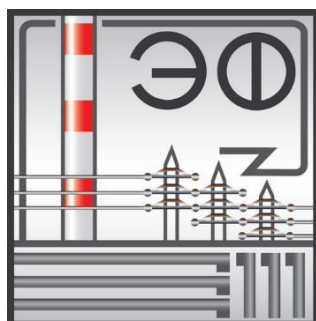


Министерство образования Республики Беларусь  
Белорусский национальный технический университет  
Энергетический факультет

# ЭНЕРГЕТИКА БЕЛАРУСИ – 2023



**Материалы Республиканской  
научно-практической  
конференции  
25–26 мая 2023 г.  
Электронное научное  
издание**

**БНТУ  
Минск  
2023**

УДК 620.9(06)

ББК 31я43

А43

Составитель  
И. Н. Прокопеня

В сборник включены материалы Республиканской научно-практической конференции по секциям: «Электроэнергетика»; «Теплоэнергетика» и «Экономика и организация энергетики».

**Требования к системе:** IBM PC-совместимый ПК стандартной конфигурации, дисковод CD-ROM. Программа работает в среде Windows.

**Открытие электронного издания** проводится запуском файла Energetika\_Belarusi\_2023.pdf. Возможен просмотр электронного издания непосредственно с компакт-диска без предварительного копирования на жесткий диск компьютера.

Дата доступа в сети: 28.09.2023. Объем издания: 4,58 МБ. Заказ 690

Белорусский национальный технический университет

Пр-т Независимости, 65/2, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. (017) 293-92-16, факс 292-71-73

E-mail: ef@bntu.by <http://www.bntu.by/ef.html>

ISBN 978-985-583-945-4

© Белорусский национальный  
технический университет, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

<i>Менжинский А. Б., Пантелеев С. В., Менжинский П. Б.</i> МАКЕТ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ. ЧАСТЬ 1 .....	8
<i>Дюкин И. Р., Ермолаев А. В., Садырин Д. И., Пятин К. О.</i> АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ .....	13
<i>Дюкин И. Р., Зырянов В. В., Садырин Д. И., Пятин К. О.</i> ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МИКРОПРОЦЕССОРНУЮ РЕЛЕЙНУЮ ЗАЩИТУ .....	17
<i>Сергеенко И. М.</i> АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ В ГОРОДСКОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ .....	20
<i>Гецман Е. М., Калентионок Е. В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 10 КВ РАЙОНА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ .....	25
<i>Шейников А. А., Иванцук Л. А., Суходолов Ю. В.</i> АВТОНОМНЫЙ ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС КВАДРОКОПТЕРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ...	32
<i>Вознесенский М. В., Чернышев В. М., Седов А. Р., Касаткин Н. И., Басов А. А., Семененко А. Н.</i> АКТИВАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ РОДИЯ, ИНДИЯ И СЕРЕБРА .....	39
<i>Вознесенский М. В., Чернышев В. М., Седов А. Р., Касаткин Н. И., Басов А. А., Семененко А. Н.</i> АКТУАЛЬНОСТЬ ВОПРОСА ОБ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА И ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	47
<i>Исаев А. В., Суходолов Ю. В., Гулич А. Ю., Любинский К. А.</i> ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ВЕЛИЧИНЕ МЕЖВИТКОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	54
<i>Третьяков Е. А., Мещеряков А. В.</i> ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ДГУ .....	60

<i>Калентионок Е. В.</i> МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ УПРАВЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ .....	66
<i>Первенёнок Р. Е., Сицко А. Л.</i> СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ .....	71

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

<i>Худяков И. С.</i> СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РАБОТЫ ТУРБОУСТАНОВКИ ЭНЕРГОБЛОКА БЛОКА АЭС В МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМАХ.....	77
<i>Бекмурзаев Б. Х., Бабаев М. Б.</i> СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОПРЕСНЕНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ДРЕНАЖНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ПУСТЫНИ.....	82
<i>Джумадурдыев Т. М., Курбансахедов К. А.</i> О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ КОТЕЛЬНЫХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ .....	85
<i>Андреев В. В., Заузолкова Н. О., Пахомов А. В., Сабурин Т. С., Самойлов А. М.</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ ПРАВИЛЬНОЙ И НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМ .....	89
<i>Аразклычев А. Т., Аманов М. Э.</i> ОДИН ИЗ СПОСОБОВ УДАЛЕНИЯ НАКИПИ В ТЕПЛООБМЕННИКАХ .....	94
<i>Богдан Е. В., Карницкий Н. Б.</i> ХАРАКТЕРНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПИКОВО-РЕЗЕРВНЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ НА БАЗЕ ГТУ, ПРИНЯТЫХ К УСТАНОВКЕ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ.....	100
<i>Кокурина Д. А., Малыгина Д. А., Басов А. А., Семененко А. Н.</i> АТОМНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ УДАЛЕННЫХ ПОСЕЛЕНИЙ.....	105
<i>Малыгина Д. А., Кокурина Д. А., Семененко А. Н., Басов А. А.</i> РАДИАЦИЯ И ПИЩА ЧЕЛОВЕКА .....	112
<i>Качан С. А.</i> ВОЗДУХОАККУМУЛИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК.....	116

<i>Короткевич М. А., Старжинский А. Л.</i> УЧЕТ ВЛИЯНИЯ МИНИЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ .....	121
<i>Дюдяев И. А., Ромашов С. И., Медуница В. А.</i> АНАЛИЗ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С РЕАКТОРОМ ТИПА ВВЭР. СИСТЕМА ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛОТЫ.....	128
<i>Струцкий Н. В., Романюк В. Н.</i> БЛОК-СХЕМА НАДЕЖНОСТИ ЕДИНИЧНОГО УЧАСТКА СТАЛЬНОГО ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА .....	134
<i>Абразовский А. А., Савастиенок А. Я., Гориченко С. Ф.</i> ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО СТАЛЬНОГО ПОДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДА ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ.....	139
<i>Янчук В. В., Романюк В. Н.</i> РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПОДОГРЕВА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ТЭЦ ЗА СЧЕТ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ .....	143
<i>Титов А. С., Романюк В. Н.</i> ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ .....	147
<i>Петровская Т. А., Мильяненко А. А., Микшель М. С.</i> ДВИГАТЕЛЬ СТИРЛИНГА – ПРОРЫВНОЕ РЕШЕНИЕ НАШЕГО ВРЕМЕНИ В ЭНЕРГЕТИКЕ .....	154
<i>Ярмольчик Ю. П.</i> ФАКТОРЫ, ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИЕ ОБРАЗОВАНИЕ НОРМИРОВАННЫХ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА .....	159
<i>Тарасевич Л. А., Нагорнюк М. Ю.</i> АЭС-ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ДАЛЬНЕГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.....	166
<i>Айдарова З. Б., Рыжова Т. В., Ярмольчик М. А.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРИ ПЕРЕСЧЕТЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ.....	168
<i>Тарасевич Л. А., Сытая М. Д.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ ПОДОГРЕВА СЕТЕВОЙ ВОДЫ ДЛЯ ТЭЦ.....	173

## ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

*Петрусевич В. И., Невдах С. В.*

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ СРЕДСТВ В СООТВЕТСТВИИ С  
НАЦИОНАЛЬНЫМИ И МЕЖДУНАРОДНЫМИ СТАНДАРТАМИ:  
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА..... 177

*Данатаров С., Атаева Г. Э.*

СОВРЕМЕННОЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО В УСЛОВИЯХ  
ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ..... 182

# Электрoэнepгетика

УДК 621.313

МАКЕТ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ  
МАГНИТАМИ. ЧАСТЬ 1  
A MODEL OF A LABORATORY INSTALLATION FOR THE STUDY  
OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINES WITH PERMANENT  
MAGNETS. PART 1

Менжинский А. Б., к-т техн. наук, доцент; Пантелеев С. В.,  
Менжинский П. Б.,  
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь  
A. Menzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
S. Pantelev, P. Menzhinsky,  
Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

*Аннотация.* В последнее время наблюдается активный рост научных разработок в области синхронных электрических машин с постоянными магнитами, нашедших широкое применение во многих отраслях промышленности, а также в системах электроснабжения автономных объектов. Синхронная электрическая машина с постоянными магнитами является наиболее перспективной электрической машиной в диапазоне малых и средних мощностей, благодаря своим высоким энергетическим и массогабаритным показателям. Для возможности исследования таких электрических машин, а также практической реализации и апробирования новых алгоритмов управления необходимо создать лабораторную установку по изучению принципов работы и характеристик синхронных электрических машин с постоянными магнитами. В связи с этим на кафедре электротехники и систем электропитания учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» разработан макет лабораторной установки для исследования синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

*Annotation.* Recently, there has been an active growth of scientific developments in the field of synchronous electric machines with permanent magnets, which have found wide application in many industries, as well as in power supply systems of autonomous facilities. Synchronous electric machine with permanent magnets is the most promising electric machine in the range of small and medium capacities, due to its high energy and mass-dimensional indicators. For the possibility of studying such electric machines, as well as the practical implementation and testing of new control algorithms, it is necessary to create a laboratory facility for studying the principles of operation and characteristics of synchronous electric machines with permanent magnets. In this regard, the Department of Electrical Engineering and Power Supply Systems of the educational institution "Military Academy of the Republic of Belarus" has



developed a model of a laboratory installation for the study of synchronous electric machines with permanent magnets.

*Ключевые слова:* электромеханический преобразователь, синхронные электрические машины с постоянными магнитами, макет лабораторной установки, электрические машины.

*Key words:* electromechanical converter, synchronous electric machines with permanent magnets, laboratory setup layout, electric machines.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве перспективных электромеханических преобразователей рассматриваются синхронные электрические машины с постоянными магнитами (СЭМПМ) [1]. Нашедшие широкое применение во многих отраслях промышленности, а также в системах электроснабжения автономных объектов [2–4]. Синхронная электрическая машина с постоянными магнитами является наиболее перспективной электрической машиной в диапазоне малых и средних мощностей, благодаря своим высоким энергетическим и массогабаритным показателям [5]. В связи с этим в зарубежных странах большое внимание уделяется исследованию СЭМПМ [1; 2]. Достоверность научных результатов, полученных в процессе исследования таких электрических машин, может быть проверена только при работе с реальным объектом.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для возможности исследования таких электрических машин, а также практической реализации и апробирования новых алгоритмов управления необходимо создать лабораторную установку по изучению принципов работы и характеристик СЭМПМ. В связи с этим на кафедре электротехники и систем электропитания учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» разработан макет лабораторной установки для исследования СЭМПМ. Структурная схема макета лабораторной установки для исследования СЭМПМ представлена на рис. 1.

В состав макета лабораторной установки для исследования СЭМПМ входят:

- цифровые осциллограф марки GDS-71102 и мультиметр марки UT71E;
- персональная электронная вычислительная машина на базе процессора Intel(R) Celeron(R) CPU1000M 1,8 ГГц;
- отладочная плата Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328 [6];
- выпрямительный модуль на основе диодов 10A10;
- датчик частоты вращения ротора на основе модуля датчика Холла YS-27;

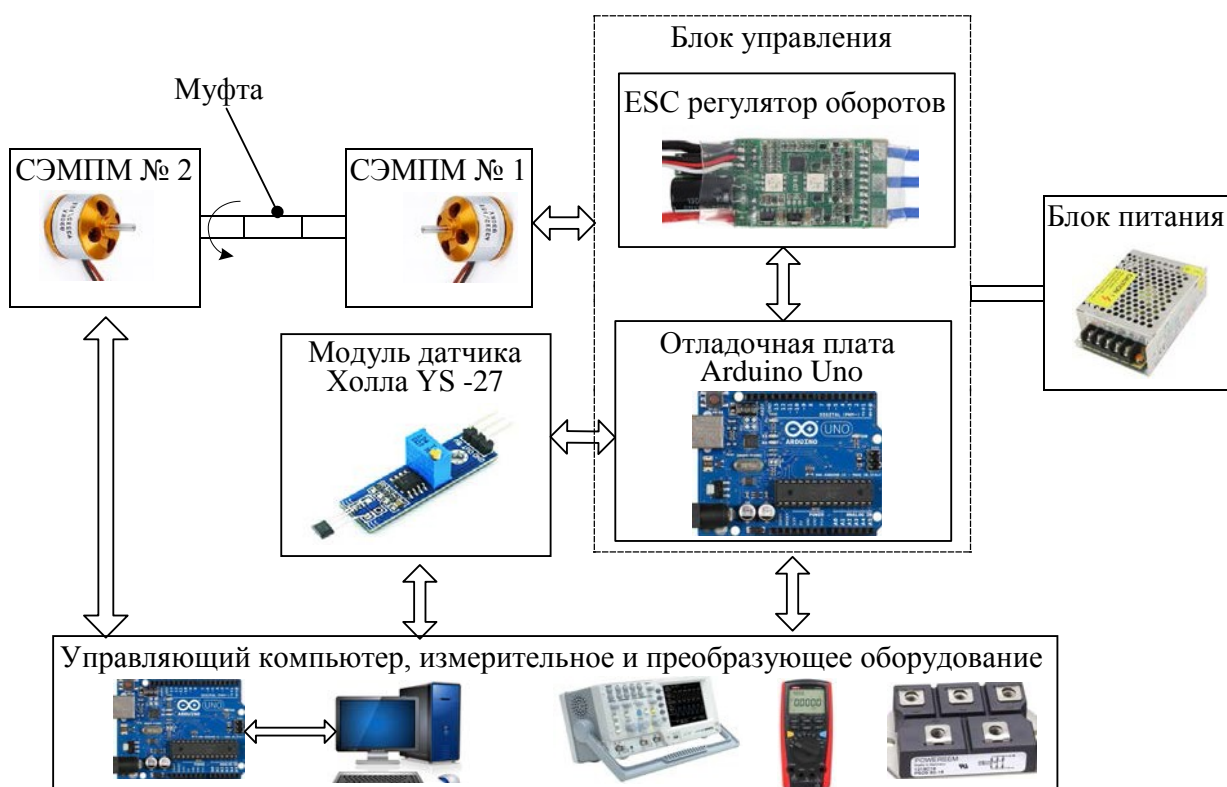


Рис. 1. Структурная схема макета лабораторной установки для исследования СЭМПМ

- ESC регулятор оборотов Brushless 30 А;
- импульсный источник питания AC-DC 12 В, 5 А;
- для разработки программного обеспечения макета лабораторной установки использовалась среда программирования Arduino IDE;
- синхронные электрические машины с постоянными магнитами.

