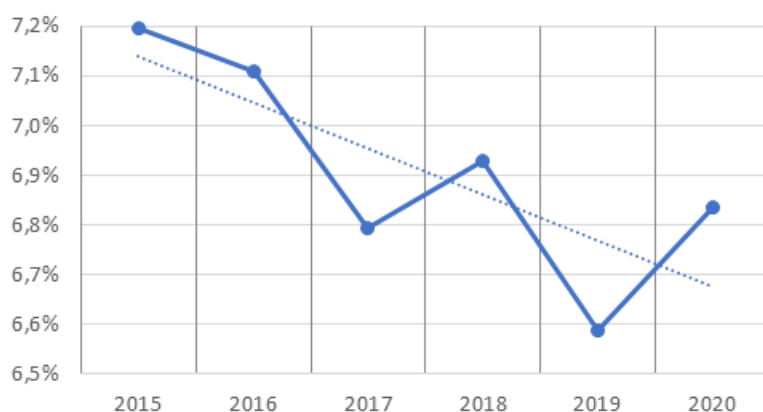


Рис. 4. Уровень потерь относительно поступлений мощности в сеть



На последнем графике добавлена линия тренда, которая показывает усредненное значение за все рассматриваемые года. Её угол наклона указывает на то, что в АО «Сетевая компания» ежегодно наблюдается спад уровня потерь электроэнергии.

Выводы

Анализ динамики уровня и величины потерь электроэнергии в АО «Сетевая компания» показал ежегодный спад уровня потерь электроэнергии, а также весьма неплохие показатели относительно других стран. Чем ниже данные показатели, тем сложнее их улучшать. Поэтому делая акцент на современные технологии, инновационные идеи и нестандартный подход, можно найти новые пути влияния на уровень потерь электроэнергии.

Потери в электросетях – важный финансовый показатель для электросетевой компании, так как компенсация затрат на покупку потерь электроэнергии напрямую влияет на чистую прибыль. Чтобы избежать дополнительных затрат на покупку электрической энергии для компенсации потерь и повысить финансовую устойчивость компаний, энергетики продолжают активную работу, направленную на минимизацию потерь.

Причинами возникновения потерь могут быть различные факторы, соответственно методы их уменьшения тоже будут различаться. Поэтому важным моментом является правильное соотношение потерь и природы их возникновения. Однако авторы учебников и работ по энергосбережению представляют самые различные варианты схем видов потерь, что усложняет процесс понимания материала. Именно поэтому после изучения множества видов потерь, и работ по энергосбережению автором и была составлена обобщенная схема потерь.

Одной из причин спада уровня потерь электроэнергии в Республики Татарстан является система использования интеллектуальных приборов учета электроэнергии и перенос счетчиков на границу раздела балансовой принадлежности, что позволяет сетевым компаниям и Татэнергосбыту иметь беспрепятственный доступ к показаниям электроэнергии домовладельцев и проверки легального подключения в сеть.

Библиографический список

1. Инструкция по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям (утв. приказом Минэнерго РФ от 30 декабря 2008 г. № 326).
2. Мохов С.Л. Коммерческие потери электроэнергии и их снижение [Электронный ресурс]. АНО «Центр энергосбережения УР» URL: <http://energobser18.ru/energoberezhenie/propaganda/publikaczii/kommercheskie-poteri-elektroenergii-i-ix-snizhenie.html>. (дата обр. 01.06.2023 г.)
3. Расчет потерь электроэнергии в сетях 0,4 кВ: формулы, схемы. [Электронный ресурс]. URL: <https://pue8.ru/uchet-elektroenergii/2-1-11-raschet-poter-elektroenergii-v-setyah-0-4-kv.html> (дата обр. 01.06.2023 г.)
4. Годовые отчёты АО «Сетевая компания» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=1830&type=2&attempt=1>. (дата обр. 01.06.2023 г.)
5. Фурсанов М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005. 207 с.
6. Пример определения потерь электроэнергии в линии. [Электронный ресурс]. URL: <https://raschet.info/primer-opredeleniya-poter-elektroenergii-v-linii/>. (дата обр. 01.06.2023 г.)
7. Железко, Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: М.: НУ ЭНАС, 2012. 280 с.



МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Лач С.Ю., Солёный С.В.

СПБ ГУАП, г. Санкт-Петербург

Аннотация

В статье содержится обзор актуальных методов определения ряда повреждений, которые могут возникать в ходе эксплуатации крупных электрических машин. Рассматривается возможность автоматизации использования данных методов при помощи робототехнической системы. Также рассматриваются способы интеграции приборов на колесную платформу и использованию данной системы в воздушном зазоре турбогенератора. Выделяются положительные и отрицательные аспекты использования методов диагностики на робототехнической платформе и определяются необходимые для этого изменения.

Ключевые слова: Электрические машины, робот, методы испытаний, ремонт, визуальный контроль.

DIAGNOSTIC METHODS FOR TURBOGENERATORS USING ROBOTICS

Sergey Lach, Sergey Solyonyj

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg

Abstract

The article contains an overview of current methods for determining a number of damages that may occur during the operation of large electrical machines. The possibility of automating the use of these methods using a robotic system is considered. Methods for integrating devices onto a wheeled platform and using this system in the air gap of a turbogenerator are also considered. The positive and negative aspects of the use of diagnostic methods on a robotic platform are highlighted and the changes necessary for this are determined.

Keywords: Electrical machines, robot, test methods, repair, visual inspection.

Введение

На данный момент передовые позиции в роботизированной диагностике турбогенераторов занимают зарубежные компании, такие как Iris Power, General Electric, Siemens и др. [1].

При этом акцент делается на движение системы по поверхности ротора. Это обусловлено тем, что часть электрических машин производства данных фирм имеет большой перепад высот между клином пазовой части статора и зубцами электротехнической стали.

Автоматизация проведения диагностических мероприятий может позитивно сказаться как на сроках проведения ремонта электрических машин, так и на качестве, за счет повышения повторяемости и точности результатов испытаний. Это обусловлено тем, что данные, получаемые различными специалистами, могут интерпретироваться



ими по-разному. Также использование робототехнической системы позволит повысить скорость обучения персонала, проводящего диагностику электрических машин.

Для создания отечественной системы диагностики турбогенераторов необходимо рассмотреть методы контроля параметров узлов электрической машины. А также определить, возможно ли использование этих методов в период текущего или среднего ремонтов турбогенераторов.

Материалы и методы

Рассмотрим основной метод диагностики статора (и ротора) турбогенераторов, который используют все робототехнические средства – визуальный контроль.

Данный метод диагностики позволяет определить наличие посторонних предметов как в расточке генератора, так и в воздушных каналах. Попадание инородных предметов чревато затруднением прохождения воздуха, следовательно, повышенным нагревом перекрытой зоны. В случае, когда предмет имеет проводящие свойства, также возникают и токи короткого замыкания [2].

Для реализации визуального контроля в робототехнических средствах используется техническое зрение при помощи камер. Помимо определения наличия неисправностей, техническое зрение необходимо использовать для контроля движения колесной платформы.

Оптимальная схема использования технического зрения представлена на рис. 1.

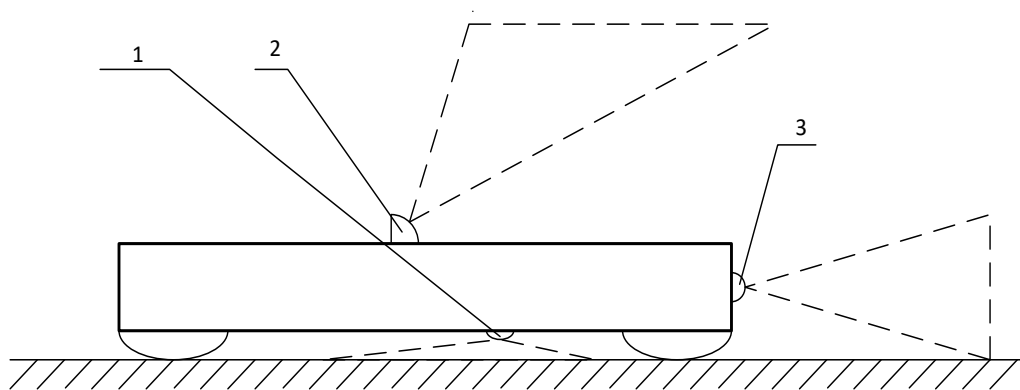


Рис. 1. Оптимальная схема установки камер на робототехническое средство

Основная камера (3 на рис. 1) устанавливается по ходу движения платформы и обеспечивает возможность получения данных о направлении движения робота и наличии препятствий. Камера 2 опциональна, при использовании робототехнического комплекса в воздушном зазоре турбогенератора (без извлечения ротора), с ее помощью возможно визуальное обследование поверхности ротора или воздушных каналов. Камера 1 устанавливается для контроля работы измерительных приборов, а также осмотра воздушных каналов активной стали статора и клиньев пазовой части.

Для увеличения автономности робота можно использовать анализ данных, поступающих с установленных камер при помощи нейросети и позволить таким образом роботу самостоятельно определять оптимальную траекторию движения и обнаруживать отклонения от нормального состояния узлов турбогенератора.

Другими модулями, устанавливаемыми на робототехническую платформу, могут быть системы анализа целостности пакетов активной стали статора такие, как ультразвуковой анализ и EL CID.

Ультразвуковой анализ зубцов активной стали статора применяется для оценки плотности прессовки активной стали. Суть метода состоит в том, чтобы измерить за-

держку прохождения ультразвука через листы электротехнической стали одного пакета. Данный метод диагностики может применяться, как только для всех зубцов крайних пакетов стали, так и для контроля плотности прессовки всей зоны сердечника (при необходимости) [3, 4].

Схематично можно показать данный метод следующим образом. К противоположным листам пакета электротехнической стали прислоняются конические ультразвуковые датчики (рис. 2). Затем производится измерение времени задержки прохождения сигнала. После этого датчики переставляются на следующий зубец и т.д.

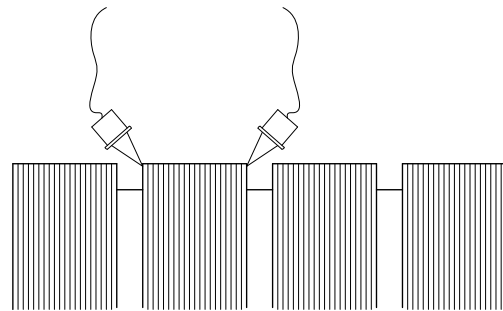


Рис. 2. Схема установки ультразвуковых датчиков

К недостаткам данного метода можно отнести то, что в идеальном случае необходимо иметь базу эталонных значений времени прохождения ультразвука по зубцам электротехнической стали типовых электрических машин. Если таких значений не имеется – возможен только поиск аномальных показаний внутри одной электрической машины. Также на показания может влиять неравномерность нанесения краски или излишнее загрязнение поверхности.

В случае установки на робототехническую систему модуля ультразвукового контроля необходимо также решить проблему подачи и уборки датчиков для осуществления передвижения робототехнической системы по расточке статора/воздушному зазору. Также в связи с тем, что при диагностике используются конические датчики длиной 30–60 мм, которые позволяют обойтись без использования контактной смазки, возникают сложности с использованием робототехнического комплекса, оснащенного таким модулем, в ряде турбогенераторов без извлечения ротора.

Несомненным достоинством проведения данного метода диагностики является возможность дополнительного контроля за параметрами электрической машины в периоды ремонта для получения дополненной картины происходящих во время работы процессов, а также уточнение периодов необходимости перешихтовки сердечника.

Следующим методом диагностики электрических машин, который возможно интегрировать в робототехническую систему в качестве диагностического модуля является испытание активной стали статора при малых индукциях.

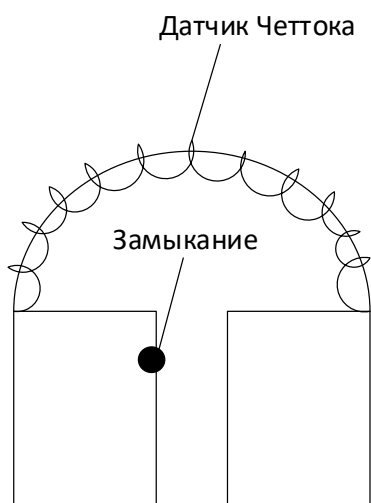


Рис. 3. Принцип измерения

Данный метод уже используется в отдельных роботизированных устройствах компаний IRIS POWER и ADWEL [5].

Принцип испытаний сводится к тому, чтобы измерить амплитуду и фазовый сдвиг падения магнитного потенциала в зоне дефекта при помощи специального датчика – магнитного потенциометра [6]. Принцип действия датчика Четтока (поясок Роговского) изображен на рис. 3.

При измерении данных параметров можно измерить мощность дополнительных потерь в замкнутом контуре.

Основным достоинством данного метода является сокращение временных и трудовых затрат на проведение испытаний по сравнению с испыта-

ниями активной стали при индукции 1,0–1,4 Тл. Уже существующие робототехнические средства зарубежных компаний доказывают возможность проведения этого типа испытаний в воздушном зазоре турбогенератора величиной от 30 мм. На рис. 4 изображена принципиальная схема проведения испытаний.

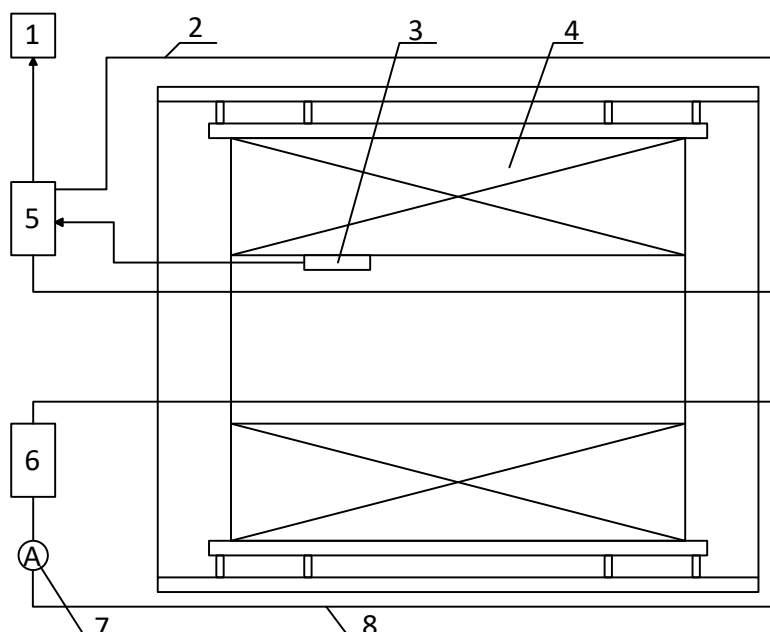


Рис. 4. Принципиальная схема контроля:

1 – компьютер; 2 – контрольный виток; 3 – робот с датчиками; 4 – сердечник; 5 – блок управления; 6 – блок питания; 7 – измеритель тока; 8 – намагничивающая обмотка

Помимо визуального контроля основным модулем предлагается использование блока проверки плотности заклиновки пазовой части статора. Во время ремонтов на электрических станциях данная операция занимает продолжительное количество времени и в зависимости от размера турбогенератора может длиться до нескольких смен. Для данной операции зарубежными компаниями был изготовлен ударный механизм с обратной связью, который позволял получить данные о плотности установленных клиньев.

В настоящее время многие компании мира переходят на новый вариант крепления стержней в пазу, где помимо обычных используются и специальные контрольные клинья. Их использование обусловлено тем, что в качестве прокладки под клин используется специальная упругая прокладка, выполняющая роль пружины, и обеспечивающая дополнительное поджатие клина. На рис. 5 изображена новая конструкция производства фирмы Krempel [7].

Для проверки плотности заклиновки такой конструкции необходимо использовать, помимо ударного, механизм, позволяющий измерить степень разжатия упругой прокладки. Таким образом, полученные данные будут наибольшим образом отражать картину удержания стержня в пазу.

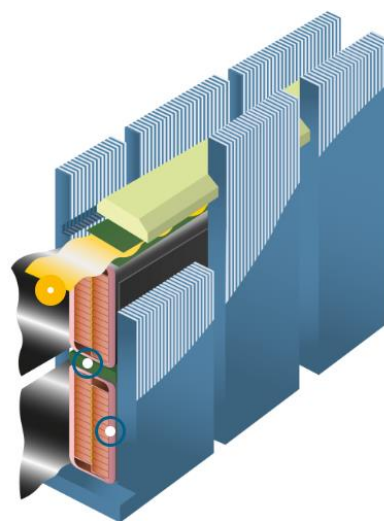


Рис. 5. Конструкция клина фирмы Krempel

Выводы

Основные существующие методы диагностики возможно применять с помощью робототехнических систем, что доказано созданием их зарубежными фирмами. При этом действующие мобильные системы не позволяют провести достаточно широкий спектр испытаний.

В случае доработки известных методов диагностики и реализации их в виде модульной конструкции для роботизированного устройства появляется возможность расширить спектр оказания услуг по диагностике, как во время ремонтов с выводом ротора, так и в короткие ремонты без вывода ротора.

Использование модульных робототехнических средств должно ускорить проведение диагностики крупных электрических машин, а также повысить точность получаемых на выходе данных, анализируя которые возможно скорректировать рекомендации завода-изготовителя по безопасной и эффективной эксплуатации электрооборудования.

Соответственно при ускорении проведения плановых диагностик будут сокращены сроки ремонтов и простоев в связи с обнаружением дефектов, а в последствии и повышение надежности и срока службы турбогенераторов.