Синхронные электрические машины с постоянными магнитами различают по форме обратной электродвижущей силы (противо-ЭДС) [1]: электрические машины с противо-ЭДС трапецеидальной формы; электрические машины с противо-ЭДС синусоидальной формы. В макете лабораторной установки использовалась СЭМПМ с противо-ЭДС трапецеидальной формы – бесколлекторная электрическая машина постоянного тока (БЭМПТ) А2212/10Т 1400KV [1]. На рис. 1 СЭМПМ № 1 – исследуемая БЭМПТ (двигательный режим работы), а СЭМПМ № 2 – нагрузочная БЭМПТ. Исследуемая и нагрузочная БЭМПТ механически соединены между собой с помощью муфты. Скорость вращения СЭМПМ № 1 регулируется путем изменения напряжения, подаваемого на статорные обмотки с регулятора оборотов. Нагрузочная БЭМПТ создает нагрузочный момент, действующий на исследуемую БЭМПТ. Нагрузочная БЭМПТ может позволить реализовать различные законы нагрузочного момента [7]. Нагрузочную БЭМПТ в большинстве экспериментов целесообразно использовать в генераторном режиме работы.

Математическое описание динамического состояния исследуемой БЭМПТ осуществляется следующей системой дифференциальных уравнений электрического равновесия и движения [8–10]:

$$\begin{cases} i_r R_r + \frac{d\Psi_r}{dt} = u_r; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \end{cases} \quad (1)$$

где  $i_r$  – ток в рабочей обмотке;

$R_r$  – активное сопротивление рабочей обмотки;

$\Psi_r$  – потокосцепление рабочей обмотки;

$u_r$  – напряжение, приложенное к рабочей обмотке;

$J$  – момент инерции;

$\omega$  – угловая скорость ротора;

$M$  – электромагнитный момент;

$M_c$  – нагрузочный момент, действующий на исследуемую БЭМПТ.

Внешний вид макета лабораторной установки для исследования СЭМПМ представлен на рис. 2.

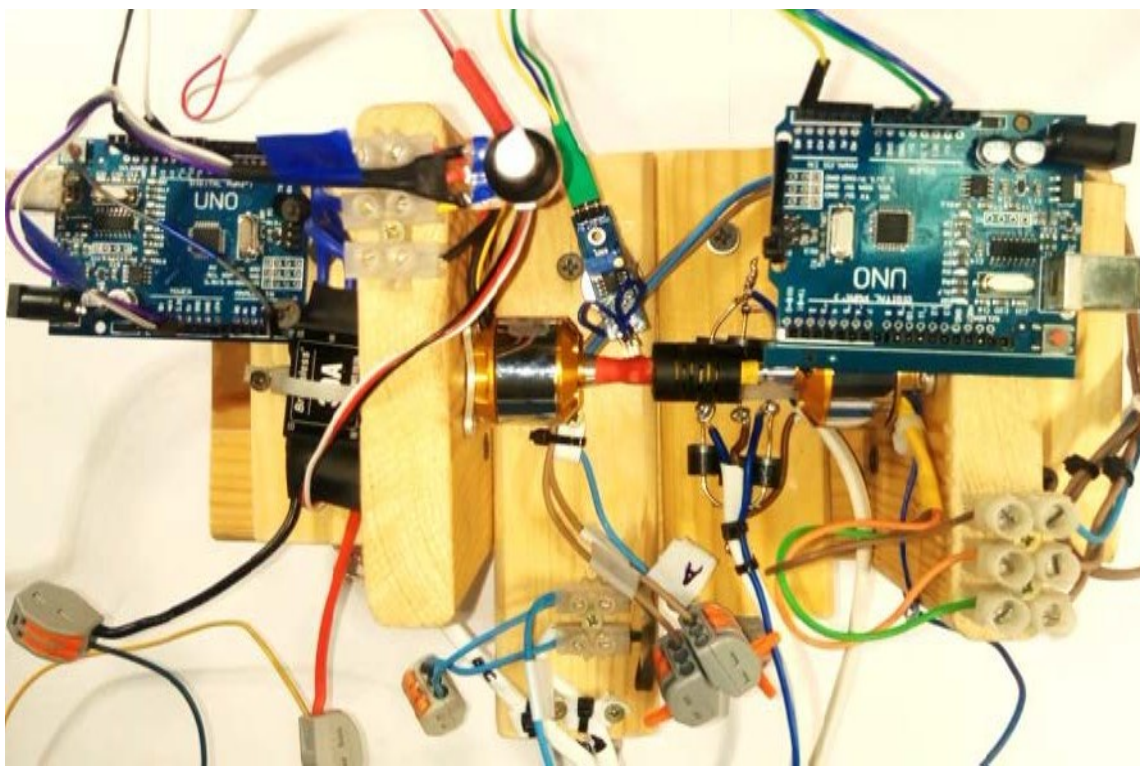


Рис. 2. Внешний вид макета лабораторной установки для исследования СЭМПМ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан макет лабораторной установки для исследования СЭМПМ. Отличительной особенностью разработанного макета лабораторной уста-

новки является возможность реализации различных законов нагрузочного момента, а также исследования СЭМПМ в различных режимах работы. Макет лабораторной установки разработан с целью возможности исследования СЭМПМ, а также практической реализации и апробирования новых алгоритмов управления ими. Это способствует развитию теории электромеханики применительно к СЭМПМ. Кроме того, предложенный макет лабораторной установки используется при подготовке магистрантов и адъюнктов кафедры электротехники и систем электропитания учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов, Р. С. Управление синхронными машинами с постоянными магнитами: учебное пособие / Р. С. Гаврилов, Ю. Н. Мустафаев; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2019. – 78 с.
2. Тягушев, С. Современные технологии управления двигателями переменного тока / С. Тягушев // Силовая электроника. – 2019. – № 5. – С. 44–47.
3. Пантелеев, С. В. Разработка аналитической модели для определения основного магнитного потока через катушку рабочей обмотки синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой / С. В. Пантелеев, А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 75–85.
4. Менжинский, А. Б. Разработка аналитической модели для определения магнитного потока рассеяния через зубцы статора синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой / А. Б. Менжинский, С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 224–239.
5. Шевченко, А. Ф. Электромеханические преобразователи энергии с модулированным магнитным потоком / А. Ф. Шевченко. – Новосибирск: НГТУ, 1999. – 340 с.
6. Петин В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 400 с.
7. Ванин, А. В. Универсальный исследовательский стенд для испытаний электромеханических модулей манипуляционных роботов / А. В. Ванин, В. А. Польский // Вестник МГТУ им. Н Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2012. – № 6. – С. 136–147.
8. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Изд. 2-е. – Минск : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
9. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины : учебник / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.
10. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.