Библиографический список

1. Savenkov M., Turner M. New robotic technologies for inspecting two pole electric generators while the rotor remains in place // *Journal of power and energy engineering*. 2015. № 3. P. 123–127.
2. Самородов Ю.Н. Дефекты генераторов. М.: Энергетические технологии, 2005. 350 с.
3. Пикульский В.А., Бутов А.В. Ультразвуковой метод оценки состояния плотности пресковки активной стали статора турбогенераторов // *Электрические станции*. 1993. № 3. С. 40–45.
4. Техническая диагностика мощных генераторов / Д.В. Кузнецов, В.В. Маслов, А.Б. Нецеевский, Ф.А. Поляков // *Энергия единой сети*. 2014. № 3(14). С. 50–59.
5. Robotic inspection vehicle and camera system (RIV800) [Электронный ресурс]. URL: <https://irispower.com/>. (дата обр. 01.06.2023)
6. The Application of ELCID on Inter-laminar Insulation Failure of Generator Stator Core / J. Wang, Z. Cao, H. Dai and other // 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Shanghai, 2020. P. 301–305.
7. Generators Electrical insulation materials for generators and rotating high voltage machines [Электронный ресурс]. URL: <https://krempel.com>. (дата обр. 01.06.2023)

References

1. Savenkov, M., & Turner, M. (2015). New robotic technologies for inspecting two pole electric generators while the rotor remains in place. *Journal of power and energy engineering*, 3, 123–127.
2. Samorodov, Yu. N. (2005). *Defekty generatorov* [Generator Defects]. Energy Technologies. [In Russian]
3. Pikulsky, V. A., Butov, A. V. (1993) Ul'trazvukovoj metod ocenki sostoyaniya plotnosti pressovki aktivnoj stali statora turbogeneratorov [Ultrasonic method for assessing the state of the density of pressing of the active steel of the stator of turbogenerators]. *Power stations*, 3, 40–45. [In Russian]
4. Kuznetsov, D. V., Maslov, V. V., Netseevsky, A. B. & Polyakov, F. A. (2014). Tekhnicheskaya diagnostika moshchnyh generatorov [Technical diagnostics of high-power generators]. *Energy of a single network*, 3(14), 50–59. [In Russian]
5. IRIS POWER (n.d.). Robotic inspection vehicle and camera system (RIV800). IRIS POWER. Retrieved June 1, 2023, from <https://irispower.com/products/robotic-inspection-camera/>.
6. Wang, J., Cao, Z., Dai, H., Sun, F., Shang, P. & Sun, S. (2020) The Application of ELCID on Inter-laminar Insulation Failure of Generator Stator Core. In *Proc of 5th International Conference on Power and*



Renewable Energy (ICPRE) (pp. 301–305) Shanghai. <https://doi: 10.1109/ICPRE51194.2020.9233107>.

7. Krempel (n.d.). Generators Electrical insulation materials for generators and rotating high voltage machines. Krempel. Retrieved June 1, 2023, from <https://krempel.com/en/solutions/energy/generators>.

Сведения об авторах

Лач Сергей Юрьевич, аспирант кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, заведующий лабораторией СКБ «Силовые машины – ГУАП» Инженерной школы.

E-mail: lach_su@guap.ru.

Солёный Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники, директор Инженерной школы Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

ORCID: [0000-0002-7919-3890](https://orcid.org/0000-0002-7919-3890)

E-mail: ssv@guap.ru.

Authors about

Sergey Yurievich Lach, post-graduate student of the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, head of the laboratory of SKB Power Machines – GUAP, Engineering School.

E-mail: lach_su@guap.ru.

Sergey Valentinovich Solyonyj, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Electromechanics and Robotics, Director at the School of Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

ORCID: [0000-0002-7919-3890](https://orcid.org/0000-0002-7919-3890)

E-mail: ssv@guap.ru.



УДК 544.4

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ОКИСЛИТЕЛЯ НА ПОЛИМЕРИЗАЦИЮ АНИЛИНА В ПЕРФТОРИРОВАННЫХ МЕМБРАНАХ

Лоза Ю.С., Кутенко Н.А.

Научный руководитель: д-р хим. наук Фалина И.В.

Кубанский Государственный Университет, г. Краснодар

Аннотация

Было выполнено исследование кинетики полимеризации анилина в матрице перфторированной гомогенной сульфокатионитовой мембраны МФ-4СК (ОАО «Пластполимер» (С.-Петербург, Россия) в зависимости от природы и концентрации окислителя. В качестве окислителей использовались ион железа (III) и персульфат-ион, являющиеся соответственно противоионом и коионом по отношению к матрице мембраны. Методом окислительной полимеризации *in situ* была получена серия композитных образцов МФ-4СК и полианилина с распределением модификатора в объеме или на поверхности мембраны. Кинетика реакции полимеризации анилина изучалась методом фотометрии. В процессе протекания реакции были измерены спектры поглощения образцов и определены оптические плотности в максимумах поглощения при длинах волн около 800 и 400 нм. На основании полученных данных были построены и проанализированы кинетические зависимости в широком диапазоне концентраций персульфата аммония. Скорость реакции полимеризации анилина была выше в случае использования в качестве окислителя противоиона железа (III). Для окислителя-коиона зависимости скорости реакции от времени имеет монотонный возрастающий характер для всех изученных концентраций. При этом на зависимостях имеется индукционный период, связанный с накоплением реагентов в реакционном пространстве в отличие от случая использования в качестве окислителя противоиона. В последнем случае уже на начальном этапе наблюдается образование полианилина. Полученные результаты указывают на то, что лимитирующей стадией реакции полимеризации является диффузия окислителя в фазу мембраны.

Ключевые слова: перфторированная мембрана, полианилин, окислительная полимеризация, кинетика.

EFFECT OF OXIDIZER TYPE ON ANILINE POLYMERIZATION IN PERFLUORINATED MEMBRANES

Julia Loza, Natalia Kutenko

Scientific supervisor: p.h.d. Irina Falina

Kuban State University, Krasnodar

Abstract

Kinetics of aniline oxidative polymerization in the matrix of a perfluorinated homogeneous cation exchange MF-4SK membrane with sulfonic acid groups manufactured by JSC Plastpolimer (St.-Petersburg, Russia) was studied. Iron (III) ion and persulfate ion, which are, respectively, a counterion and a co-ion towards membrane matrix, were chosen as oxidizers. A series of composite samples of MF-4SK and PANI with volumetric and surface modifier distribution was obtained by *in situ* polymerization. Kinetics of the reaction was studied by photometry. During the course of the reaction, absorption spectra were measured and optical densities were determined at the absorption maxima at wavelengths of 800 and 400 nm. On the basis of this data, kinetic dependences were constructed and analyzed in a wide range of ammonium persulfate concentrations. The rate the



reaction was higher when iron (III) counterion was used as an oxidizer. For the co-ion oxidizer, dependence of the reaction rate on time has an increasing character. The dependences have an induction period associated with accumulation of reagents in reaction space, unlike when using a counterion. In the latter case, the formation of polyaniline is observed at the initial moment. Obtained results indicate that polymerization reaction limiting stage is oxidizer diffusion into membrane.

Keywords: *perfluorinated membrane, polyaniline, oxidative polymerization, kinetics.*

Введение

Композиты на основе перфторированных сульфокатионитовых мембран типа Нафион или их российского аналога МФ-4СК и полианилина (ПАНИ) представляют большой интерес для исследователей в связи с сочетанием свойств данных полимеров. Перфторированная матрица мембраны обеспечивает термическую и химическую стабильность, механическую прочность и высокую протонную проводимость. ПАНИ придает ей набор уникальных электрохимических и оптических свойств [1, 2]. Данные композиты являются перспективными для использования в мембранно-электродном блоке топливного элемента. Так, в работе [3] приводится сравнительная характеристика электропроводности мембран МФ-4СК производства ОАО «Пластполимер» (С.-Петербург, Россия) и объемно модифицированных композитов на ее основе в условиях влажности и температуры, моделирующих работу топливного элемента [4]. Показано, что электропроводность модифицированной мембраны превышает исходную в два раза и что материал имеет высокую устойчивость.

В работах [5, 6] показано, что характеристики композитных мембран зависят от количества модификатора и особенностей его распределения в матрице мембраны. В настоящее время разработаны различные подходы к получению композитов на основе перфторированных катионообменных мембран и ПАНИ, которые можно условно разделить на две большие группы: метод полива [7] позволяет получить композиты с фиксированным содержанием ПАНИ, но не позволяет создать образцы с поверхностным распределением модификатора, и метод окислительной полимеризации анилина *in situ* [3], позволяющий варьировать распределение ПАНИ в матрице мембраны. Определены условия получения образцов с объемным и поверхностным распределением модификатора, показано, что использование в качестве окислителя коиона приводит к получению образцов с поверхностным распределением, противоиона – с объемным [5]. Однако особенности полимеризации анилина в матрице мембраны под действием различных окислителей детально не изучались.

В связи с этим, целью работы являлось изучение кинетики полимеризации анилина в матрице гомогенной перфторированной сульфокатионитовой мембраны МФ-4СК в зависимости от природы и концентрации окислителя.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась гомогенная перфторированная сульфокатионитовая мембрана МФ-4СК производства ОАО «Пластполимер» (С.-Петербург, Россия) (рис. 1,а), в качестве окислителей использовались хлорид железа (III) и персульфат аммония. В процессе полимеризации в матрице мембраны образовывался ПАНИ в форме эмеральдина (рис. 1, б).

Поскольку ПАНИ – окрашенное соединение, удобным способом определения его концентрации является спектрофотометрия. Синтез полианилина осуществлялся в две стадии: мембрана на сутки помещалась в раствор мономера, переходя в форму катионов анилиниума, затем — в кювету спектрофотометра с раствором окислителя нужной концентрации (рис. 2).



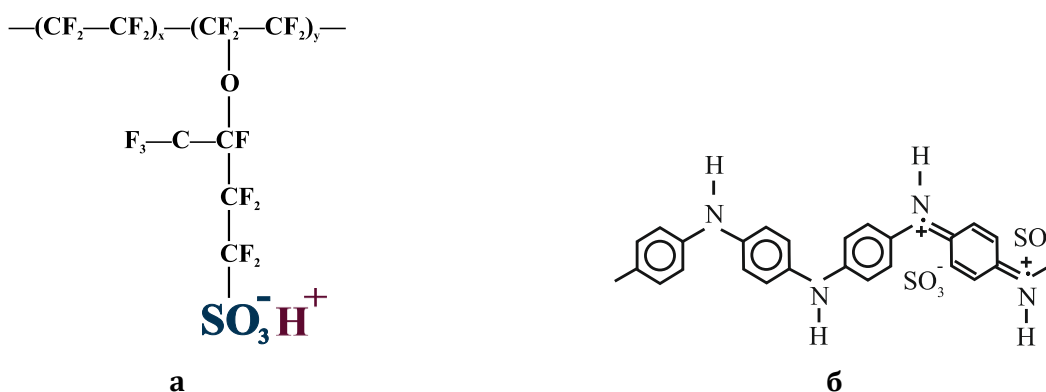


Рис. 1. Химический состав мембраны МФ-4СК (а) и ПАНИ (б) в форме эмеральдина

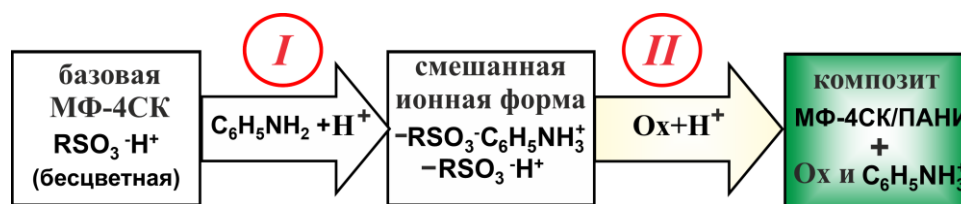


Рис. 2. Схема получения композита МФ-4СК и ПАНИ

Спектры поглощения в видимой области измерялись непосредственно в ходе реакции полимеризации анилина через определенные интервалы времени.

В процессе получения композитов были измерены спектры поглощения при концентрациях персульфата аммония от 0,005М до 0,05М., а также концентрации хлорида железа (III) равной 0,01М. На них имеются характерные для полианилина полосы поглощения при длинах волн около 800 и 400 нм. Для каждого спектра были определены величины оптической плотности в максимуме при длине волны около 800 нм. Исходя из закона Бугера-Ламберта-Бера, оптическая плотность в максимуме поглощения (A) прямо пропорциональна концентрации ПАНИ в образце. Следовательно, можно оценить относительную скорость реакции полимеризации (v , мин⁻¹) по формуле

$$v = \Delta A / \Delta t, \quad (1)$$

где ΔA – изменение оптической плотности за промежуток времени Δt .

Обсуждение результатов

Предполагается, что механизм реакции полимеризации анилина аналогичен описанному в [8], но протекание реакции осложняется диффузионными процессами, обусловленными тем, что окислитель находится в растворе, а мономер – в фазе мембраны, где и протекает реакция образования ПАНИ. Уже в начальный момент времени в случае использования в качестве окислителя железа (III) наблюдается образование полимера, на что указывает появление характерных максимумов поглощения (рис. 3). Это обусловлено доставкой окислителя в фазу мембраны по механизму ионного обмена между противоионами H^+ или анилиниума, находящимися в мембране и ионами Fe^{3+} в растворе. Увеличение интенсивности поглощения во времени указывает на возрастание содержания ПАНИ в образцах (рис. 3). Однако в случае применения в качестве окислителя персульфата аммония появление характерной для ПАНИ и зеленой окраски образца и соответствующих максимумов поглощения на спектрах наблюдается с некоторой задержкой.



В случае окислителя-коиона практически для всех концентраций на начальном этапе наблюдается индукционный период (рис. 4), что связано с накоплением реагентов в реакционном пространстве. Лимитирующей стадией является диффузия анионов окислителя в мембрану, поскольку в результате Доннановского исключения коионы лишь в малых количествах проникают в фазу ионообменного материала. Однако после индукционного периода наблюдается резкое увеличение скорости реакции полимеризации.

На рис. 4 приведены зависимости относительной скорости реакции полимеризации анилина в матрице мембраны. Для железа (III) и персульфат-иона кинетические зависимости имеют различный характер. Это связано с тем, что первый из них является противоионом по отношению к матрице мембраны, а второй – коионом.

Как и следовало ожидать, увеличение концентрации персульфата аммония окислителя приводит к существенному увеличению скорости реакции. Однако в случае применения в качестве окислителя хлорида железа (III) скорость реакции полимеризации анилина выше, чем для персульфата аммония такой же концентрации. Только превышение в 2,5 раз концентрации персульфата аммония над концентрацией хлорида железа (III) в растворе позволяет достичь сопоставимой скорости реакции полимеризации анилина. Это также является подтверждением диффузионного механизма доставки персульфата аммония в фазу мембраны.

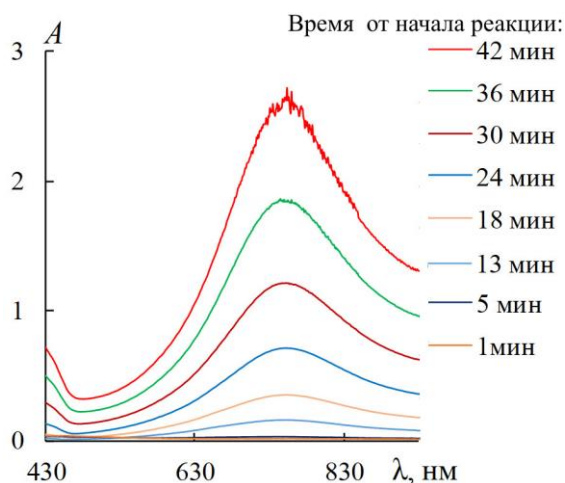


Рис. 3. Спектры поглощения образца, измеренные в процессе реакции полимеризации анилина в мембране МФ-4СК в растворе 0,01 М FeCl₃

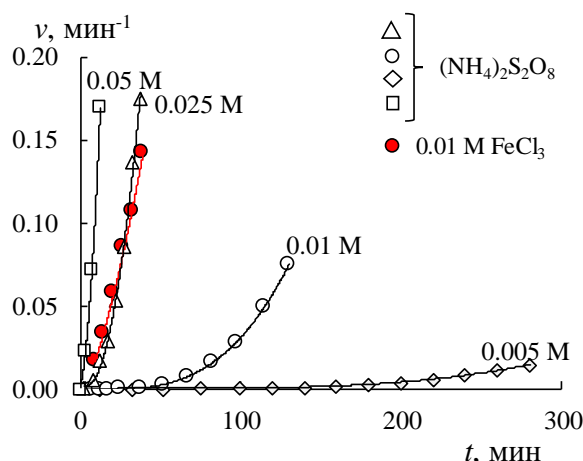


Рис. 4. Зависимости относительной скорости реакции полимеризации анилина в мембране от времени контакта с раствором окислителя

Выводы

Выполнено изучение влияния природы и концентрации окислителя на кинетику полимеризации анилина в перфторированной мембране. Обнаружено, что лимитирующей стадией процесса является диффузия окислителя из раствора в мембрану. Показано, что скорость реакции окислительной полимеризации анилина в мембране под действием окислителя коиона ниже по сравнению с окислителем противоионом, что обусловлено разным механизмом доставки противо- и коиона в мембрану.