УДК 621.311

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ  
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И  
АВТОМАТИКИ

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF  
MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION AND AUTOMATION  
DEVICES

Дюкин И. Р., Ермолаев А. В., Садырин Д. И., Пятин К. О.,  
Вятский государственный университет, г. Киров, Россия  
I. Dyukin, A. Ermolaev, D. Sadyrin, K. Pyatin,  
Vyatka State University, Kirov, Russia

*Аннотация.* Рассмотрены основные причины отказов в работе устройств релейной защиты. Выявлены основные пути решения проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетике.

*Annotation.* The main reasons for failures in the operation of relay protection devices are considered. The main ways of solving the problem of electromagnetic compatibility in the electric power industry are identified.

*Ключевые слова:* электромагнитная совместимость, релейная защита, микропроцессорные устройства.

*Key words:* electromagnetic compatibility, relay protection microprocessor devices.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные микропроцессорные устройства РЗА (релейной защиты и автоматики) играют важную роль в обеспечении безопасности и надежности работы электроэнергетических систем. Однако, эти устройства чувствительны к электромагнитным помехам, которые могут привести к сбоям в их работе и, как следствие, к аварийным ситуациям. Поэтому обеспечение электромагнитной совместимости устройств РЗА является одной из ключевых задач при их проектировании и эксплуатации [1].

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ошибки в работе устройств РЗА могут происходить по разным причинам. Некоторые из них могут быть связаны с техническими проблемами, а другие – с ошибками в настройке и программировании.

Основные причины отказов, ложных и излишних срабатываний РЗА могут быть следующими:

Неисправность оборудования: внезапные отключения питания, повреждения проводов или разъемов, ошибки в измерительных приборах, неисправности трансформаторов тока и напряжения, и т. д.

Неудачное программирование: ошибки в программном обеспечении, неправильное использование режимов и настроек, некорректное определение пороговых значений, отсутствие функций самодиагностики и контроля параметров.

Неправильное соединение устройств: неправильное подключение оборудования к РЗА, ошибки в выборе и использовании дополнительных устройств, несоответствие параметров и характеристик оборудования требованиям РЗА.

Недостаточное обучение персонала: нехватка квалифицированных специалистов, недостаточная подготовка по использованию и обслуживанию РЗА, несоответствие требованиям технической документации.

Проблемы с интерфейсом: неправильное подключение к сети, сбои в работе интерфейса, ошибки в коммуникации между РЗА и другими устройствами.

Влияние внешних факторов: помехи от других устройств, перегрузки в электросети, воздействие электромагнитных полей, изменения температуры, воздействие вибраций и т. д.

В целом, для устранения причин отказов, ложных и излишних срабатываний РЗА необходимо проводить регулярное техническое обслуживание и контроль параметров, обучение персонала, а также применение соответствующих технических решений и программных настроек [2].

Электромагнитная совместимость (ЭМС) – это способность электронных устройств работать в окружающей среде, соблюдая нормы и стандарты, которые регулируют уровень электромагнитных помех, как создаваемых, так и принимаемых устройством. Для обеспечения ЭМС микропроцессорных устройств необходимо учитывать ряд факторов, которые могут влиять на их работу.

Анализ ЭМС устройств РЗА является важным этапом проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем. Цель анализа состоит в оценке возможности работоспособности устройств РЗА в условиях различных внешних электромагнитных помех (ЭМП) и излучений.

Анализ ЭМС проводится в соответствии с требованиями нормативных документов, таких как ГОСТ 30804.4.7-2013, МЭК 61000-4-30 и др. В рамках анализа определяются внешние источники ЭМП, их параметры и характеристики, а также проводятся измерения уровней помех, создаваемых устройствами РЗА.

В процессе анализа определяются чувствительность устройств РЗА к ЭМП, уровень защиты, необходимый для обеспечения надежной работы устройства в условиях ЭМП, а также разрабатываются рекомендации по выбору и применению дополнительных средств защиты от помех.

Анализ ЭМС устройств РЗА должен проводиться на всех этапах жизненного цикла устройства: от проектирования до эксплуатации и ремонта. В процессе эксплуатации необходимо проводить периодические проверки работоспособности РЗА в условиях возможных ЭМП.

Важным аспектом анализа ЭМС является также обучение персонала, ответственного за эксплуатацию и ремонт РЗА, правилам и требованиям по обеспечению ЭМС в электроэнергетических системах.

Первым шагом в обеспечении ЭМС является проектирование устройства с учетом требований стандартов и нормативных документов, которые определяют параметры ЭМС. Кроме того, необходимо провести тестирование устройства на соответствие этим требованиям. Тестирование проводится на специальных стендах, которые создают искусственные электромагнитные помехи различной мощности и частоты [3].

Однако, не всегда возможно предусмотреть все факторы, которые могут повлиять на работу устройств РЗА. Поэтому необходимо применять дополнительные меры, направленные на уменьшение воздействия электромагнитных помех на устройство. Одним из таких способов является применение экранирования, которое позволяет уменьшить уровень электромагнитных помех, создаваемых другими устройствами и оборудованием.

Также важным фактором является правильное размещение устройства в системе. Необходимо избегать размещения устройства рядом с источниками электромагнитных помех, такими как высоковольтные линии электропередачи или электромагнитные поля, создаваемые мощными электрооборудованием. Кроме того, необходимо обеспечить надежное заземление и защиту от перенапряжений.

Еще одним важным аспектом является выбор компонентов для устройств РЗА, таких как конденсаторы, резисторы и другие элементы, которые могут влиять на их работу при наличии электромагнитных помех. Поэтому необходимо выбирать компоненты с высокими показателями ЭСМ [4].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение, обеспечение ЭМС устройств РЗА является критически важной задачей, которая требует комплексного подхода. Это включает в себя проектирование устройства с учетом требований стандартов, проведение тестирования на соответствие требованиям ЭМС, применение экранирования, правильное размещение устройства и выбор компонентов с высокими показателями ЭМС. Только таким образом можно обеспечить надежную и безопасную работу устройств РЗА в условиях современной электроэнергетики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич, В. И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты / В. И. Гуревич // Компоненты и технологии. – 2010. – № 2.
2. Дьяков, А. Ф. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / А. Ф. Дьяков, И. П. Кужекин, Б. К. Максимов. – М. : Издат. дом «МЭИ», 2011. – 455 с.

3. Концепция развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса : Приложение № 1 к протоколу Правления ОАО «Россети» от 22.06.2015 № 356пр. – Электрон. текстовые дан. – М., 2015. – 49 с.