Библиографический список

1. Ćirić-Marjanovic G. Recent advances in polyaniline research: polymerization mechanisms, structural aspects, properties and applications // *Synth Metals*. 2013. Vol. 177. P. 1–47.
2. Wang H., Lin J., Shen Z.X. Polyaniline (PANi) based electrode materials for energy storage and conversion // *J. Sci.: Adv. Materials Devices*. 2016. Vol. 1. P. 225–255.
3. Performance of Hydrogen Fuel Cell MEAs Based on Perfluorinated Nanocomposite Membranes Modified by Polyaniline / A. Munar, K. Suarez, O. Solorza et. al. // *Journal of The Electrochemical Society*. 2010. Vol. 157, No. 8. P. B1186-B1194.
4. Springer T.E., Zawodzinski T.A, Gottesfeld S. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model // *Journal of The Electrochemical Society*. 1991. Vol. 138, No. 8. P. 2334-2342.
5. Perfluorinated nanocomposite membranes modified by polyaniline: electrotransport phenomena and morphology / N.P. Berezina, N.A. Kononenko, A.A.-R. Sytcheva et. al. // *Electrochim. Acta*. 2009. No. 54. P. 2342–2352.
6. Tan S., Bélanger D. Characterization and transport properties of Nafion/Polyaniline composite membranes. // *J. Phys. Chem.* 2005. No B 109. P. 23480–23490
7. Dutta K., Das S., Kundu P.P., Partially sulfonated polyaniline induced high ion exchange capacity and selectivity of Nafion membrane for application in direct methanol fuel cells. // *J. Membr. Sci.* 2015. No. 473. P. 94–101.
8. Wei Y., Tang X., Sun Y. A study of the mechanism of aniline polymerization // *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry*. 1989. Vol. 27. P. 2385-2396.

References

1. Ćirić-Marjanovic, G. (2013). Recent advances in polyaniline research: polymerization mechanisms, structural aspects, properties and applications. *Synth. Metals*, 177, 1–47. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2013.06.004>.
2. Wang, H., Lin, J., & Shen, Z. X. (2016) Polyaniline (PANi) based electrode materials for energy storage and conversion. *J. Sci.: Adv. Materials Devices*, 1, 225–255. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2016.08.001>.
3. Munar, A., Suarez, K., Solorza, O., Berezina, N. P., & Compañ, V. (2010). Performance of Hydrogen Fuel Cell MEAs Based on Perfluorinated Nanocomposite Membranes Modified by Polyaniline. *Journal of The Electrochemical Society*. 157(8), B1186-B1194. <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3439671>.
4. Springer, T. E., Zawodzinski, T. A, Gottesfeld, S. (1991). S. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model. *Journal of The Electrochemical Society*, 138(8), 2334-2342.
5. Berezina, N. P., Kononenko, N. A., Sytcheva, A. A.-R., Loza, N. V., Shkirskaya, S. A., Hegman, N., & Pungor, A. (2009). Perfluorinated nanocomposite membranes modified by polyaniline: electrotransport phenomena and morphology. *Electrochim. Acta*, 54, 2342–2352. https://www.researchgate.net/publication/222687069_Perfluorinated_nanocomposite_membranes_modified_by_polyaniline_Electrotransport_phenomena_and_morphology.
6. Tan, S., Bélanger, D. (2005). Characterization and transport properties of Nafion/Polyaniline composite membranes. *J. Phys. Chem., B* 109, 23480–23490. <https://doi.org/10.1021/jp054724e>.
7. Dutta, K., Das, S., & Kundu, P.P. (2015). Partially sulfonated polyaniline induced high ion exchange capacity and selectivity of Nafion membrane for application in direct methanol fuel cells. *J. Membr. Sci.*, 473, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.09.010>.
8. Wei, Y., Tang, X., & Sun, Y. (1989). A study of the mechanism of aniline polymerization. *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry*, 27, 2385-2396. <https://doi.org/10.1002/pola.1989.080270720>.



УДК 621.313.322

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР С КОММУТИРУЕМЫМИ БИФИЛЯРНЫМИ ОБМОТКАМИ

Махиянов А.В.

Научный руководитель: д-р техн. наук, проф. Саттаров Р.Р.

ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа

Аннотация

Одной из главных проблем многих электрических генераторов является сложность стабильного генерирования переменного напряжения из-за прямой зависимости напряжения от частоты вращения ротора. Чем больше частота вращения ротора генератора, тем выше его напряжение, и чем больше нагрузка, тем меньше напряжение. Для нормальной работы потребителей электрической энергии необходимо, чтобы значение частоты тока и напряжения соответствовали номинальным или, точнее, не выходили за допустимые пределы. Любой перепад напряжения в питающей сети существенно снижает срок службы подключенных приборов. Перепады напряжения и прочие неполадки в сети могут привести к выходу из строя дорогостоящей техники и даже угрожать жизни и здоровью людей. Для предотвращения подобных последствий существует множество устройств защиты электрической сети, применяемых в зависимости от характера неполадок. В данной статье дано описание нового технического решения - магнитоэлектрического генератора с коммутируемыми бифилярными обмотками. Задачей, на решение которой направлен магнитоэлектрический генератор с коммутируемыми бифилярными обмотками является увеличение диапазона регулирования напряжения за счет изменения схемы соединения бифилярной обмотки с помощью системы стабилизации напряжения, для стабильной работы эклектической сети.

Ключевые слова: электрическая машина, магнитоэлектрический генератор, постоянные магниты, бифилярная обмотка, схема соединения обмотки.

MAGNETOELECTRIC GENERATOR WITH SWITCHED BIFILAR WINDINGS

Arthur Makhiyanov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Ufa State Petroleum Technological University», Ufa

Abstract

One of the main problems of many electrical generators is the difficulty of generating a stable alternating voltage due to the direct dependence of the voltage on the rotor speed. The higher the generator rotor speed, the higher its voltage, and the greater the load, the lower the voltage. For the normal operation of consumers of electrical energy, it is necessary that the value of the frequency of the current and voltage correspond to the nominal ones or, more precisely, do not go beyond the permissible limits. Any voltage drop in the supply network significantly reduces the service life of the connected devices. Power surges and other network failures can lead to the failure of expensive equipment and even threaten the life and health of people. To prevent such consequences, there are many electrical network protection devices used depending on the nature of the problem. This article describes a new technical solution - a magnetoelectric generator with switched bifilar windings. The task to be solved by a magnetoelectric generator with switched bifilar windings is to increase the voltage regulation range by changing the connection scheme of the bifilar winding using a voltage stabilization system, for the stable operation of the eclectic network.

Keywords: electric machine, magnetoelectric generator, permanent magnets, bifilar winding, winding connection diagram.



Одной из проблем многих электрических генераторов является сложность стабильного генерирования переменного напряжения из-за прямой зависимости напряжения от частоты вращения ротора, по примеру ветроэнергетических установок, где скорость вращения ротора и вырабатываемое напряжение зависит от скорости ветра [1]. Данный недостаток понижает энергоэффективность всей системы, где содержится такой генератор [2].

Рассмотрим конструкцию магнитоэлектрического генератора типового исполнения с распределенной обмоткой на статоре [3]. Магнитоэлектрический генератор стандартного исполнения содержит шихтованный цилиндрический магнитопровод 1, на внутренней поверхности которого размещается якорная обмотка 2, как показано на рис. 1. Если в машине используются обычные постоянные магниты, то внутренняя поверхность сердечника статора содержит пазы, чередующиеся с зубцами. В пазах размещают проводники якорной обмотки. Недостатком данного генератора является зависимость напряжения от частоты вращения ротора и невозможность регулирования напряжения.

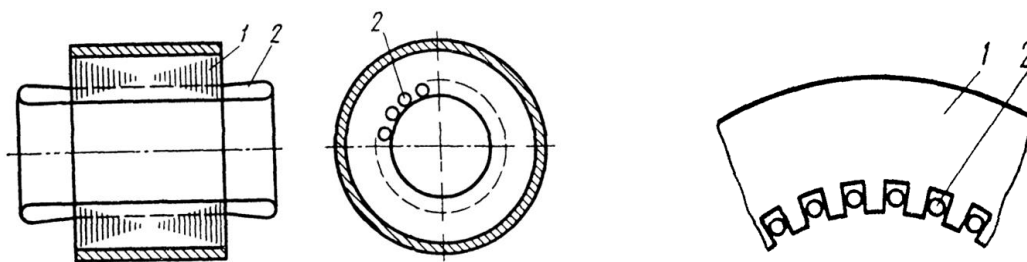


Рис. 1. Статор магнитоэлектрического генератора стандартного исполнения с распределенной обмоткой на статоре:

1 – шихтованный цилиндрический магнитопровод, 2 – якорная обмотка

Увеличение диапазона регулирования напряжения за счет изменения схемы соединения обмотки с помощью системы стабилизации напряжения возможно в магнитоэлектрическом генераторе с бифилярной обмоткой [4].

На рис. 2 представлено поперечное сечение магнитоэлектрического генератора с бифилярной обмоткой и системой стабилизации напряжения, на рис. 3 показано сечение паза с проводниками бифилярной обмотки. На рис. 4 показана структурная схема магнитоэлектрического генератора и системы стабилизации напряжения.

Магнитоэлектрический генератор с бифилярной обмоткой содержит ротор 1 с постоянными магнитами, который имеет возможность вращения в воздушном зазоре 2 статора 3. В свою очередь к магнитоэлектрическому генератору подключена система 4 стабилизации напряжения. В зубцово-пазовой зоне 5 статора 3 расположена статорная (якорная) обмотка 6. Секции статорной обмотки 6 выполнены бифилярным проводом 7.

Магнитоэлектрический генератор работает следующим образом. При вращении ротора 1 генератора, постоянные магниты образуют вращающееся магнитное поле в воздушном зазоре 2. Это поле пересекает проводники бифилярной обмотки 6 статора 3 и наводит в них ЭДС [5]:

$$E = k \cdot \Phi \cdot n, \quad (1)$$

где k – величина, зависящая в основном от числа витков в фазовой обмотке статора и числа пар полюсов, Φ – действующая величина магнитного потока (ротора), пронизывающего две катушки обмотки статора, n – число оборотов ротора [6].

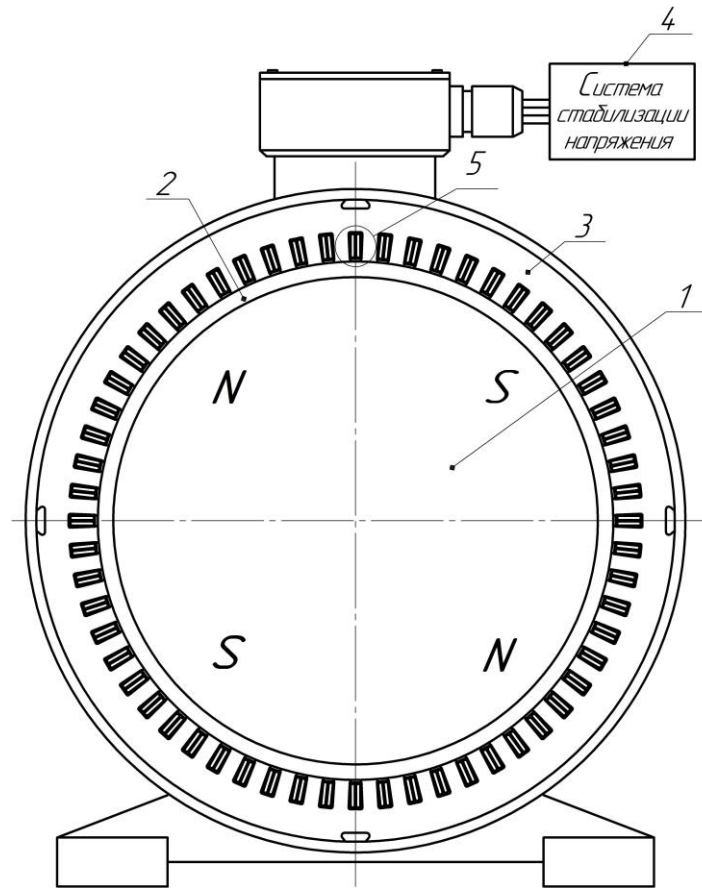


Рис. 2. Поперечное сечение магнитоэлектрического генератора с бифилярной обмоткой и системой стабилизации напряжения

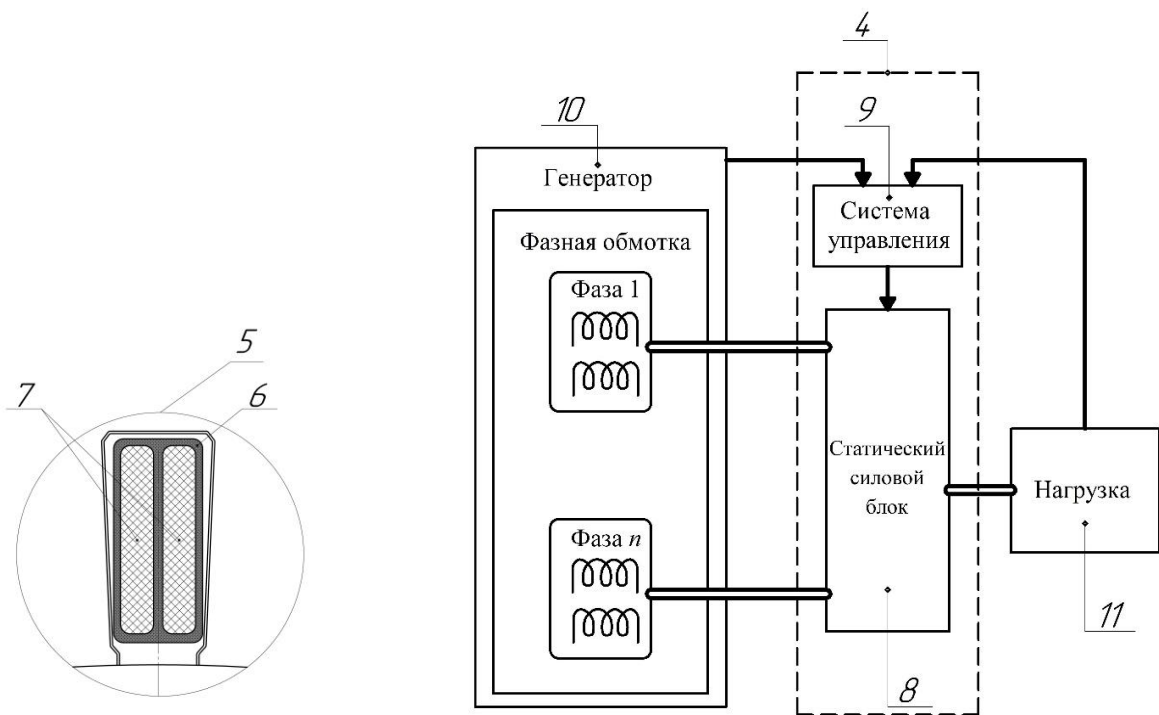


Рис. 3. Сечение паза с проводниками бифилярной обмотки

Рис. 4. Структурная схема магнитоэлектрического генератора и системы стабилизации напряжения

В магнитоэлектрическом генераторе величина магнитного потока остается неизменной, поэтому ЭДС изменятся при изменении скорости вращения ротора 1. При скоростях вращения, близких к номинальным, величина ЭДС также близка к номинальному значению. В этом режиме генератор может питать большое количество электрических нагрузок, поэтому две части бифилярной статорной обмотки 6 соединяются параллельно. При малых скоростях вращения, ЭДС существенно меньше номинального значения, поэтому обмотки 6 соединяются последовательно, что позволяет увеличить ЭДС в два раза. В то же время величина тока и отдаваемой мощности ограничивается пропускной способностью одной части бифилярной статорной обмотки 6.

Система 4 стабилизации напряжения, включающая статический силовой блок 8 и систему 9 управления, работает следующим образом. Две части обмоток 6 с бифилярным проводом 7 каждой фазы включаются или последовательно, или параллельно с помощью статического силового блока 8 на основании управляющих воздействий со стороны системы 9 управления в зависимости от режима генератора 10, содержащего ротор 1 и статор 2 в зубцово - пазовой зоне которого расположена статорная обмотка 6, и нагрузки 11.

Выводы

Таким образом, заявляемый магнитоэлектрический генератор обеспечивает расширение функциональных возможностей в увеличении диапазона регулирования напряжения за счет изменения схемы соединения бифилярной обмотки, что увеличивает энергоэффективность всей системы и стабильность работы эклектической сети [7].

Библиографический список

1. Патент на полезную модель № 212697 U1 Российская Федерация, МПК F03D 7/04, H02P 9/00. Ветроэнергетическая двухгенераторная установка: № 2022104815: заявл. 22.02.2022: опубл. 03.08.2022 / Р. Р. Саттаров, А. В. Махиянов, И. Р. Саттаров; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. М.: Питер, 2008. 349 с.
3. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высш. шк., 1990. 416 с.
4. Патент на полезную модель № 216073 U1 Российская Федерация, МПК H02K 21/12. Магнитоэлектрический генератор с бифилярной обмоткой: № 2022118402: заявл. 02.11.2021: опубл. 16.01.2023 / Р. Р. Саттаров, А. В. Махиянов, Т.Р. Зиганшин; заявитель ФГБОУ ВО УГНТУ.
5. Копылов И. П. Электрические машины: учеб. для студентов электромех. и электроэнергет. специальностей вузов. Изд. 5-е, стер. М.: Высш. шк., 2006. 606 с.
6. Панфилов В. А. Электрические измерения: учебник для студентов образоват. учреждений сред. проф. образования, обучающихся по специальности 1004 «Электроснабжение (по отраслям)». 2-е изд., стер. М.: Академия, 2006. 284 с.
7. Нестабильное напряжение в сети почему [Сайт]: Электросеть. URL: <https://plastep.ru/nestabilnoe-napryazhenie-v-seti-pochemu/> (дата обращения 19.06.2023).



УДК 621.311

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НОРМИРОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ООО «ОРЕНБУРГСКИЙ РАДИАТОР»

Поленов М.В.

Технический Университет УГМК, г. Верхняя Пышма

Аннотация

Экономическая эффективность предприятия ООО «Оренбургский радиатор» зависит от эффективности потребления энергетических ресурсов на выпуск основной продукции. Для оценки эффективности потребления энергетических ресурсов необходимо организовать их нормирование. На предприятии разработана методика нормирования потребления электроэнергии, остальные энергоресурсы не нормируются. Мероприятия, связанные с совершенствованием планирования и применения научно-обоснованного нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а также прогрессивных систем учета, имеют первостепенное значение для экономии ТЭР. Научно-обоснованные удельные нормы расхода ТЭР создают основу для оценки потребности в энергетических ресурсах промышленных предприятий и являются первичной базой для планирования расхода ТЭР. Кроме того, нормы расхода ТЭР на единицу выпускаемой продукции отражают современные научно-технические достижения и являются стимулом для экономии ТЭР, поскольку любая экономия предполагает необходимость сравнения с существующей нормой. Нормирование ТЭР в машиностроительном предприятии имеет высокую актуальность в современных условиях. Следует также отметить, что норма энергопотребления, как плановая мера, выполняет функции контроля расхода энергоресурсов и воздействует на персонал промышленного предприятия, который может влиять на её изменение, постоянно заставляя персонал прилагать дополнительные усилия и проводить мероприятия по её выполнению и снижению, тем самым повышая эффективность использования энергоресурсов.

Ключевые слова: Методики нормирования, удельные нормы, топливно-энергетические ресурсы, ТЭР.

SCIENTIFIC RATIONALE AND DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR RATIONING FUEL AND ENERGY RESOURCES AT "ORENBURG RADIATOR" LTD.

MAXIM POLENOV

TU UMMC, Verkhnyaya Pyshma

Abstract

Economic efficiency of the enterprise "Orenburg Radiator" depends on the efficiency of consumption of energy resources for production of main products. To assess the efficiency of consumption of energy resources it is necessary to organize their rationing. The technique of rationing of power consumption is developed at the enterprise, other power resources are not rationed. Measures related to improving the planning and application of science-based rationing of fuel and energy resources (FER) consumption, as well as progressive accounting systems are of paramount importance for FER saving. Scientifically substantiated specific standards of fuel and energy resources consumption create a basis for evaluation of need in energy resources of the industrial enterprises and are a primary base for planning of fuel and energy resources consumption. Besides, the norms of FER consumption per a unit of the output product re-



flect modern scientific and technical achievements and are the stimulus for FER saving, because any saving implies the necessity of comparison with the existing norm. The rationing of fuel and energy resources in the machine-building enterprise is of high actuality in modern conditions. It should be also noted that the norm of energy consumption, as a planned measure, performs the function of control of energy consumption and influence on the personnel of an industrial enterprise, which can influence on its change, constantly making the personnel to take additional efforts and to carry out measures on its implementation and decrease, thereby increasing the efficiency of energy resources use.

Key words: Methodology of rationing, specific norms, fuel and energy resources, FER.

Введение

На предприятии ООО «Оренбургский радиатор» выпускаются радиаторы для сельскохозяйственной, дорожно-строительной, специальной техники, передвижных электростанций, насосных установок, грузовых и легковых автомобилей с мощностью двигателей от 6 до 600 кВт. Изготавливаются теплообменники различного назначения: водяные, масляные, воздушные (ОНВ), а также радиаторы отопителей, блочные системы охлаждения, отопления и прочую продукцию.

Экономическая эффективность предприятия напрямую зависит от эффективности потребления ТЭР на выпуск продукции. Для определения необходимого и достаточного количества ТЭР для решения производственной задачи по выпуску продукции на предприятии должны быть разработаны нормы потребления ТЭР [1-3]. Оценка эффективности потребления ТЭР выполняется путём сравнения фактического потребления ТЭР с нормой на одном и том же интервале времени (сутки, месяц).

Цель данной научной работы — совершенствование существующего метода нормирования ТЭР на предприятии ООО «Оренбургский радиатор».

Для достижения заданной цели необходимо:

1. Провести краткий анализ существующего подхода к нормированию потребления ТЭР на ООО «Оренбургский радиатор».
2. Предложить направление совершенствования методики нормирования предприятия.
3. Провести сравнительный анализ существующего метода нормирования с предлагаемым к использованию расчётно-аналитическим методом.
4. Сделать краткие выводы и заключение.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Анализ существующего метода нормирования потребления ТЭР на ООО «Оренбургский радиатор».

На данный момент на предприятии действует следующий метод нормирования потребления ТЭР: Общее количество потраченной электроэнергии относится к объёму (количеству) выпущенной продукции за прошедший месяц. Выпускаемая продукция разделена на группы (табл. 1).

Количество электроэнергии потраченной на выпуск продукции той или иной группы рассчитывается пропорционально совокупной стоимости продукции каждой группы (рис. 1).

100% стоимости выпущенной продукции соответствует 100% потребленной электроэнергии. Каждой группе выпущенной продукции соответствует процент потребленной электроэнергии, равный проценту в общей стоимости выпущенной продукции (табл. 2).



Таблица 1

Группы выпускаемой продукции

№ п/п	Наименование продукции
1	Радиаторы водяные, масляные, ОНВ для с/х машин, в том числе:
1.1	Медно-паяные
1.2	Алюминиевые
2	Блоки с/х, в том числе
2.1	Медно-паяные
2.2	Алюминиевые
3	Сердцевины, баки для с/х
4	Радиаторы водяные для а/м
5	Радиаторы отопители для а/м

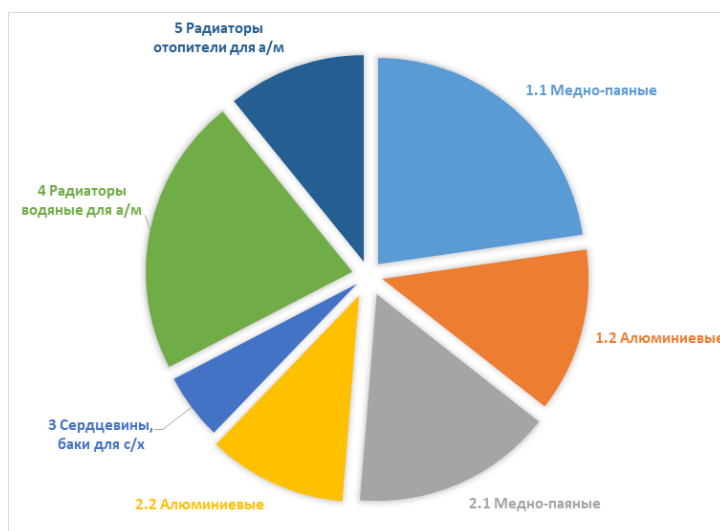


Рис. 1. Распределение производимой продукции по цене

Таблица 2

Значения коэффициентов учитывающих долю затрат электроэнергии для каждого вида продукции

№ п/п	Наименование продукции	Значение коэффициента, учитывающего долю затрат
1	Радиаторы водяные, масляные, ОНВ для с/х машин, в том числе:	
1.1	Медно-паяные	А
1.2	Алюминиевые	В
2	Блоки с/х, в том числе	
2.1	Медно-паяные	С
2.2	Алюминиевые	Д
3	Сердцевины, баки для с/х	Е
4	Радиаторы водяные для а/м	Ф
5	Радиаторы отопители для а/м	Г

Расчёт удельных норм потребления электроэнергии на производство радиаторной продукции выполняется по выражению:

$$H = k_i \times E_{т.н.} / \Pi_i \quad (1)$$

где k_i – коэффициент, учитывающий долю затрат электроэнергии на единицу i – вида продукции, выпускаемой предприятием в общей доле потребления электроэнергии на производство продукции; $E_{т.н.}$ – общее потребление электроэнергии на выпуск продукции, кВт; Π_i – количество изготовленной продукции i -вида.

В существующей методике нормирования не учитывается энергопотребление оборудования, используемого при выпуске продукции. Затраты электроэнергии относятся опосредовано к той или иной группе выпускаемой продукции.

Данный подход не позволяет оценить эффективность энергопотребления при выпуске продукции. Для совершенствования существующей методики нормирования



необходимо учитывать состав используемого оборудования для производства продукции, его режимы работы и время использования.

Для совершенствования процесса нормирования потребления ТЭР на предприятия предлагается использовать расчёт норм потребления электроэнергии для каждой группы выпущенной продукции с использованием расчётно-аналитического метода нормирования потребления ТЭР.

Расчётно-аналитический метод является наиболее прогрессивным методом определения норм, обеспечивающим логическую осмысленность, научную обоснованность и необходимую точность расчетов. При составлении норм расхода расчет ведется по статьям расхода, которые обусловлены, как правило, технологическим процессом производства данного вида продукции или работы. Это дает возможность достаточно хорошо учесть очевидные процессы производства, но не всегда позволяет выявить глубинные связи, которые определяют расходы энергоресурсов. Поэтому данному методу должен предшествовать теоретический анализ производственных процессов, имеющий целью выявление основных факторов и зависимостей, обуславливающих определенный уровень использования энергоресурса.

Для расчёта нормы потребления электроэнергии на выпуск радиаторной продукции необходимо определить перечень электропотребляющего оборудования, участвующего в производственном процессе, его установленную мощности, коэффициент использования и время использования (2).

$$E = \sum (K_{\text{исп } i\text{-го оборуд.}} \times P_{i\text{-го оборуд.}} \times T_{i\text{-го оборуд.}}), \quad (2)$$

где E – электроэнергия; K_i – коэффициент используемого i -го оборудования; P_i – мощность используемого i -го оборудования; T_i – время используемого i -го оборудования.

Возьмём для примера один конкретный вид продукции: радиатор водяной 238P.1301.100. В табл. 3 определен перечень электропотребляющего оборудования для его производства.

Таблица 3

Основное используемое электропотребляющее оборудование

Наименование оборудования	Мощность оборудования, кВт	Время использования, мин
ТЗА №10 А9000-4004	60	10
Газовый спекатор 1 поток	40	15
Ванна окунация 2 поток	30	5
Воздушный сборочный станок: электродвигатель компрессора	55	30
Сушильная камера	85	20

Результаты

Ввиду отсутствия на предприятии данных о фактическом коэффициенте использования оборудования необходимо произвести инструментальные замеры фактической потребляемой мощности электрооборудования, что позволит рассчитать норму потребления электроэнергии на выпуск радиатора водяного.



Выводы

Сравнивая две методики нормирования потребления ТЭР можно прийти к выводам:

1. В существующей методике не учитывается энергопотребление оборудования, используемого при выпуске продукции. Затраты электроэнергии относятся опосредованно к той или иной группе выпускаемой продукции. Отсутствует учёт режимов работы основного электропотребляющего оборудования, отсутствует значение коэффициента использования, задействованного в цепочке производства оборудования.

2. Расчётно-аналитический метод — это наиболее прогрессивный метод в области нормирования ТЭР. Для работы с этим методом необходимо учитывать коэффициент использования оборудования, режимы работы оборудования при выпуске той или иной продукции.

Для решения задач нормирования ТЭР могут использоваться различные численные методы, такие как методы линейного программирования, методы динамического программирования и другие. Компьютерное моделирование также может быть полезным инструментом для проведения расчетов и анализа результатов.

Применение расчётно-аналитического метода в нормировании ТЭР позволяет оптимизировать использование энергии и ресурсов, снизить затраты на производство и повысить эффективность процессов.

Библиографический список

1. Гринев А.В., Новикова О.В., Лозовский С.В. Повышение эффективности нормирования потребления энергоресурсов на промышленных предприятиях. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2013. № 5 (180). С. 54-59.
2. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б. Экономия энергии в промышленности: Уч. пос. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, НИЦЭ, 1998. 220 с.
3. Сергеева А.А., Запарнюк М.Н., Картавец С.В. Совершенствование методики нормирования ТЭР в промышленности. // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: мат-лы Всерос. научно-практ. конф. студ., асп. и мол. уч. с межд. участ. (Екатеринбург, 15–18 декабря 2015 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 210-212.



УДК 628.474:666.94

ПЕРЕРАБОТКА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В RDF-ТОПЛИВО С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПРОИЗВОДСТВОМ ЭНЕРГИИ И ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА КАК ОДИН ИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ИХ УТИЛИЗАЦИИ

Поломошнов К.В.

Научный руководитель – ст. преподаватель Валинеева А.А.

ФГБОУ ВО НИУ МЭИ, г. Москва

Аннотация

В статье представлены результаты исследования переработки твердых коммунальных отходов в RDF топливо с последующей выработкой энергии и получением на основе шлака строительной продукции. Способ утилизации коммунальных отходов путем переработки в альтернативное топливо универсален в силу одновременного решения сразу нескольких задач, а именно: повышение экологической обстановки, уменьшение площадей под свалки, создание альтернативного источника энергии, экономия природных ресурсов, создание аварийного источника тепло- или электроснабжения. По разработанной энергоресурсосберегающей схеме проведены расчеты теплового и материального балансов процесса горения RDF топлива при использовании дутья, обогащенного кислородом до 95%. Для рационального использования тепла отходящих газов предложено установить котел-утилизатор для выработки пара с выходными параметрами: 14 атмосфер и 310 °С. Выбарабатываемый пар отправляется либо на нужды потребителя, либо на выработку электрической энергии. Шлак, образующийся в ходе сжигания RDF топлива, будет использоваться в качестве базового компонента для получения плавящего цемента клинкера.

Ключевые слова: энергосбережение, экологическая обстановка, экономия, известняк, пар, котел-утилизатор, альтернативное топливо.

RECYCLING OF SOLID MUNICIPAL WASTE INTO RDF FUEL SUBSEQUENT PRODUCTION OF ENERGY AND CEMENT CLINKER AS ONE OF THE PROMISING WAYS OF THEIR DISPOSAL

Kirill Polomoshnov

Scientific Director – Senior Lecturer Anna Valineeva

Moscow Power Engineering Institute

Abstract

This article presents the results of the processing of solid municipal waste into RDF fuel study, with subsequent energy generation and the production of slag-based construction products. The method of municipal waste disposal by processing into alternative fuel is universal due to the simultaneous solution of several tasks at once, namely: improving the environmental situation, reducing landfill areas, creating an alternative energy source, saving natural resources, creating an emergency source of heat or electricity. According to the developed energy-saving scheme, calculations of the thermal balances of the combustion process of RDF fuel were carried out an oxidizer enriched with oxygen up to 95%. For the rational use of waste gas heat, it is proposed to install a heat recovery boiler for steam generation with output parameters: 14 atmospheres and 310°C. The extracted steam is sent either to the needs of the consumer or to generate electrical energy. The slag formed during to the combustion of RDF fuel will be used as a base component to produce fused cement clinker.

Keywords: energy saving, environmental situation, economy, limestone, steam, heat recovery boiler, alternative fuel.



Введение

Численность населения планеты с каждым годом только увеличивается, а это означает, что возрастают объемы образующихся отходов, причем как промышленных, так и коммунальных. Отсюда возникают проблемы утилизации отходов и сохранения минимально подходящего для жизнедеятельности уровня экологической обстановки. С увеличением численности населения планеты возрастает потребление ресурсов как природных, так и энергетических. С целью заботы о будущих поколениях активно решаются вопросы энергосбережения с помощью различных технологий. В качестве примеров можно привести вторичное использование сырья, разработку альтернативных источников энергии, сбор отслуживших свой срок изделий с последующей отправкой на переработку.

Одним из перспективных способов одновременного энергосбережения ресурсов и повышения экологической обстановки является переработка твердых коммунальных отходов в альтернативное РДФ топливо. Итак, РДФ топливо представляет собой продукт переработки твердых коммунальных отходов. В качестве его достоинств как топлива можно отметить возможность сохранения природных энергоносителей, универсальность мест получения РДФ топлива, так и способов его использования. Однако данная технология не лишена своих недостатков, среди которых необходимость многоступенчатой подготовки коммунальных отходов к трансформации в качественное топливо.

Если посмотреть на мировую картину, то технология высокотемпературной утилизации коммунальных отходов нашла применение в Японии в силу невозможности наличия мусорных полигонов из-за малой площади страны, а также высокого уровня технологического развития страны в целом.

Целью данного исследования является доказательство обоснованности использования утилизации коммунальных отходов путем переработки в РДФ топливо как одного из перспективных способов решения вопросов их утилизации и экономии природных ресурсов.

Задачи работы: разработка технологии переработки коммунальных отходов в РДФ топливо с последующим получением цементного клинкера, подбор второстепенного оборудования, расчет затрат на реализацию, определение объемов экономии природных ресурсов.

Материалы и методы

Гипотеза: предполагается, что переработка коммунальных отходов в РДФ топливо с последующим его использованием является одним из полномасштабных способов экономии природных энергоносителей и ресурсов, а также весьма эффективным способом повышения экологической обстановки населенного пункта, в котором данная технология будет дислоцироваться [1].

В качестве объекта исследования была принята схема технологии полного цикла получения РДФ топлива с последующим его использованием в плавильном агрегате «МАГМА», а также утилизацией тепла отходящих газов и получением плавленого цементного клинкера в качестве технологического продукта, изображенная на рис. 1. На данном рис. представлено как основное оборудование, так и дополнительное и приведены результаты расчета температуры и расхода потоков по каждому этапу технологии.

В качестве исходных данных были приняты:

- рассчитанный состав РДФ топлива, представленный в табл. 1;
- производительность по коммунальным отходам, равная 5,89 кг/с;
- производительность по РДФ топливу, равная 5 кг/с.