4. Нагай, В. И. Повышение технического совершенства релейной защиты распределительных сетей 6-110 кВ электроэнергетических систем: дис. д-ра техн. наук / В. И. Нагай. – Новочеркасск, 2002. – 483 с.



УДК 621.311

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА  
МИКРОПРОЦЕССОРНУЮ РЕЛЕЙНУЮ ЗАЩИТУ  
THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC PULSES ON MICROPROCESSOR  
RELAY PROTECTION

Дюкин И. Р., Зырянов В. В., Садырин Д. И., Пятин К. О.,  
Вятский государственный университет, г. Киров, Россия  
I. Dyukin, V. Zyryanov, D. Sadyrin, K. Pyatin,  
Vyatka State University, Kirov, Russia

*Аннотация.* Описаны методы для обеспечения эффективного экранирования от электромагнитных помех микропроцессорной релейной защиты.

*Annotation.* Methods for providing effective shielding from electromagnetic interference of microprocessor relay protection are described.

*Ключевые слова:* электромагнитное излучение, устройства защиты, электромагнитное воздействие, защита от помех, микропроцессорная релейная защита.

*Key words:* electromagnetic radiation, protection devices, electromagnetic interference, interference protection, microprocessor relay protection.

## ВВЕДЕНИЕ

Антенные системы и устройства для электропитания генерируют токи, которые могут проникать через непроводящие материалы, такие как окна, двери и воздуховоды, и представляют основной путь, по которому электромагнитные помехи могут влиять на электронику. Эти токи могут достигать тысяч ампер, а напряжение на линиях может быть очень высоким. Даже антенны небольшой длины могут генерировать электромагнитные помехи, которые могут проникать через диэлектрические материалы и вызывать токи в проводке. Особенно уязвимы длинные воздушные линии электропередачи, которые могут принимать электромагнитные волны из большой площади и передавать их на чувствительную электронику [3].

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для снижения влияния электромагнитных помех используются различные меры, такие как установка трансформаторов, силовых и измерительных устройств, которые снижают ток и напряжение на несколько уровней и обеспечивают защиту работы средств РЗА. Основной защитой от помех является защита от кондуктивных помех.

Оптические каналы связи, используемые в релейной защите, также являются чувствительными к электромагнитным помехам, поскольку контроллеры, которые преобразуют электрические сигналы в оптические, и

восстанавливающие их на другом конце, могут подвергаться сбоям и повреждениям. Большие системы SCADA с микропроцессорными контроллерами и элементами, подключенными к компьютерной сети, также могут подвергаться даже малым значениям электромагнитных помех. Широкополосные протоколы, используемые в системах передачи данных, такие как ATM 155, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet и т. д., являются особенно уязвимыми к электромагнитным помехам из-за незначительных различий между мощностью требуемого сигнала и мощностью помех в верхнем диапазоне спектра [1].

Дискретные электронные компоненты проявляют большую устойчивость к скачкам напряжения и другим неблагоприятным факторам, в сравнении с микросхемами. Большинство случаев повреждения микропроцессорных устройств связаны с перепадами напряжения, которые могут возникать при коммутации цепи или в результате электростатических разрядов. Такие перепады напряжения, которые могут достигать нескольких киловольт, способны нанести серьезный ущерб внутренним микроэлементам, чипам и процессорам. Промышленное оборудование, основанное на МОП-устройствах, высокой плотности, является наиболее уязвимым для электромагнитных воздействий, так как такие устройства очень чувствительны к высоковольтным переходным процессам. Одной из особенностей МОП-устройств является низкое «смертельное» напряжение (несколько десятков вольт), которое может привести к частичному или полному разрушению устройства.

Полупроводниковые отказы обычно связаны с перегревом или пробоем изоляции. Повреждения микросхем или элементов памяти, вызванные электромагнитными воздействиями, могут быть скрыты и не обнаружены тестами. Такие повреждения могут проявляться неожиданно. Кроме того, электромагнитные воздействия могут вызывать случайные обратимые ошибки, возникающие в результате незначительных изменений содержимого элемента памяти, называемые «программные ошибки» или «программные сбои» [2].

С каждым годом полупроводниковые элементы становятся все меньше, изолирующие материалы становятся тоньше, а напряжение срабатывания становится меньше, что приводит к увеличению скорости работы и упаковки элементов памяти. Однако, это также приводит к повышенной уязвимости элементов памяти к электромагнитным импульсам, что становится проблемой в современных высокоинтегрированных микросхемах микропроцессорных устройств. Клетка Фарадея может использоваться для защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ), но высокочастотные импульсы могут все равно проникать через зазоры, стеклянные окна и воздуховоды, вызывая разрушение полупроводниковых устройств и возникновение проблем. Поэтому, при оценке защиты устройства от ЭМИ, необходимо учитывать возможность частичной или неполной защиты, которая может вызвать дополнительные проблемы.

Опасное свойство ЭМИ – «эффект замедленного действия ЭМИ» – проявляется в первые минуты после ядерного или электромагнитного взрыва, вызывая локальные электромагнитные поля и резкие изменения напряжения на электрических системах и волнах, распространяющихся на большие расстояния по линиям электропередачи [2].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для обеспечения эффективного экранирования от электромагнитных помех необходимо использовать кабели управления, которые обладают сочетанием плетеного экрана и фольги. Кабели с двойным экранированием и комбинированным экраном из оплетки и фольги обеспечивают наилучшую защиту от помех, сохраняя приемлемые экранирующие свойства в широком диапазоне частот вплоть до ГГц. Однако, эффективность экранирования кабеля в значительной степени зависит от эффективности заземления. Экранирование кабеля заземляется с двух сторон, чтобы обеспечить дополнительную цепь с гораздо меньшим сопротивлением для высокочастотных сигналов. Это позволяет компенсировать ток в экране кабеля и защищать от высокочастотных импульсов, излучаемых в окружающую среду.

Кроме того, в связи с появлением новых опасностей, продолжается использование электромеханических защитных реле, устойчивых к мощному ЭМИ. Также разрабатываются новые типы электромеханических реле, способные обеспечить резервную защиту на основе современных технологий и материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич, В. И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты / В. И. Гуревич // Компоненты и технологии. – 2010. – № 2. – Ч. 1. – С. 80–84; № 3. – Ч. 2. – С. 91–96 ; № 4. – Ч. 3. – С. 91–96.
2. Дьяков, А. Ф. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / А. Ф. Дьяков, И. П. Кужекин, Б. К. Максимов. – М. : Издат. дом «МЭИ», 2011. – 455 с.
3. Концепция развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса: Приложение № 1 к протоколу Правления ОАО «Россети» от 22.06.2015 № 356пр. – Электрон. текстовые дан. – М., 2015. – 49 с.

АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ В ГОРОДСКОЙ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ  
ANALYSIS OF EMERGENCY SHUTDOWNS IN THE CITY  
DISTRIBUTION ELECTRICAL GRID

Сергеенко И. М., преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
I. Sergeenko, Senior Lecturer  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Были проанализированы данные по отключениям в городской электрической сети. В результате были определены следующие показатели, характеризующие надежность распределительной сети: количество отключений линий по подстанциям и отключений в год на 100 км, SAIDI, статистика причин отключений линий. Полученные данные показали довольно высокую надежность рассчитываемой сети.

*Abstract.* Data on outages in the city electrical network were analyzed. As a result, the following indicators characterizing the reliability of the distribution network were determined: the number of line outages by substations and outages per year per 100 km, SAIDI, statistics of the reasons for line outages. The obtained indicators showed a rather high reliability of the calculated electrical grid.

*Ключевые слова:* распределительная сеть, аварийные отключения, надежность, виды повреждений, SAIDI.

*Key words:* distribution grid, emergency shutdowns, reliability, types of damage, SAIDI.

## ВВЕДЕНИЕ

Для исследования аварийных отключений рассматривается город с населением 61847 человек, занимающий площадь 24,6 км<sup>2</sup>. Электро-снабжение данного города осуществляет городским районом электрических сетей (ГРЭС).

На обслуживаемой территории ГРЭС расположено 3 питающих центра (ПЦ) и 13 распределительных пунктов (РП):

- ПС «Луч» 110/35/10 кВ, ПС «Завод» 110/10 кВ, ПС «Двор» 110/10 кВ;
- РП-1, РП-2, РП-3, РП-4, РП-5, РП-6, РП-7, РП-8, РП-9, РП-10, РП-11, РП-12, РП-Модуль.

Основными источниками питания для обслуживаемых подстанций являются узловые подстанции:

- «Город» 330/110/10 кВ;
- «Дороги» 110/35/10 кВ.

В распределительных сетях 10/0,4 кВ ГРЭС присутствуют объекты распределенной генерации.

Полностью отсутствуют накопители электрической энергии.

Электроснабжение города представляет собой систему связанных между собой элементов генерации, передачи, преобразования и потребления электрической энергии. Распределительная сеть 10 кВ ГРЭС характеризуется массовостью и разветвленностью, преобладает выполнение сетей кабельными линиями.

#### **ПС «Двор» 110/10 кВ.**

Общая протяженность распределительных сетей 10 кВ составляет 49,264 км. Доля проводов СИП-3 составляет не более 18 %. Кабельные линии (вставки) составляют более 91 %.

Кабели (вставки) с алюминиевыми жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена в полиэтиленовой оболочке отсутствуют.

подавляющее большинство кабельных линий имеют длину не более 1 км.

Основная защита линий 10 кВ от повреждений установлена на 1 и 2 секции шин ПС. Применена защита типа МТЗ-610.ЛЗМ производства ОАО «Белэлектромонтажналадка».

#### **ПС «Завод» 110/10 кВ.**

Общая протяженность распределительных кабельных сетей 10 кВ составляет 35,84 км. Кабели (вставки) с алюминиевыми жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена в полиэтиленовой оболочке отсутствуют. Кабельные линии (вставки) составляют 100 %.

подавляющее большинство кабельных линий имеют длину не более 1 км.

Основная защита линий 10 кВ от повреждений установлена на 1 и 2 секции шин ПС. Тип защит – МР-500 производства ОАО «Белэлектромонтажналадка».

#### **ПС «Луч» 110/35/10 кВ.**

Общая протяженность распределительных сетей 10 кВ составляет 191,18 км. Воздушные линии составляют порядка 22,6 км. Доля проводов СИП-3 составляет не более 1 %. Кабельные линии (вставки) составляют порядка 168,58 км.

Кабели (вставки) с алюминиевыми жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена в полиэтиленовой оболочке отсутствуют.

подавляющее большинство кабельных линий имеют длину не более 1 км.

На всех подстанциях сечения кабелей ступенчато уменьшаются от головных участков к концу линии, имеет место большое число резервных связей, выполненных с использованием разъединителей с ручным приводом.

Конфигурация сети выполнена по двухлучевой и кольцевой схеме, что обеспечивает независимое питание потребителей по двум секциям шин. Каждой секции шин соответствуют свои распределительные пункты (РП), получающие питание по двум вводам. Далее от РП запитываются цепочки трансформаторных подстанций. Коммутационная аппаратура подстанций по высокой стороне выполнена обычными выключателями нагрузки, а в

качестве перемычки между секциями шин смонтированы шинные мосты с соответствующими секционными разъединителями. Данная структура характерна для потребителей первой и второй категории.

В нормальном режиме кольцо имеет разрыв на какой-либо ТП в цепочке. Этот разрыв необходим для обеспечения селективности защит и для обособленной работы каждой части цепи. Данная схема применяется для потребителей третьей категории.

Режим работы нейтрали в городских электрических распределительных сетях города – режим компенсированной нейтрали. Особенностью систем электроснабжения промышленных предприятий является то, что на присоединениях 10 кВ всех объектов кабельной сети, включая ТП, в соответствии с требованиями ПУЭ предусмотрена установка кабельных ТТНП (ТЗЛМ-1-УЗ, ТЗРЛ-10), а их вторичные обмотки соединены последовательно и нагружены на пусковой орган (реле тока) защиты.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

По данным, предоставленным ГРЭС, была составлена и проанализирована статистика по отключениям линий, состоящих на балансе. Было подсчитано количество отключений КЛ и КВЛ по годам для всех имеющихся подстанций на балансе ГРЭС за период 2017–2022 год, полученные данные приведены на рис.