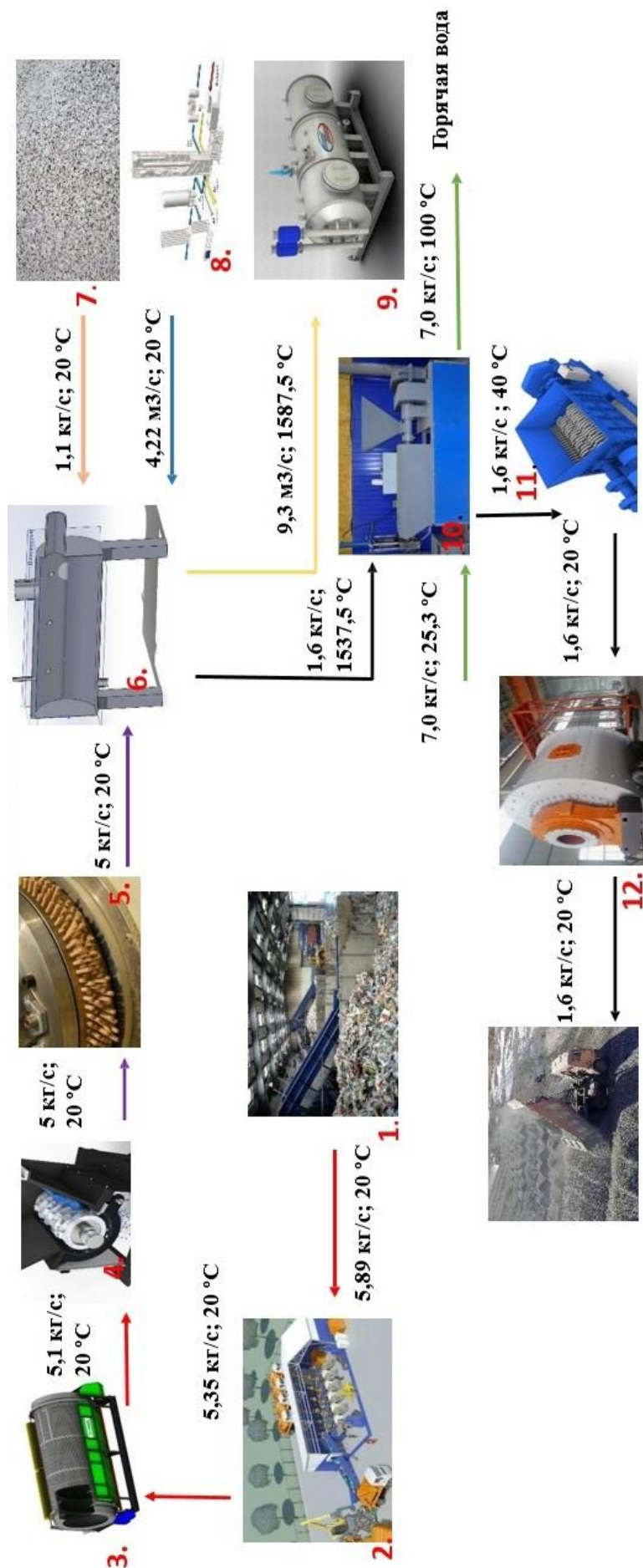


Рис.1. Схема переработки коммунальных отходов полного цикла:

1 – бункер ТКО; 2 – цех сортировки; 3 – сепарационная установка; 4 – дробилка; 5 – гранулятор РДФ топлива; 6 – плавильный агрегат «МАГМА»; 7 – добавка к шлаку от сжигания; 8 – генератор технического кислорода; 9 – котел-утилизатор; 10 – гранулятор шлака с водяной рубашкой охлаждения; 11 – дробилка клинкера; 12 – мельница; 13 – склад готовой продукции

Основное оборудование

В качестве технологического реактора был задействован плавильный агрегат «МАГМА» в силу своей многозадачности и универсальности. Результаты расчетов материального и теплового балансов процесса горения в данном агрегате представлены в табл. 2 и 3. На рис. 2 и 3 представлена общая информация по данному реактору, а именно общие параметры и сферы применения, исходя из которых можно сделать вывод о том, что данный агрегат в большей степени ориентирован на металлургическую промышленность, но вполне применим и в качестве плавильной печи для производства цемента [2, 3].

Таблица 1

Химический состав РДФ по элементам

	$C_p, \%$	$H_p, \%$	$O_p, \%$	$N_p, \%$	$S_p, \%$	$A_p, \%$	$W_p, \%$	Доля в РДФ, %
Бумага	32,70	3,70	28,30	0,16	0,14	15,00	20,00	32,58
Пластик	55,10	7,60	17,50	0,90	0,30	10,60	8,00	13,48
Текстиль	44,40	4,90	23,20	3,40	1,10	8,00	15,00	6,18
Пищевые отходы	12,60	1,80	12,00	0,95	0,15	450	68,00	31,01
Древесина	40,50	4,80	35,80	0,10	0	0,80	18,00	1,69
Резина	65,00	5,00	12,60	0,20	0,60	11,60	5,00	2,81
Ост.	47,00	5,30	27,70	0,10	0,20	11,70	8,00	12,25
Итого	33,00	3,96	21,09	0,69	0,24	9,98	31,04	100

Таблица 2

Материальный баланс процесса горения РДФ в АПМ «МАГМА»

Величина	Единица измерения	Значение
Теоретический расход кислорода	$M_{O_2}^3 / \text{кгРДФ}$	0,668
Теоретический расход окислителя	$M_{ок}^3 / \text{кгРДФ}$	0,704
Действительный расход окислителя	$M_{ок}^3 / \text{кгРДФ}$	0,844
Действительный расход кислорода	$M_{O_2}^3 / \text{кгРДФ}$	0,160
Выход водяных паров	$M_{H_2O}^3 / \text{кгРДФ}$	0,427
Выход трехатомных газов	$M_{CO_2}^3 / \text{кгРДФ}$	0,598
Выход азота	$M_{N_2}^3 / \text{кгРДФ}$	0,837
Общий выход продуктов горения	$M_{пг}^3 / \text{кгРДФ}$	1,862

Таблица 3

Тепловой баланс процесса горения в АПМ «МАГМА»

Приход	кВт	%	Расход	кВт	%
$Q_{топ}^{физ}$	272,1	0,350	$Q_{пот}^{хим}$	2 271	3,000
$Q_{топ}^{хим}$	75 250	99,420	$Q_{пот}^{о.с.}$	3 785	5,000
$Q_{ок}^{физ}$	115,0	0,150	$Q_{пот}^{о.г.}$	67 230	88,810
$Q_{ок}^{хим}$	0	0,000	$Q_{энд}^{разл.}$	17,34	0,002
$Q_{доб}^{физ}$	61,40	0,080	$Q_{пот}^{шлак}$	2 416	2,887
$Q_{прих}^{сумм}$	75 700	100	$Q_{расх}^{сумм}$	75 700	100

Для утилизации теплоты отходящих газов используется водотрубный котел-утилизатор, поверхности нагрева которого работают по принципу рекуперативного теплообменника. В силу большого объема отходящих газов после АПМ «МАГМА» применяется параллельная установка котлов-утилизаторов в количестве 5 штук с теплотехнологическими и геометрическими параметрами, представленными в табл. 4 и 5 [4-6].



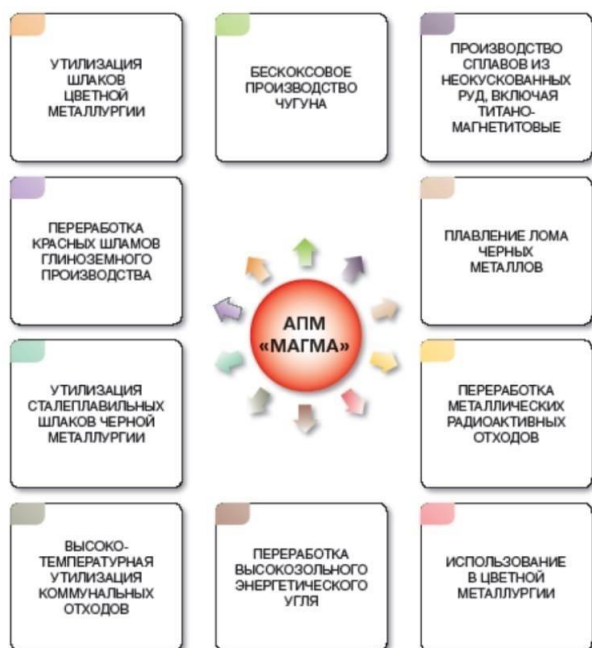


Рис.2. Сферы применения АПМ «МАГМА»

Тепловая мощность, МВт	до 100
Виды топлива	природный газ, энергетический уголь
Окислитель	технический кислород (95% O ₂)
Температура металла в жидкой ванне, °С	1350-1550
Температура шлакового расплава, °С	1400-1650
Температура газовой фазы в свободном пространстве, (над шлаковым расплавом), °С	1800-1900
Габариты плавильной камеры:	
наружный диаметр, м	4
длина, м	9
Материал плавильной камеры	котельная легированная сталь
Охлаждение корпуса плавильной камеры	жидкометаллический теплоноситель
Футеровка ванны	периклазоуглеродистый или высокоглиноземистый кирпич
Футеровка в шлаковой зоне плавильной камеры	гарнисаж шлаковый

Рис. 3. Технологические параметры АПМ «МАГМА»

Таблица 4

Геометрические параметры используемого котла-утилизатора

Величина	Единица измерения	Значение
Энтальпия перегретого пара	кДж / кг _{пара}	3063,000
Энтальпия питательной воды	кДж / кг _{воды}	420,000
Площадь нагрева ПП	м ²	28,568
Длина змеевика ПП	м	18,492
Число петель	шт	7,330 (принимаем 8)
Высота пакета	м	0,642
Площадь нагрева ИСП	м ²	745,660
Длина змеевика ИСП	м	482,660
Число петель	шт	152,520 (принимаем 153)
Высота пакета	м	10,740
Площадь нагрева ВЭ	м ²	1416,000
Длина змеевика ВЭ	м	894,600
Число петель	шт	211,380 (принимаем 212)
Высота пакета	м	16,641

Таблица 5

Теплотехнологические параметры котла-утилизатора

Величина	Единица измерения	Значение
Энтальпия питательной воды	кДж / кг _{воды}	420,00
Энтальпия отходящих газов	кДж / кг _{о.г.}	13300,00
Энтальпия уходящих газов	кДж / кг _{у.г.}	1008,00
Энтальпия перегретого пара	кДж / кг _{пара}	3063,00
Удельная паропроизводительность	кг _{пара} /с	4,66
Общая паропроизводительность	кг _{пара} /с	23,31



Вспомогательное оборудование

В качестве вспомогательного оборудования используется ряд подготовительных установок, которые необходимы для переработки коммунальных отходов в РДФ топливо. Среди них можно выделить сортировочные станции, дробилки, мельницы, сепарационные установки, грануляторы, дымовую трубу и воздуходелительную станцию. Результаты расчета габаритов дымовой трубы представлены в табл. 6.

Таблица 6

Габариты используемой дымовой трубы

Величина	Единица измерения	Значение
Массовый выброс пыли	г/с	0,021
Массовый выброс трехатомных газов	г/с	2550
Диаметр трубы	м	0,505
Высота трубы	м	67,614

Принципиальная схема воздуходелительной станции изображена на рис. 4. Принцип работы данного типа станций основан на жидкофазной ректификации. Поступающий из атмосферы воздух проходит компрессор, блок комплексной очистки, камеру низкотемпературной подготовки и секцию охлаждения воздуха. Далее сжиженный воздух проходит через ректификационную колонну, в которой на выходе получают 3 продукта: аргон, азот и кислород [7].

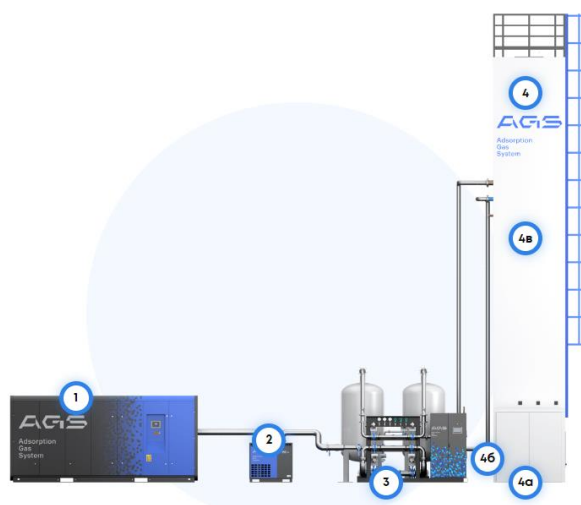


Рис. 4. Принципиальная схема воздуходелительной станции

Экономика

Проведено технико-экономическое обоснование разрабатываемого проекта, в ходе которого доказана конкурентоспособность альтернативного источника энергии по сравнению с природным сырьем, что показано в табл. 7.

Таблица 7

Сравнительный анализ использования угля и РДФ

Топливо		РДФ	Уголь
Низшая теплота сгорания	МДж/кг	15,05	16,74
Эквивалент в условном топливе	кг/год	$8,099 \cdot 10^7$	$9,009 \cdot 10^7$
Выработка электроэнергии	ГВт·ч/год	267,3	297,32
Выработка теплоты	ГКал/год	$1,238 \cdot 10^5$	$1,377 \cdot 10^5$

Определена годовая выработка электрической и тепловой энергии независимо друг от друга. Выяснено, что разрабатываемый объект может быть использован для тепло- или электроснабжения небольшого жилого района численностью 25-30 тыс. человек. Результаты определения выработки представлены в табл. 8.



Таблица 8

Определение годовой выработки энергии

Величина	Единица измерения	Значение
Посекундный выход пара	кг/с	23,31
Годовой расход РДФ топлива	кг/год	$1,577 \cdot 10^8$
Годовая выработка пара	кг/год	$7,253 \cdot 10^5$
Годовой расход условного топлива	кг/год	$8,099 \cdot 10^7$
Годовая выработка электроэнергии	ГВт·ч/год	267,3
Годовая выработка теплоты	ГКал/год	$1,238 \cdot 10^5$

Проведен расчет срока окупаемости данного проекта при капитальных затратах в 8,2 млрд. рублей. По результатам данного расчета был определен срок окупаемости в 12,5 лет при затратах на закупку оборудования, амортизацию, налоги и зарплату сотрудникам. По полученному сроку окупаемости следует вывод о том, что данный проект не может рассматриваться, как бизнес-проект в силу большого срока окупаемости по сравнению со средними сроками окупаемости бизнес-проектов, составляющих 5-8 лет. Результаты расчета представлены в табл. 9.

Таблица 9

Определение срока окупаемости проекта

Величина	Единица измерения	Значение
Капитальные затраты	млрд. руб.	8,19
Годовая выручка с продажи электроэнергии	руб/год	300 000 000
Годовая выручка с продажи тепловой энергии	руб/год	230 000 000
Секундный выход цементного клинкера	кг/с	1,603
Годовая производительность по цементному клинкеру	руб/год	50 550
Усредненная цена за 1 тонну цементного клинкера	руб/год	11 000
Годовая выручка с продажи цементного клинкера	руб/год	556 000 000
Общая годовая прибыль	руб/год	1 086 000 000
Затраты на закупку оборудования	руб/год	108 600 00
Затраты на зарплату сотрудникам	руб/год	81 460 000
Затраты на налоги	руб/год	241 700 000
Затраты на амортизацию	руб/год	4 073 000
Чистая прибыль	руб/год	650 440 000
Срок окупаемости	год	12,5

Результаты

По итогам проведенного исследования было выяснено, что способ утилизации коммунальных отходов путем переработки в РДФ топливо с последующим сжиганием позволяет сэкономить до 90 тыс. тонн природных энергоресурсов в условном эквиваленте.

Касаемо экономии сырья, данный способ утилизации отходов позволяет получать до 50,5 тыс. тонн цементного клинкера ежегодно, что эквивалентно 0,56 млрд. руб.

За счет больших объемов выработки энергии, данный проект может расцениваться как источник электро- или теплоснабжения небольшого жилого района численностью 25-30 тыс. человек.

Приведено технико-экономическое обоснование возможности реализации данного проекта, по результатам которого был получен срок окупаемости составляющий 12,5 лет.



Выводы

Доказано, что способ переработки коммунальных отходов в РДФ топливо с последующим производством энергии и цементного клинкера действительно является одним из перспективных способов одновременного решения вопросов утилизации отходов, экономии природных энергоресурсов и улучшения экологической обстановки.

Для утилизации коммунальных отходов таким методом необходимо многоступенчатое подготовительное оборудование, не допускающее попадания в состав РДФ топлива токсичных составляющих, медикаментозных отходов, а также строительных отходов.

Экономия природных энергоносителей достигается за счет повышения теплоты сгорания РДФ топлива, уменьшения удельной доли влаги в химическом составе отходов на подготовительных этапах и увеличения их насыпной плотности.

Экономия сырья достигается за счет использования шлака от сжигания РДФ топлива для получения цементного клинкера.

Данная технология позволяет улучшать экологическую обстановку за счет ликвидации свалок и мусорных полигонов, а выбросы в атмосферу минимизируются за счет установки дымовой трубы после котлов-утилизаторов.

Библиографический список

1. Кикава О.Ш. Утилизация золы и шлака мусоросжигательных заводов (в помощь малому бизнесу в области экологии). М.: СигналЪ, 2000. 44 с.
2. Проект «МАГМА» [Электронный ресурс]: Челябинск: Технология металлов. [2023]. URL: http://www.metalstech.ru/upload/document/MAGMA%20Booklet%20-%20Multipurpose%20smelting%20unit%20and%20its%20application_Ru.pdf. (дата обращения: 27.06.2023)
3. Перелетов И.И., Попов С.К. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 32 с.
4. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод / Под ред. Н. В. Кузнецова и др. М.: Энергия, 1973. – 295 с.
5. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / А.П. Воинов, В.А. Зайцев, Л.И. Куперман, Л.Н. Сидельковский; Под ред. Л.Н. Сидельковского. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
6. Котельные установки и парогенераторы: учебное пособие / Б.А. Соколов, В.Н. Кузьмин, И.М. Бернадинер и др. М.: МЭИ, 2020. 56 с.
7. Криогенные воздухоразделительные станции [Сайт]: Адсорбционные газовые системы. [2023]. URL: <https://agse.ru>. (Дата обращения: 27.06.2023)

References

1. Kikaeva, O. Sh. (2000). *Utilizaciya zoly i shlaka musoroszhigatel'nyh zavodov [Disposal of ash and slag from incinerators]*. Signal Press [In Russian]
2. Metall technology (n.d.) *Proekt «MAGMA» [Project «MAGMA»]*. Retrieved June 27, 2023, from http://www.metalstech.ru/upload/document/MAGMA%20Booklet%20-%20Multipurpose%20smelting%20unit%20and%20its%20application_Ru.pdf [In Russian]
3. Perepletov, I. I., & Popov, S.K. (2000). *Vysokotemperaturnye teplotekhnologicheskie processy i ustanovki. Sbornik Zadach: metodicheskoe posobie [High-temperature heat-technological process and installations. Collection of tasks: a methodological guide]*. MPEI Press. [In Russian]
4. Kuznetsov, N. V. (1973). *Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov: Normativnyj metod [Thermal calculation of boiler units: Standard method]*. Energy. [In Russian]
5. Voinov, A. P., Zaitsev, V. A., Kuperman, L. I., & Sidelkovscii, L. N. (1973). *Kotly-utilizatory i energotekhnologicheskie agregaty [Heat recovery boilers and power technology units]*. MPEI Press. [In Russian]
6. Sokolov, B. A., Kuzmin, V. N., & Bernadiner, I. M. (2020). *Kotel'nye ustanovki i parogeneratory [Boiler installations and steam generators]*. MPEI Press. [In Russian]
7. AGS (n.d.) *Kriogennye vozduhorazdelitel'nye stancii [Cryogenic air separation stations]*. Retrieved June, 27, 2023, from <https://agse.ru>. [In Russian]



ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА В ЖАРОТРУБНОМ КОТЛЕ

Шевяков М.Ю., Жихарева В.Р.

Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Петин С.Н.

Национальный исследовательский университет "МЭИ" г. Москва

Аннотация

В данной работе был произведен тепловой расчет трехходовой топочной камеры котла Viessmann Vitomax 200HW, с целью определения количества тепла, которое данная топочная камера способна воспринять при переходе с использования природного газа на метано-водородную смесь. Помимо этого, был осуществлен детальный обзор проблемы парниковых газов и предложены различные способы ее решения. Кроме того, был рассмотрен принцип работы данного котла, а также представлена его подробная режимная карта работы. Проведены расчеты процессов горения метано-водородной смеси, после которых получены следующие результаты: низшая теплота сгорания топлива, расход топлива, расход окислителя и расход продуктов сгорания. Также был вычислен коэффициент ослабления лучей, на основании которого был получен лучистый тепловой поток. Был также рассчитан коэффициент теплоотдачи в топке, по которому был определен конвективный тепловой поток. В итоге всех проведенных расчетов была получена зависимость полного воспринимаемого топкой теплового потока. Такие данные позволят значительно точнее оценить эффективность работы данного котла при использовании метано-водородной смеси вместо природного газа. Это имеет важное значение для принятия обоснованных решений о выборе топлива и оптимальном использовании ресурсов в процессе работы котла.

Ключевые слова: водород, жаротрубный котел, метано-водородная смесь (МВС), топливо, продукты сгорания, тепло, лучистый теплообмен, конвективный теплообмен, жаровая труба.

STUDY ON THE USE OF HYDROGEN-CONTAINING GAS IN A FIRE-TUBE BOILER

Mikhail Shevyakov, Valeria Zhikhareva

Scientific adviser: Ph.D. tech. Sciences, Assoc. Sergey Petin.

National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow

Abstract

This study presents the thermal calculation of the three-pass combustion chamber of the Viessmann Vitomax 200HW boiler, with the aim of determining the amount of heat that this combustion chamber can absorb when transitioning from natural gas to a methane-hydrogen mixture. Additionally, a detailed overview of the greenhouse gas problem is provided, along with various proposed solutions. Furthermore, the operational principle of the boiler is examined, and a comprehensive operating map is presented. Calculation of the combustion processes of the methane-hydrogen mixture resulted in determining the lower heating value of the fuel, fuel consumption, oxidizer consumption, and combustion product consumption. The radiation attenuation coefficient was derived, which enabled the calculation of the radiative heat flux. The convective heat flux was determined based on the calculation of the heat transfer coefficient in the combustion chamber. Ultimately, a relationship for the total heat flux absorbed by the combustion chamber was obtained.



These findings allow for a more accurate assessment of the boiler's effectiveness when using a methane-hydrogen mixture instead of natural gas. This information is crucial for making informed decisions regarding fuel selection and optimizing resource usage during boiler operation.

Keywords: hydrogen, fire-tube boiler, methane-hydrogen mixture (MHM), fuel, combustion products, heat, radiative heat transfer, convective heat transfer, fire-tube.

Введение

Проблема глобального потепления, вызванного антропогенными выбросами парниковых газов, становится все более актуальной в мире [1]. Для борьбы с негативными последствиями изменения климата, большинство стран мира присоединилось к Парижскому соглашению [2], которое направлено на сокращение глобальных выбросов парниковых газов и ограничение повышения климатической температуры не более, чем на 2 °C в этом веке. Каждая страна, следуя данному соглашению, объявляет свои климатические цели и обязательства по сокращению выбросов парниковых газов. Планируется обеспечить углеродную нейтральность к 2050–2060 гг. Россия, которая также подписала Парижское соглашение в 2016 году, ставит перед собой цель сокращения выбросов парниковых газов на 70% к 2030 году относительно уровня 1990 года, разработку стратегии по снижению выбросов до 2050 года и создание условий для реализации мер по сокращению и предотвращению выбросов [3]. Перспективным решением для уменьшения выбросов углекислого газа в сфере тепло- и электроэнергетики является сжигание метано-водородной смеси (МВС), что позволит снизить выбросы углекислотного газа в атмосферу. Но переход на МВС может вызвать изменения в теплотехнических характеристиках теплоиспользующего оборудования, что необходимо предусмотреть в научных исследованиях.

Актуальность проблемы

Основные парниковые газы на Земле (водяной пар, углекислый газ, метан, оксид азота и озон) имеют высокую поглощающую способность в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах, что вызывает парниковый эффект и глобальное потепление. Стоит отметить, что в соответствии с Киотским протоколом пары воды не включены в список парниковых газов. Антропогенные галогенированные углеводороды также могут внести свой вклад, но их влияние проблематично из-за их низкой концентрации в атмосфере. Поэтому основным акцентом в решении проблемы глобального потепления является снижение выбросов углекислого газа. Основные антропогенные источники выбросов парниковых газов - теплоэнергетика (29%), промышленность (18%), транспорт (13%), сельское хозяйство (11%), сжигание газа и утечки метана (8%) [4]. Для снижения выбросов углекислого газа на ТЭС и в котельных используются переход на природный газ, повышение КПД конденсационной электростанции, внедрение когенерации тепловой и электрической энергии, а также внедрение парогазовых установок. Структурные изменения в электроэнергетике могут привести к ускоренному развитию возобновляемых источников энергии, распределенной генерации и систем накопления энергии. В [5] указывается, что использование метано-водородной смеси (МВС) взамен природного газа позволит снизить выбросы CO₂ в атмосферу. Для перехода на МВС от природного газа необходимо предусмотреть возможное изменение теплотехнических характеристик оборудования.

Цель работы

Провести исследование использования МВС с различной долей водорода взамен природного газа на жаротрубном водогрейном котле Viessmann Vitomax 200HW в пределах топочной камеры (жаровой трубы).



Материалы и методы (Materials and Methods)

Исследование теплотехнических характеристик при переходе с природного газа на МВС планируется изучить на примере водогрейного жаротрубного котла с трехходовой системой газоходов с двумя поворотными камерами сгорания - Viessmann Vitomax 200HW. Устройство и внешний вид котла представлен на рис. 1 и 2 соответственно, основные технические характеристики представлены в табл. 1, а режимная карта котла в табл. 2 [6].

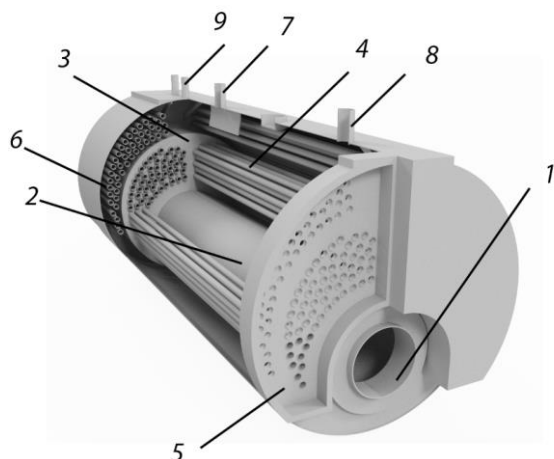


Рис. 1. Устройство водогрейного котла Viessmann Vitomax 200HW

1 - водоохлаждаемое крепление горелки; 2 – жаровая труба (первый газоход); 3 – задняя поворотная камера; 4 – второй газоход; 5 – фронтальная поворотная камера; 6 – третий газоход; 7 – патрубок обратной магистрали; 8 – патрубок подающей магистрали; 9 – патрубки установки предохранительных клапанов

Рис. 2. Внешний вид водогрейного котла Viessmann Vitomax 200HW

Таблица 1

Технические характеристики водогрейного котла Vitomax 200HW

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Значение
1	Рабочее давление котла	бар	6
2	Допустимая температура подачи	°С	145
3	Мощность котла	кВт	8000
4	КПД брутто	%	92
5	Поверхность нагрева	м ²	275
6	Водяной объем котла	м ³	22,0
7	Масса котла без воды	т	19,1
8	Габариты (д/ш/в)	мм	7100/3200/3500

Таблица 2

Режимная карта водогрейного котла Viessmann Vitomax 200HW с газовой модулируемой моноблочной горелкой G70/3-A, Weishaupt

№	Наименование	Ед. изм.	Обозначения	Способ получения	Нагрузка, %				
					25	40,1	60,7	80,7	99
1	Заданные параметры:								
1.1.	Теплопроизводительность фактическая	МВт	Q_k	расчёт	2	3,21	4,86	6,46	7,92
1.2.	Низшая теплота сгорания топлива	ккал/м ³	$Q_{pн}$	исходные данные	7895	7895	7895	7895	7895
2	Оперативные параметры								
2.1	Расход топлива	нм ³ /ч	$V_{пр}$	измерение	231	371,5	557,3	766,3	928,8
2.2.	Давление газа на отпуске к котлу	бар	$P_{оп}$	измерение	2,80	2,85	2,82	2,81	2,80
2.3.	Давление газа перед моноблоком (горелкой)	мбар	$P_{мон}$	измерение	104	103	100	97	90
2.4.	Перепад давления воздуха	мбар	$P_{возд}$	измерение	45,2	40,6	34,3	25,4	38,1
2.5.	Температура воздуха на горение	°С	$t_{возд}$	измерение	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6
2.6.	Расход воды через котёл	м ³ /ч	G_k	расчёт	114,5	114,5	114,5	114,5	114,5
2.7.	Температура воды на входе в котёл	°С	$t_{вх}$	измерение	51,6	53,8	53,3	53,4	53,5
2.8.	Температура воды на выходе с котла	°С	$t_{вых}$	измерение	74,7	85,3	94,5	102,9	109,7
2.9.	Температурный перепад	°С	Δt	расчёт	23,1	31,5	41,5	49,5	56,1
2.10.	Давление воды на входе в котёл	кгс/см ²	$P_{вх}$	измерение	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
2.11.	Давление воды на выходе с котла	кгс/см ²	$P_{вых}$	измерение	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
2.12.	Гидравлическое сопротивление	кгс/см ²	Δp	расчёт	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3.	Контрольные параметры								
3.1.	Температура уходящих газов	°С	$t_{уг.}$	измерение	127,3	131,8	138,5	151,7	173,1
3.2.	Содержание в уходящих газах:								
	O ₂ (кислорода)	%	O ₂	измерение	3,5	3,1	3,7	3,7	3,5
	CO (оксида углерода)	ppm	CO	измерение	99	100	100	104	105
	CO ₂ (оксида углерода)	%	CO ₂	измерение	10,1	10,2	9,9	9,9	10
3.3.	Разрежение за котлом	мбар	S_k	измерение	2,7	2,6	2,3	1,9	1,4
3.4.	Коэффициент избытка воздуха	-	α	расчет	1,18	1,16	1,19	1,19	1,18



Окончание табл. 2

№	Наименование	Ед. изм.	Обозначения	Способ получения	Нагрузка, %				
					25	40,1	60,7	80,7	99
4.	Экономические показатели котла								
4.1.	Потери теплоты с уходящими газами	q_2	%	расчет	4,89	5,07	5,51	6,15	7,12
4.2.	Потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива	q_3	%	расчет	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$
4.3.	Потери теплоты в окружающую среду через наружные ограждения котла	q_5	%	расчет	0,29	0,18	0,12	0,09	0,07
4.4.	КПД котла (брутто)	%	η	расчет	94,82	94,74	94,37	93,77	92,80
4.5.	Удельный расход условного топлива на вырабатываемую тепловую энергию	$b_{ут}$	кг у.т. /Гкал	расчет	150,7	150,8	151,4	152,4	153,9
4.6.	Удельный расход натурального топлива на вырабатываемую тепловую энергию	$b_{нт}$	м ³ /Гкал	расчет	122,3	122,4	122,8	123,6	124,9

Описание работы котла

Газовое топливо и окислитель (воздух) поступают в горелочное устройство без предварительного смешения. Далее газовая смесь проходит внутри горелочного устройства, которое опирается на водоохлаждаемое крепление горелки 1. Продукты сгорания из горелочного устройства проходят через жаровую трубу (первый газоход) 2 и направляются в заднюю поворотную камеру 3. Затем по трубам второго газохода 4 они попадают во фронтальную поворотную камеру 5 и по трубам третьего газохода 6 через патрубок уходящих газов поступают в систему выхлопа. Вода из обратной магистрали 7 поступает в котел, заполняя всё внутреннее пространство, нагревается уходящими газами и выходит в патрубок прямой магистрали 8. Так же на котле расположены патрубки установки предохранительных клапанов 9.

Результаты

Расчет топочной камеры котельного агрегата при использовании МВС (метановодородной смеси) с различным соотношением водорода был произведен в среде Mathcad при использовании модуля расчета «Калориметрическая температура горения» в <https://popovsk.mpei.ru> [7].

Результаты расчетов показаны на графиках рис. 3 – 5 из которых видно, что с увеличением процентного содержания водорода в МВС низшая теплота сгорания газа (Q_n^p) уменьшается, что приводит к необходимости увеличения расхода топлива (B_T), но несмотря на увеличение расхода топлива идет снижение расхода окислителя ($G_{ок}$) и продуктов сгорания, что представлено на рис. 4. На рис. 5 изображен график зависимости состава продуктов сгорания от содержания водорода в МВС. Как видно из графика, объемная доля углекислого газа уходит в ноль, так как при сжигании чистого водорода



углеводороды в топливе отсутствуют. Несмотря на это, процентное содержание трехатомных газов при повышении доли водорода увеличивается. Это объясняется тем, что при сжигании водорода выделяется значительный объем водяных паров.

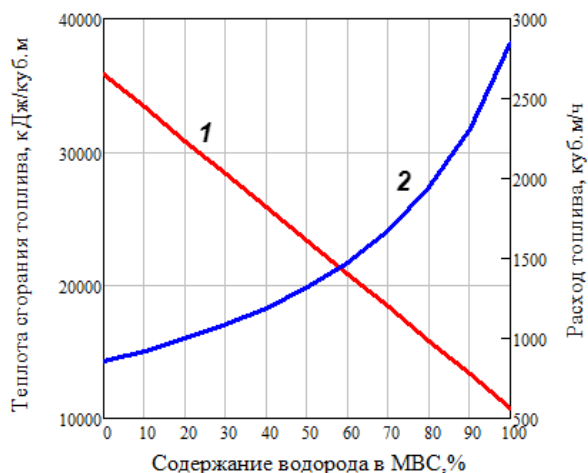


Рис. 3. Зависимость низшей теплоты сгорания и расхода топлива от содержания водорода в МВС:

1 – низшая теплота сгорания, Q_H^p ; 2 – расход топлива, B_T

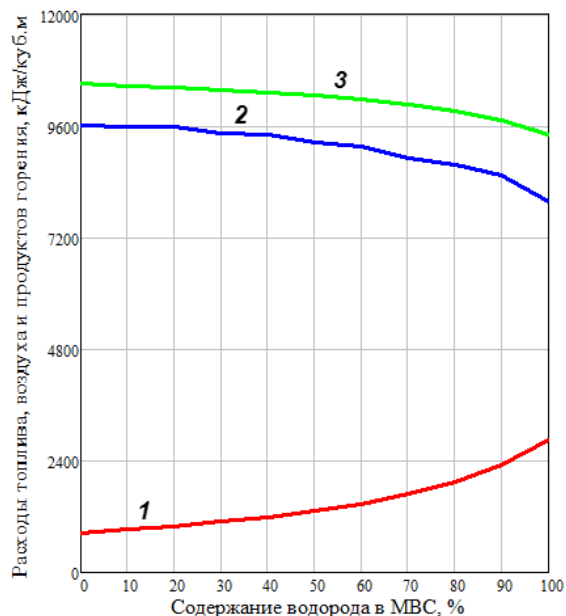


Рис. 4. Зависимость расходов топлива, окислителя и продуктов горения от содержания водорода в МВС:

1 – расход топлива - B_T , м³/час; 2 – расход окислителя - $G_{ок}$, м³/час; 3 – расход продуктов горения $G_{пг}$, м³/час

На основании проведенных расчетов процессов горения проводится расчет топочной камеры (жаровой трубы) исследуемого котельного агрегата для изучения количества тепла, воспринятое топочной камерой при использовании [8].

Тепло, воспринятое топочной камерой (жаровой трубой), определяется по уравнениям теплообмена, кДж/м³:

$$Q_T = Q_L + Q_K.$$

Лучистое тепло, воспринятое топкой, кДж/м³:

$$Q_L = \sigma_0 \cdot \frac{\alpha_K \cdot H_L}{B} \cdot (T_\Phi^4 - T_3^4),$$

где $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-11}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, кВт/(м²·К⁴); α_K – приведенная степень черноты камеры; H_L – лучевоспринимающая поверхность стен топочной камеры, м²; T_Φ – эффективная температура топочной среды, °С; T_3 – температура наружного слоя лучевоспринимающей поверхности, °С; B – расход топлива, м³/ч.

Конвективное количество тепла, воспринятое топочной камерой, кДж/м³:

$$Q_K = \frac{\alpha_K^T \cdot H \cdot (T_\Phi - T_3)}{B},$$

где H – поверхность нагрева топочной камеры, м²; α_K^T – коэффициент теплоотдачи конвекцией в топке, Вт/(м²·К).



На рис. 4 показаны зависимости тепла, воспринятого топкой, в зависимости от содержания водорода из которых видно, что идет снижение лучистой (на 64,5%) и конвективной (на 69,1%) составляющих теплового потока. Тепло, воспринятое жаровой трубой, уменьшается на 65,3%.

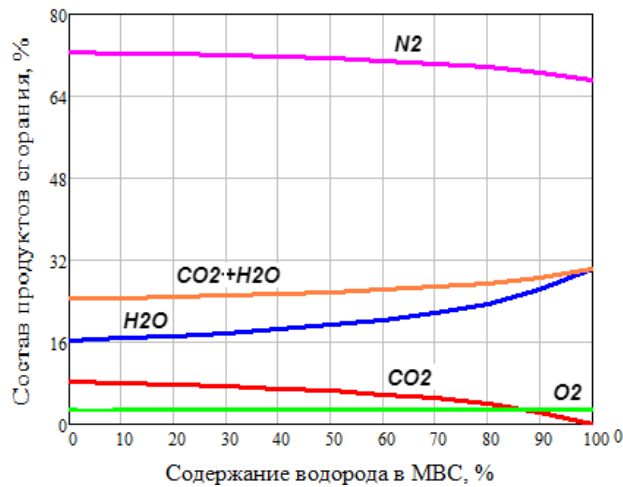


Рис. 5. Зависимость состава продуктов сгорания от содержания водорода в МВС

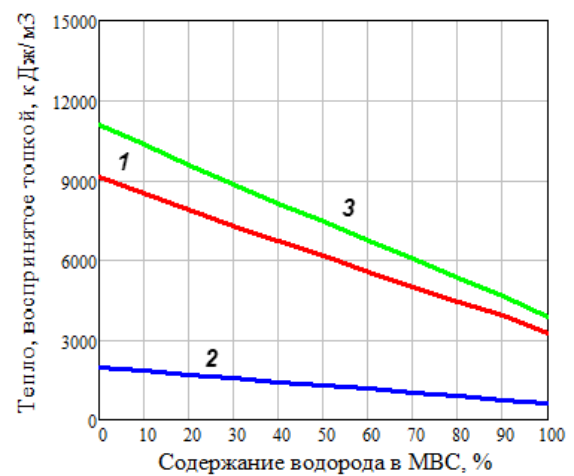


Рис. 6. Теплота, воспринятая топкой, в зависимости от содержания водорода в МВС: 1 - лучистое тепло, воспринятое топкой, Q_L , кДж/м³; 2 - конвективное количество тепла, воспринятое топочной камерой, Q_K , кДж/м³; 3 - тепло, воспринятое жаровой трубой, Q_T , кДж/м³

Значение лучистой составляющей теплоты зависит от приведенной степени черноты камеры, которая в свою очередь имеет зависимость от коэффициента ослабления лучей светящейся частью факела k_{CB} , который определяется по формуле:

$$k_{CB} = k_r^0 \cdot r_{II} + k_c$$

где $k = k_r^0 \cdot r_{II}$ – коэффициент ослабления лучей несветящейся частью факела, 1/(МПа):

$$k = k_r^0 \cdot r_{II} = \left(\frac{7.8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_{II} \cdot S_{\text{эф}}}} \right) \cdot (1 - 0.37 \cdot 10^{-3} \cdot T_T'') \cdot r_{II}$$

где r_{II} – суммарная доля водяных паров и трехатомных газов; p – давление в топочной камере, $p = 0,1$ МПа; $S_{\text{эф}}$ – эффективная толщина излучающего слоя топки, м; k_c – коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами, 1/(МПа), считается по формуле:

$$k_c = \frac{1.2}{1+\alpha^2} \left(0,12 \sum \frac{m}{n} C_m H_n \right)^{0.4} \cdot (1.6 \cdot 10^{-3} \cdot T_T'' - 0.5)$$

где m и n – количества атомов углерода и водорода в соединениях; $C_m H_n$ – содержание предельных и непредельных углеводородов в газе, %.

Из графика на рис. 7 видно, что коэффициент ослабления лучей несветящейся частью факела k возрастает, так как он зависит от растущей суммарной доли водяных паров и трехатомных газов.

В свою очередь коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами уходит в ноль из-за снижения содержания углерода по мере возрастания водорода в МВС.

На рис. 8 представлена зависимость коэффициента теплоотдачи конвекцией в топке от содержания водорода в МВС.



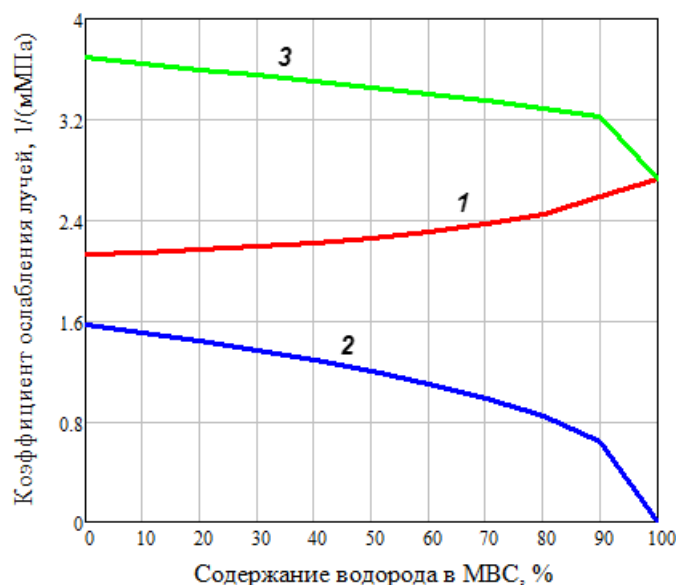


Рис. 7. Зависимость коэффициентов ослабления лучей от содержания водорода в МВС

- 1 – коэффициент ослабления лучей несветящейся частью факела - k , 1/(ммПа);
- 2 – коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами - k_c , 1/(ммПа);
- 3 – коэффициент ослабления лучей светящейся частью факела k , 1/(ммПа)

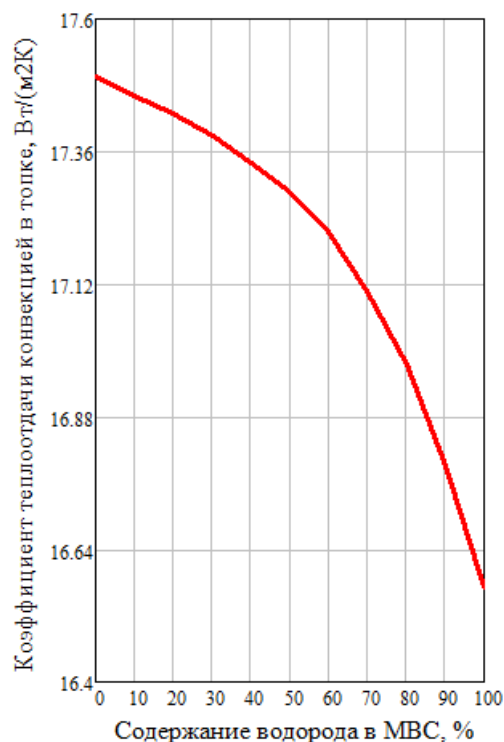


Рис. 1. Зависимость теплоотдачи конвекцией в топке от содержания водорода в МВС

От данного коэффициента зависит конвективная составляющая теплоты, воспринимаемая топочной камерой. Уменьшение данного коэффициента, прежде всего, связано со снижением скорости продуктов горения в жаровой трубе из-за снижения их расхода, представленного на рис. 8.

Выводы

В работе изучена проблематика парниковых газов, которая может быть решена при использовании водородного топлива. Изучена конструкция и принцип работы котельного агрегата Viessmann Vitomax 200HW. Проведены расчеты процессов горения МВС, по результатам которых можно сделать вывод, что использование МВС, а также переход на чистый водород снижает выбросы CO_2 в атмосферу, так как образование углекислого газа в ходе реакции сводится к нулю.

При расчетах топочной камеры (жаровой трубы) жаротрубного котла было выявлено снижение теплоты, воспринимаемой топкой на 65,3%, что может привести к снижению эффективности использования водогрейных котлов на МВС в пределах жаровой трубы. Таким образом, водород является экологичным топливом, но требует доработок в области эффективности технологий.

Библиографический список

1. Gas decarbonization pathways 2020–2050. Gas for climate [Электронный ресурс] / D. Peters, K. van der Leun, W. Terlouw ye al. ,Guidehouse. Utrecht: Guidehouse, 2020. URL: <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2020/04/Gas-for-Climate-Gas-Decarbonisation-Pathways-2020-2050.pdf>
2. Paris Agreement [Электронный ресурс]: United Nations, 2015. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (дата обращения 15.06.2023).



3. Указ Президента РФ от 04.11.2020 № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов».
4. Назаренко Т. Справочная информация об антропогенных выбросах парниковых газов. [Электрон. ресурс.] URL:<https://pandia.ru/text/80/310/1378.php>. (дата обращения 15.06.2023).
5. Оценки возможностей снижения выбросов парниковых газов при сжигании топлив в котлах ТЭС и котельных / П. В. Росляков, Б. А. Рыбаков, М. А. Савитенко и др. // Теплоэнергетика. 2022. № 9. С. 97-106.
6. Петин С.Н., Ванюшкин В.Д., Бурмакина А.В.. Производственное обучение на ТЭЦ с газопоршневыми генераторными установками и водогрейными котлами: Учебное пособие. М.: Изд. дом МЭИ, 2022. 104 с.
7. Попов С.К., Ипполитов В.А. Решение задач высокотемпературной теплотехнологии в среде Mathcad. М.: Изд. дом МЭИ, 2009. 95 с.
8. Лумми А.П., Мунц В.А. Расчет жаротрубно-дымогарного котла. Екатеринбург: УрФУ, 2009. 31 с.

References

1. Guidehouse. (2020). *Gas decarbonization pathways 2020–2050*. Gas for climate. Guidehouse.
2. United Nations. (2015). *Paris Agreement*. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
3. President of the Russian Federation. (2020, November 4). *Decree of the President of the Russian Federation No. 666 on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions*.
4. Nazarenko, T. (n.d.). *Spravochnaya informaciya ob antropogennyh vybrosah parnikovyh gazov* [Reference information on anthropogenic greenhouse gas emissions]. Retrieved June 15, 2023, from <https://pandia.ru/text/80/310/1378.php> [In Russian]
5. Roslyakov, P. V., Rybakov, B. A., Savitenko, M. A., & others. (2022). Ocenki vozmozhnostej snizheniya vybrosov parnikovyh gazov pri szhiganii topliv v kotlah TES i kotel'nyh [Assessment of the potential for decreasing greenhouse gas emission in burning fuels in boilers at thermal-power plants (tpp) and boiler houses]. *Heat and Power Engineering*, 9, 97-106. DOI: 10.56304/S0040363622090041. [In Russian]
6. Petin, S. N., Vanyushkin, V. D., & Burmakina, A. V. (2022). *Proizvodstvennoe obuchenie na TEC s gazoporshnevymi generatorynymi ustanovkami i vodogrejnymi kotlami* [Industrial training at CHP plants with gas-piston power units and water-heating boilers]. MPEI Publishing House [In Russian]
7. Popov, S.K. (2009). *Reshenie zadach vysokotemperaturnoj teplotekhnologii v srede Mathsad* [Solving problems of high-temperature heat technology in the Mathcad environment]. MPEI Publishing House. [In Russian]
8. Lummi, A.P., & Muntz, V.A. (2009). *Raschet zharotrubno-dymogarnogo kotla* [Calculation of Fire-tube and Smoke-tube Boiler]. UrFU. [In Russian]

Сведения об авторах

Шевяков Михаил Юрьевич, студент НИУ МЭИ

Жихарева Валерия Романовна, студент НИУ МЭИ

Петин Сергей Николаевич, к.т.н., доцент кафедры ИТНО НИУ "МЭИ"

Authors about

Mikhail Yuryevich Shevyakov, student at National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI).

Valeria Romanovna Zhikhareva, student at National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI).

Sergey Nikolaevich Petin, Ph.D., associate professor at the Department of Innovative Technologies of Science Intensive Industries, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI).



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫРАБОТКИ ПАРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА

Филин К.В.

Научный руководитель – ст. преподаватель Гришко Б.М.

БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

В работе был выполнен обзор энергетического потенциала лузги подсолнечника, исследованы проблемы ее сжигания, проанализированы характеристики и особенности сжигания лузги. Отмечено, что мировой потенциал производства электроэнергии из лузги составляет около 30 млн МВт·ч или 0,1% от мирового производства электроэнергии, в Российской Федерации потенциал по электроэнергии составляет 6,4 млн МВт·ч или 0,6% от производимой в стране электроэнергии. Теплотворная способность лузги аналогична другим твердым биотопливам и бурым и каменным углям, но из-за небольшой насыпной плотности (100 кг/м³ в естественном виде и до 600...700 кг/м³ в уплотненных брикетах) ее транспортировка является невыгодной и таким образом она является местным топливом. Поэтому ее сжигание возможно только на самом предприятии с получением тепловой энергии необходимых параметров, как правило в виде пара, который может быть использован на технологические потребности производства или для выработки электроэнергии. Произведен тепловой расчет котельного агрегата для выработки перегретого пара 12 т/ч с давлением 2,5 МПа и температурой 380°C. Полученные результаты показывают возможность использования лузги подсолнечника в качестве топлива в котлах с неподвижной колосниковой решеткой для выработки пара энергетических параметров.

Ключевые слова: лузга подсолнечника, биотопливо, энергетический потенциал, пар энергетических параметров, паровой котел

DETERMINATION OF THE POSSIBILITY OF PRODUCING STEAM ENERGY PARAMETERS WHEN USING SUNFLOWER HUSK AS A FUEL

Aleksey Filin

Scientific Director – Senior Lecturer Boris Grishko

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Abstract

In the work, a review of the energy potential of sunflower husks was carried out, the problems of its combustion were investigated, the characteristics and features of burning husks were analyzed. It was noted that the global potential for the production of electricity from the husk is about 30 million MWh or 0.1% of the world's electricity production, in the Russian Federation the potential for electricity is 6.4 million MWh or 0.6% of the electricity produced in the country. The calorific value of the husk is similar to other solid biofuels and brown and hard coals, but due to the low bulk density (100 kg/m³ in its natural form and up to 600...700 kg/m³ in compacted briquettes), its transportation is unprofitable and thus it is a local fuel. Therefore, its combustion is possible only at the enterprise itself with the production of thermal energy of the required parameters, usually in the form of steam, which can be used for the technological needs of production or for generating electricity. A thermal calculation of the boiler unit for the production of superheated steam 12 t/h with a pressure of 2.5 MPa and a temperature of 380°C was made. The results obtained show the possi-



bility of using sunflower husks as fuel in boilers with a fixed grate to generate steam with energy parameters.

Keywords: *sunflower husk, biofuel, energy potential, steam of energy parameters, steam boiler.*

Введение

Многие предприятия, перерабатывающие сельскохозяйственную продукцию, имеют крупнотоннажные потоки растительных отходов. В частности, на маслоэкстракционных заводах, перерабатывающих семена подсолнуха, образуется большое количество лузги, которая является "балластной" составляющей технологии получения подсолнечного масла. Предприятия несут затраты по хранению, обеспечению безопасности, а также вывозу и размещению лузги на свалках.

Цель работы: анализ потенциала использования лузги подсолнечника в качестве топлива и расчёт парового котла для выработки перегретого пара за счет тепла продуктов сжигания подсолнечной лузги.

Анализ использования лузги подсолнечника в качестве топлива

Объем выработки лузги подсолнечника

Биомасса представляет собой высокоэнергетический чистый источник с высокой степенью устойчивого роста благодаря своему углеродно-нейтральному статусу и высокой доступности во всем мире, поскольку она может быть получена из самых разных отходов агропромышленного комплекса и животноводства. На ее долю приходится от 9% до 14% общего потребления первичной энергии в промышленно развитых странах, в то время как в развивающихся странах на биоэнергию приходится примерно от пятой до трети общего потребления. Однако, несмотря на свой потенциал в качестве экологически чистого источника энергии, биомасса в значительной степени выбрасывается без использования энергии [1].

Биомасса, с экологической точки зрения, может рассматриваться как прямая альтернатива ископаемому топливу, особенно углю, поскольку она сгорает или газифицируется аналогично углю и, подобно углю, производит выбросы парниковых газов, в основном CO₂. Тем не менее, есть важные отличия. Биомасса растения по мере роста улавливает углекислый газ из атмосферы в процессе фотосинтеза [2]. Следовательно, на протяжении всего цикла роста, сбора урожая и сжигания существует чистый баланс между добавлением и удалением CO₂ в атмосферу. Однако основное различие между биомассой и углем заключается в том, что биомасса не содержит сульфидов, и поэтому электростанции, работающие на биомассе, не требуют обработки для удаления диоксида серы перед выбросом выбросов в атмосферу [1].

Подсолнечник широко культивируется во всем мире благодаря короткому циклу роста, высокой устойчивости к засухе и адаптации к различным почвенным условиям. Странами - лидерами по производству подсолнечника и производных подсолнечника являются Российская Федерация, Украина и Аргентина, которые производят примерно половину мирового производства семян подсолнечника (рис. 1).