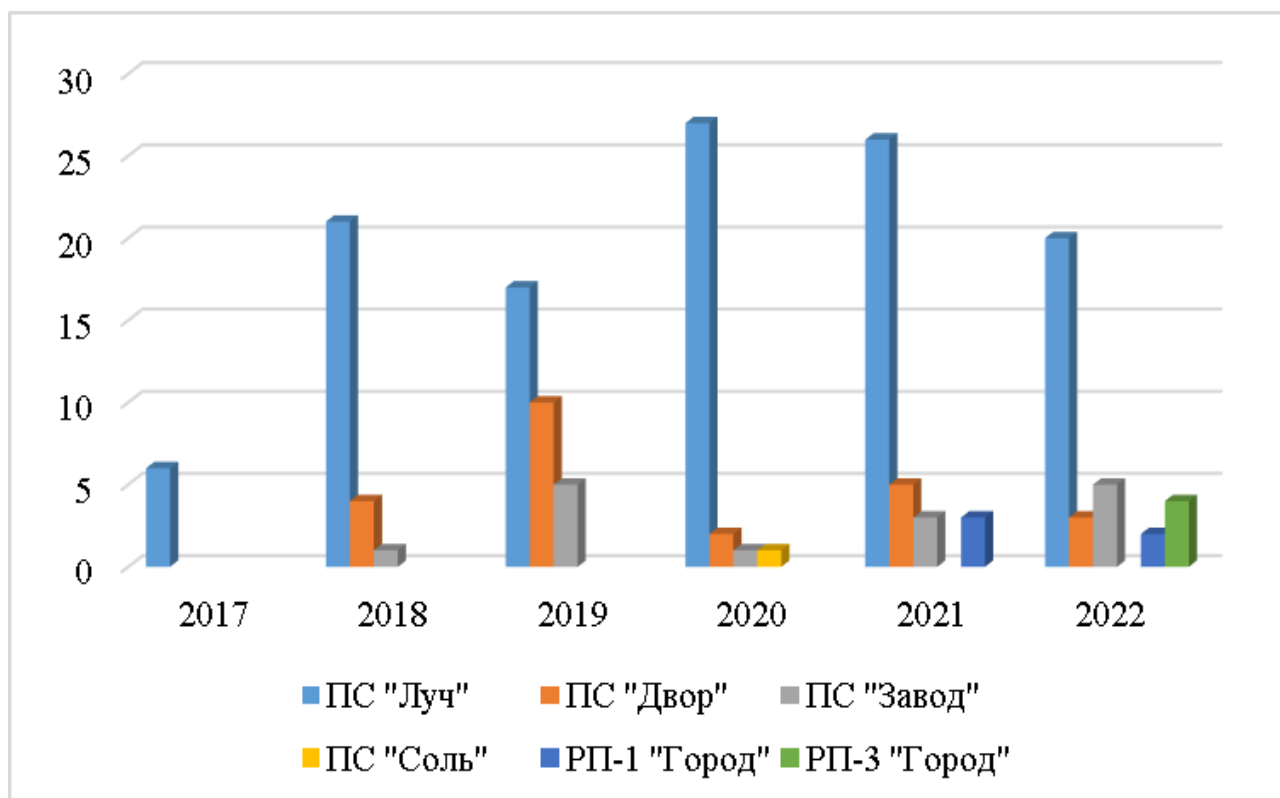


Рис. Количество отключений для подстанций по годам

Суммарное количество аварийных отключений за рассматриваемый период составило 166. В результате анализа было определено, что

наибольшее количество аварийных отключений наблюдается на ПС «Луч» как по годам, так и суммарно за весь рассматриваемый период.

После была составлена статистика по аварийным отключениям для каждой КЛ и КВЛ по подстанциям. По данной статистике были установлены линии, имеющие наибольшее количество повреждений.

Для каждой рассматриваемой линии было определено число отключений в год на 100 км линии  $N_i$ , откл./год по формуле (1):

$$N_i = \frac{P_i}{t \cdot l_i} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $P_i$  – количество аварийных отключений в КЛ, КВЛ за рассматриваемый период;

$t$  – рассматриваемый период, год;

$l_i$  – длина рассматриваемой линии, км.

Также определили число отключений в год на 100 км для каждой подстанции  $N_{ПСi}$ , откл./год по формуле (2):

$$N_{ПСi} = \frac{\sum P_i}{t \cdot \sum l_i} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $\sum P_i$  – суммарное количество аварийных отключений в КЛ, КВЛ от-

носящихся к рассматриваемой ПС за рассматриваемый период;

$\sum l_i$  – суммарная длина рассматриваемых КЛ, КВЛ, км.

В результате расчетов наиболее повреждаемыми линиями по ПС рассматриваемой сети оказались: по ПС «Луч» – КВЛ № 231, КЛ № 249, по ПС «Двор» – КВЛ № 539, по ПС «Завод» – КЛ № 149, по ПС «Соль» – КЛ № 122, по РП – 1 «Город» – КЛ № 4, по РП – 3 «Город» – КЛ № 33, КЛ № 37.

Суммарная длина ЛЭП равняется 276,28 км. Число отключений в год на 100 км для ГРЭС составило 12,02 откл./год.

Для повышения надежности указанных участков следует принимать дополнительные мероприятия такие как: замена старых кабелей новыми, обладающими лучшими характеристиками, изменение способа прокладки, увеличение площади сечения участка, применение защитных устройств от механических повреждений и т. д.

Далее была составлена статистика причин, по которым было произведено аварийное отключение участка [1].

В результате самыми распространенными причинами отключения участков оказались повреждение изоляции КЛ и повреждение в сети абонента табл.

## Причины повреждения ЛЭП рассматриваемой сети

Причина повреждения	Количество
Повреждение изоляции КЛ	74
Повреждение в сети абонента	30
Повреждение концевой муфты	19
Повреждение соединительной муфты	9
Повреждение на КТП, РП, СТП, ТП и т. д.	13
Не установлено	6
Повреждение на потребительских КЛ	5
Повреждение изолятора	3
Перекрытие птицами, животными	2
Обрыв вязки	1
Обрыв провода	1
Повр. выключателя	1
Повреждение ТТ	1
Итого	165

В завершение был рассчитан показатель SAIDI. SAIDI оказался равен 0,7, что свидетельствует о достаточно высоком уровне надежности городской распределительной сети [2].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа суммарное количество аварийных отключений для рассматриваемой сети составило 166 за период 2017–2022 год. Число аварийных отключений в год на 100 км для сети ГРЭС составило 12,02. Самыми распространенными причинами отключения участков оказались повреждение изоляции КЛ и повреждение в сети абонента. SAIDI равен 0,7. Полученные данные свидетельствует о довольно высокой надежности, рассматриваемой городской распределительной сети.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Острейковский В. А. Теория надежности: учебник для вузов / В. А. Острейковский – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.
2. Модели оценки влияния надежности электрической сети на электроснабжение потребителей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ozlib.com/800947/tehnika/model\\_otsenki\\_vliyaniya\\_nadezhnosti\\_elektricheskoy\\_seti\\_elektrosnabzhenie\\_potrebiteley/](https://ozlib.com/800947/tehnika/model_otsenki_vliyaniya_nadezhnosti_elektricheskoy_seti_elektrosnabzhenie_potrebiteley/). – Дата доступа: 05.04.2023.



УДК 621.311.017

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ  
СЕТИ 10 КВ РАЙОНА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ  
OPTIMIZATION OF THE CURRENT 10 KV DISTRIBUTION AREA OF  
ELECTRIC NETWORK

Гецман Е. М., аспирант; Калентионок Е. В., к-т. техн. наук, доцент,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
E.Hetsman, Graduate student; E. Kalentionok, Candidate of technical Sciences,  
Associate Professor,  
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Рассмотрена задача оптимизации распределительных электрических сетей для повышения надежности системы электроснабжения сельских потребителей действующего района электрических сетей (РЭС).

*Abstract.* The problem of optimizing distribution electrical networks to improve the reliability of the power supply system for rural consumers of the operating area of electrical networks (RES) is considered.

*Ключевые слова:* распределительная электрическая сеть, оптимизация режима, точка нормального разрыва, потери электроэнергии, режим работы.

*Key words:* electrical distribution network, mode optimization, normal breaking point, energy consumption, operating mode.