По данным сайта Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (FAO, <https://www.fao.org/faostat/ru/#home>) в настоящее время подсолнечник выращивают на шести континентах, общая посевная площадь составляет 26,2 млн га, а общий объем производства составляет 47,34 млн тонн, то есть средняя урожайность составляет 18 067 ц/га. На Европейском континенте убрано 18,07 млн га (70% мировой площади), из них 16,31 млн приходится на страны бывшего СССР.



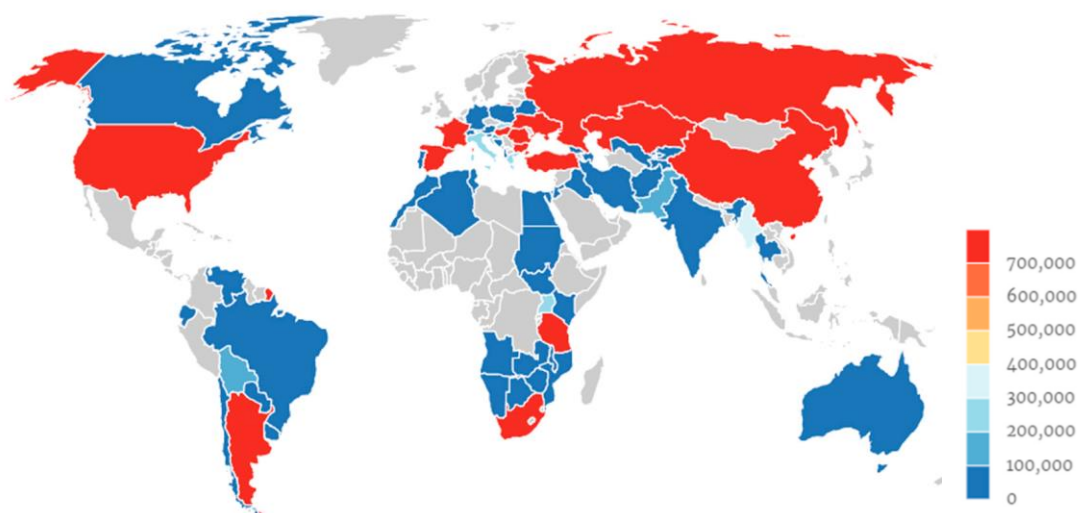


Рис. 1. Мировое производство подсолнечника, т [1]

В России в 2022 г. урожай подсолнечника составил 10,02 млн т со средней урожайностью 18,1 ц/га (https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/val2_2022.xlsx).

Лузга подсолнечника составляет 45–60% веса семян в зависимости от сорта подсолнечника и отделяется от ядра в процессе измельчения, чтобы получить лучшее прессование семян и более высокий выход масла. Она используется для производства кормов для животных, но ее энергетическое использование очень ограничено, и значительная часть лузги утилизируется и отправляется на свалки без экологического использования [3].

Свойства лузги подсолнечника в сравнении с другими видами топлива представлены в табл. 1

Таблица 1

Сравнение лузги подсолнечника с другими видами твердого топлива

Параметры	Лузга подсолнечника	Дрова	Бурый уголь	Каменный уголь	Антрацит
Влажность W , %	4...8	12...20	12...60	6...23	9...11
Зольность A , %	0,35...3	2	10...35	10...35	12...20
Содержание серы, %	0...0,24	–	0,2...7,8	0,3...9	0,3...7
Теплота сгорания низшая Q^p , МДж/кг	16,5...20	10	14...22	15...25	33,5...38
Плотность, кг/м ³	900...1200 (насыпная ~100)	440...740	500...1500	1280...1500	1500...1700

Теплотворная способность лузги аналогична бурому и каменному углю и выше, чем у древесины. Однако из-за низкой плотности это биотопливо необходимо гранулировать, чтобы снизить транспортные расходы.

Одним из самых интересных свойств лузги подсолнечника как биотоплива является низкое содержание влаги, менее 10%. Сжигание биомассы возможно при содержании в ней влаги ниже 30%, оптимальные результаты достигаются при влажности



10% [1]. Поэтому сжигание лузги не требует предварительной сушки, как в случае с другим древесным биотопливом, и потери энергии из-за испарения воды при сгорании минимальны.

Содержание золы в шелухе подсолнечника находится в пределах до 3%, что сравнимо с другими твердыми биотопливами (пеллеты из миндальной скорлупы – 3,35%, пеллеты из оливкового дерева – 4,79%, пеллеты из дуба – 3,32% [1]) и ниже, чем у углей. Химический состав золы лузги состоит в основном из SiO_2 и CaO и в меньшей степени из оксидов магния, алюминия, калия и фосфора [1]. Содержание серы в лузге высокое, что указывает на наличие выбросов SO_x , но оно ниже, чем у ископаемого топлива.

На практике проблемы, связанные с золой в горелках и котлах систем сжигания биомассы, следующие [1]:

- частично расплавленная зола имеет тенденцию образовывать агломераты на стенках решетки и шлаковые отложения на установке;
- образование зольных отложений в зонах с умеренными температурами или в теплообменниках конвекционных тепловых котлов;
- быстрая коррозия и истирание металлического корпуса установки в наиболее ответственных ее точках;
- унос золы;
- необходимость удаление зольных отходов из котлов.

Основным преимуществом лузги как источника энергии является ее возобновляемый характер, поскольку в качестве основного источника используются органические отходы сельскохозяйственной деятельности. При этом вопрос нейтральности выбросов является спорным, так как подсолнечник – не естественно растущее растение, а специально культивируемое. Но использование котлов на биомассе приводит к более низким выбросам, чем для котлы на традиционном топливе, что снижает выбросы серы и загрязняющих веществ, таких как CO , HC и NO_x .

Общая биоэнергия, которую можно было бы произвести из лузги подсолнечника, оценивается в 97,69 млн МВт·ч (рис. 2), в т.ч. потенциал по выработке электроэнергии около 30 млн МВт·ч или 0,1% от мирового производства электроэнергии.

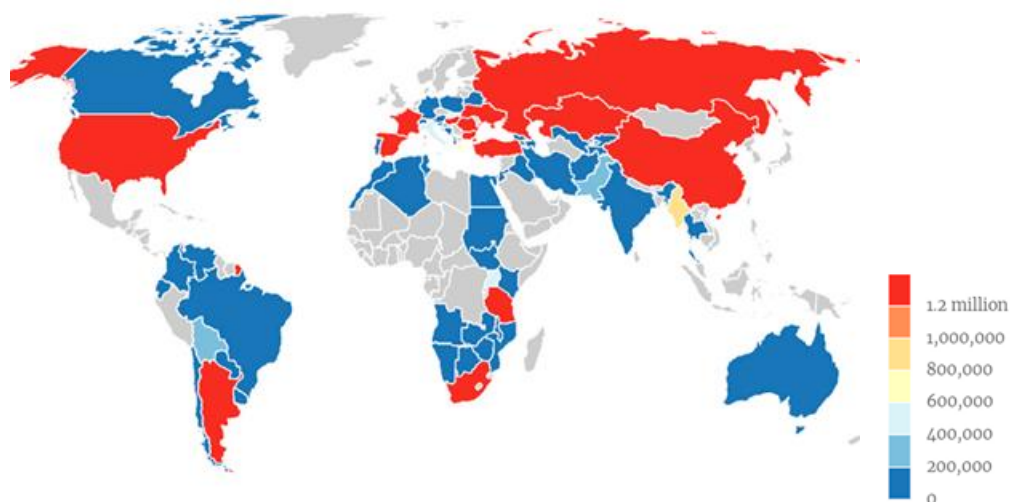


Рис. 2. Распределение энергетического потенциала по странам, использующим лузгу подсолнечника в качестве биотоплива, МВт·ч [1]

На Европейском континенте, своим энергетическим потенциалом выделяются Российская Федерация (потенциал по электроэнергии 6,4 млн МВт·ч или 0,6% от про-

изводимой в стране электроэнергии), Украина, Румыния и, в меньшей степени, Испания. В Азии крупнейшие мощности по производству энергии сосредоточены в Китае, а в Северной и Южной Америке особого внимания заслуживают США и Аргентина.

Выводы

Теплотворная способность лузги аналогична теплотворной способности других коммерческих видов твердого биотоплива, но из-за небольшой насыпной плотности лузги (100 кг/м³ в естественном виде и до 600...700 кг/м³ в уплотненных брикетах) ее транспортировка является невыгодной и таким образом она является местным топливом. Поэтому ее сжигание возможно только на самом предприятии с получением тепловой энергии необходимых параметров, как правило в виде пара, который может быть использован на технологические потребности производства или для выработки электроэнергии.

Использование лузги для выработки пара энергетических параметров

В качестве энергетического использования лузги возможно ее использование в качестве топлива в мини-ТЭЦ [5]. Для оценки возможности использования лузги подсолнечника для выработки пара энергетических параметров использованы данные элементарного состава лузги и ее золы ОАО «Эфко», Белгородская обл. (табл. 2 и 3).

Таблица 2
Элементарный состав лузги
на рабочую массу

Влажность	$W^p, \%$	8,11
Зольность	$A^p, \%$	2,17
Углерод	$C^p, \%$	51,3
Сера	$S^p, \%$	0,1
Водород	$H^p, \%$	6,6
Азот	$N^p, \%$	1,4
Кислород	$O^p, \%$	40,6
Теплота сгорания низшая	$Q_{н}^p, \text{МДж(ккал)/кг}$	17 (4070)

Таблица 3
Химический состав
золы лузги, мас. %

SiO ₂	74,58
Al ₂ O ₃	0,6
Fe ₂ O ₃	0,2
CaO	0,6
MgO	1,7
K ₂ O	20,05
Na ₂ O	0,47
SO ₃	1,8

Учитывая ограниченные финансовые и кадровые возможности сельскохозяйственных предприятий, конструкция котла должна обеспечивать максимальную простоту работы, надежность и иметь низкую стоимость. Сжигание лузги подсолнечника для обеспечения этих условий возможно в котлах с неподвижной колосниковой решеткой провального типа, главный недостаток которых – значительные потери с механическим и химическим недожогом. Но данная технология позволяет добиться необходимого качества сжигания топлива [6].

Согласно исследованиям НПО ЦКТИ и Бийского котельного завода [7], имеющиеся типовые котлы не приспособлены для сжигания лузги подсолнечника, т.к. котельный пучок и экономайзер быстро забиваются прочными отложениями золы. Частым явлением при сжигании лузги являются пожары в дымоходах и золоуловителях из-за накопления недогоревших зёрен. Один из вариантов решения проблемы – глубокое охлаждение отходящих из котла газов в конденсационном режиме, но это приводит к значительному удорожанию котла [7].

В табл. 4 приведены результаты расчетов для сравнения вариантов разработки нового котла для сжигания лузги и реконструкции существующего котла Е-12-2,5ГМ, имеющегося на предприятии. Снижение производительности котла при его рекон-



струкции связано с требованиями по время пребывания частиц в топке, необходимое для их полного выгорания, которое определяется скоростью витания частиц (которая составляет для крупных частиц размером 12 мм до 11 м/с, средних 3м/с и мелких с размером менее 0,4 мм – 1,3 м/с [8]). Исходя из этих условий скорость газов в топке не должна превышать 1 м/с, что согласно размерам топки и температуры газов в ней определяет расход дымовых газов, и, следовательно, расход топлива и воздуха.

Таблица 4

Сравнение вариантов

№ п/п	Наименование	Существующий котел (газ)	Новый котел (лузга)	Реконструкция	
				Циклон	Колосниковая решетка
1.	Паропроизводительность, т/ч	12	12	9	4,4...6,4
2.	Давление пара, МПа	2,5	2,5	1,9...2,6	1,9...2,6
3.	Температура пара, °С	380	380	350...400	350...400
4.	Расход топлива, т/ч	-	2400	1780	860...1300
5.	КПД котла, %	91,6	88	87,7	85
6.	Расход воздуха, нм ³ /ч	11 575	10 560	7 896	7 032
7.	Расход дымовых газов, нм ³ /ч	12 960	16 320	12 096	8 976
8.	Сопротивление воздушного тракта, кПа (мм. вод. ст)	9,8 (100)	9,8 (100)	6,4 (650)	9,8 (100)
9.	Аэродинамическое сопротивление котла, кПа (мм. вод. ст)	9,8 (100)	9,8 (100)	4,9 (50)	9,8 (100)
10.	Масса, т	21	н.д.	23	36

Таким образом является целесообразным проектирование нового котла (рис. 3, для которого приняты следующие параметры:

- паропроизводительность.....12 т/ч;
- рабочее давление пара.....2,4 МПа (24 кгс/см²);
- температура перегретого пара380°С;
- температура питательной воды105°С.

Вырабатываемый пар предназначен для использования в конденсационной турбине серии«К-12» Калужского турбинного завода или может быть использован на технологические нужды предприятия.

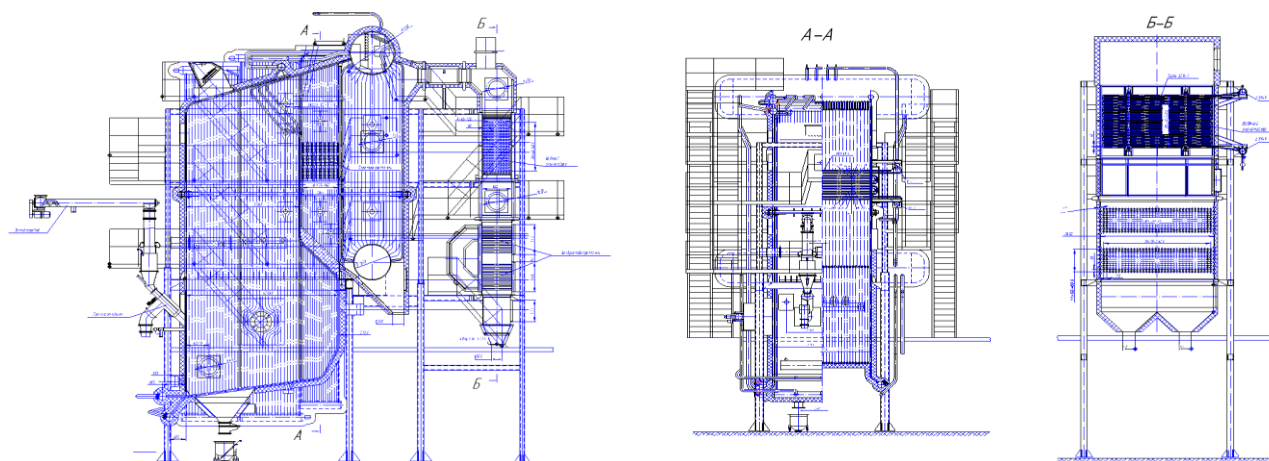


Рис. 3. Паровой котел Е-12-2,4-380ДТ

В работе произведен выбор конструкции и поверочный тепловой расчет котла [8].

В результате теплового расчёта была определена возможность выработки пара указанных параметров и определены следующие основные показатели:

КПД парового котла	88 %.
Полный расход топлива	2,4 тонн лузги в час.
Температура газов на выходе из топочной камеры	1100 °С.
Температура газов на выходе из котла	100 °С.

Выводы

В работе был выполнен обзор энергетического потенциала лузги подсолнечника, исследованы проблемы ее сжигания, характеристики и особенности сжигания лузги, произведен тепловой расчет котельного агрегата с целью определения расхода топлива согласно нормативному методу.

Результаты работы показывают возможность использования лузги подсолнечника в качестве топлива для выработки пара энергетических параметров в промышленных электростанциях.

Библиографический список

1. Perea-Moreno M.-A., Manzano-Agugliaro F., Perea-Moreno A.-J. Sustainable Energy Based on Sunflower Seed Husk Boiler for Residential Buildings // Sustainability. 2018. No 10. P. 3407.
2. Bouzarovski S., Petrova S. A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary // Energy Research & Social Science. 2015. Vol. 10. P. 31–40.
3. Cubitto M.A., Gentili A.R. Bioremediation of crude oil-contaminated soil by immobilized bacteria on an agroindustrial waste – Sunflower seed husks // Bioremediation Journal. 2015. Vol. 19. P. 277–286.
4. Well-To-Tank Report Version 4.0. JEC Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context / R. Edwards, J.F. Larive, D. Rickeard; W. Weindorf et al.; Eds. H. Maas, A. Reid, R. Nelson et al. Brussels: EC, 2013. 134 p.
5. Киселева А.И., Гашо Е.Г. Анализ энергосберегающих мероприятий в системах промышленного пароснабжения // Энергетические системы. 2019. № 1. С. 200-206.
6. Ахмед А.А., Рамазанов Р.С., Трубаев П.А. Моделирование горения твердого топлива на колосниковой решетке в программном комплексе ANSYS FLUENT // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения). Мат-лы Межд. научно-технич. конф., посв. 75-летию теплоэнергетического факультета. Иваново: ИГЭУ, 2023. С. 259-264.
7. Использование вихревых топок, сжигание растительных отходов [Электронный ресурс] / Е.М. Пузырев, А.М. Сидоров, А.А. Скрябин и др. (ООО НИЦ ПО «Бийскэнергомаш») URL: <http://www.nicbem.ru/st2.htm>. (дата обращения 20.06.2023 г.)
6. Biomass-Derived Materials for Environmental Applications / I. Anastopoulos, E. Lima, L. Meili, D.A. Giannakoudakis. Elsevier, 2022. 456 p.
7. 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.
8. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / 3-е изд., перераб. и дополн. СПб.: Изд-во НПО КЦТИ, 1998. – 256 с.



Научное издание

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ICES-2023A)

VI Международная
научно-техническая
конференция

Секция молодых ученых

Материалы конференции



Подписано в печать 30.07.2023 г.
Объем 2 900 кб
Тираж 100 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46