## ВВЕДЕНИЕ

Основные проблемы электроэнергетики на сегодняшний день можно изложить следующим образом: возрастающий физический износ действующего оборудования; технологически и морально устаревший парк оборудования; высокий уровень потерь в электрических сетях; появление новых и возобновляемых источников энергии; возрастающие требования к качеству электроэнергии. На первый план в условиях постоянного снижения потерь электроэнергии в системе электроснабжения выходит тенденция по оптимизации режимов работы сетей.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Система централизованного электроснабжения сельских потребителей РЭС состоит из двух типов сетей:

- питающих (воздушных линий (ВЛ) 110 и 35 кВ и подстанций (ПС) 110/35/10, 110/10 или 35/10 кВ) сетей;
- распределительных (ВЛ 10 кВ, потребительские ПС и линии 380/220 В) сетей.

Основным принципом построения сетей 10 кВ энергорайона является магистральный принцип, предусматривающий построение (формирование) магистральных линий электропередачи в разветвленной электросети между двумя источниками электропитания через точку нормального разрыва (пункт автоматического включения резерва), с обеспечением нормированного качества напряжения потребителей при отключении одного источника питания в послеаварийном режиме. В свою очередь, это приводит к расширению цепочки электроснабжения и приводит к увеличению потерь и падению напряжения в конце схемы, а также снижению надежности снабжения энергией потребителей.

Сельские потребители разбросаны по значительным территориям, плотность электрических нагрузок низкая и составляет порядка 5–15 кВт/км<sup>2</sup>. В связи с этим приходится передавать сравнительно небольшие мощности электроэнергии на большие расстояния.

Выделяется значительное преобладание протяженности воздушных линий электропередач над протяженностью кабельных линий (КЛ). Данная особенность влияет на ход расчет параметров режима работы системы, так как для кабельных линий индуктивное сопротивление невелико  $x_0 = 0$ , данный параметр не учитывается при расчетах либо им пренебрегают.

Максимальные и средние значения характеристик распределительных линий 10 кВ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Техническая характеристика ВЛ 10 кВ

№ п.п	Показатель	Ед. изм.	Количество
1	Количество воздушных линий	шт.	60
2	Количество кабельных линий (вставок)	шт.	27
3	Общая протяженность воздушных линий	км	890,996
4	Общая протяженность кабельных линий (вставок)	км	183,735
5	Максимальная длина ВЛ вместе с отпайками	км	34,728
6	Максимальная длина кабельной линии (вставки)	км	9,589
7	Количество ВЛ без отпаяк	шт.	2
8	Максимальное количество отпаяк от одной ВЛ	шт.	17
9	Максимальное количество ТП, питаемых от одной ВЛ	шт.	8
10	Среднее количество ТП, питаемых от одной ВЛ	шт.	8
11	Максимальная суммарная мощность ТП, подключенных к одной ВЛ	кВА	6081
12	Средняя суммарная мощность ТП, подключенных к одной ВЛ	кВА	17520
13	Протяженность ВЛ, выполненных СИП	км	110,453
14	Протяженность кабельных линий, выполненных кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена в полиэтиленовой оболочке	км	35,008

Доля ВЛ 10 кВ со 100 % износом составляют 60,5 % (539,215 км). Доля КЛ 10 кВ со 100 % износом составляют 3,9 % (7,08 км). Кабельные линии (вставки) составляют не более 6,1 %. Доля кабелей (вставок) с алюминиевыми жилами, с изоляцией из сшитого полиэтилена в полиэтиленовой оболочке составляют не более 13 %. Подавляющее большинство линий имеют длину не менее 4 км и несколько отпаяк. Длины отдельных отпаяк от большинства ВЛ не превышают 100 м.

Структура потерь электроэнергии в сетях сельскохозяйственного назначения в последние годы характеризуется данными табл. 2.

Таблица 2

Структура потерь электроэнергии в сетях 10 кВ

№ п.п	Наименование элемента Электрической сети 10 кВ	Доля потерь электроэнергии в рассматриваемом элементе в % от общего количества
1	Трансформаторные подстанции (ТП) 10/0,4 кВ	31
2	Линии электропередачи напряжением 10 кВ	8,93
3	Линии электропередачи напряжением 0,4 кВ	32,98

Основное влияние на величину потерь оказывают потери в сети 0,4 кВ. Однако, следует отметить существенное значение потерь на трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ. Это говорит о том, что необходимо обратить внимание на составление небаланса на подстанциях, следовательно, требуется произвести суточные замеры по загрузке трансформаторов. На основании замеров делается вывод о рационализации работы силовых трансформаторов, для проведения анализа динамики их загрузки.

В качестве исходных данных использованы сведения о суточном энергопотреблении вводных трансформаторов по стороне 10 кВ каждой из ПС. В табл. 3 приведены полученные контрольные замеры для зимнего периода (15 декабря месяца 2021) года.

Таблица 3

Сведения о суточном потреблении вводных трансформаторов по стороне 10 кВ

№ п.п	Наименование питающего центра (ПС)	Диспетчерский номер трансформатора	Суточное энергопотребление, кВт*ч			
			Е+	Е-	Р+	Р-
1	ПС «1» 110/35/10 кВ	T1	62 135,45	–	181 468,14	–
		T2	8 129,53	–	26 152,66	–
2	ПС «2» 110/35/10 кВ	T	16 120,20	–	10 450,08	–

3	ПС «3» 110/35/10 кВ	T1	36 744,70	–	21 098,67	–
		T2	411	–	210,86	–
4	ПС «4» 110/10 кВ	T-1 1СШ	55 227	–	4 727	–
		T-1 3СШ	20 393	–	1 023	–
		T-2 2СШ	49 985	–	4 775	–
		T-2 4СШ	1 9087	–	134	–
5	ПС «5» 110/35/10 кВ	T1	6 209,77	–	1 053,09	–
		T2	20 589,69	–	7 275,8	–
6	ПС «6» 35/10 кВ	T1	70 660 810	–	3 960 3386	–
		T2	37 023,33	–	15 161,16	–
7	ПС «7» 35/10 кВ	T	14 195 572	–	9 909 121	–
8	ПС «8» 35/10 кВ	T1	168,9	–	69,55	–
		T2	8 975,22	–	3 333,08	–
9	ПС «9» 110/10 кВ	T-1 1СШ	1 686,2	–	5,6	–
		T-1 3СШ	3 239,6	–	47,6	–
		T-2 2СШ	1846	–	7,8	–
		T-2 4СШ	2 037,1	–	17,7	–

Основная задача оптимизации распределительной сети, основывается на использовании первоначально метода поочередного переноса точек нормального разрыва (ТНР) [1]. Выделяются два критерия выбора ТНР в зависимости от времени года. В летнее время точка разрыва определяется путем проведения расчета режима электрической сети или по равенству моментов нагрузки. А в зимнее время по минимальному значению недоотпуска электроэнергии потребителям.

Для оптимизации схемы электроснабжения потребителей РЭС применялся алгоритм и программа для расчета и анализа режимов и потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях 6–20 кВ Gorsg разработки энергетического факультета Белорусского национального технического университета [2].

На основании выше изложенного произведен расчет по отысканию оптимальных мест размыкания электрической сети 10 кВ существующего района по критерию наименьших потерь.

Красными треугольниками на схеме сети и синие в расчетной программе показаны точки нормальных разрывов (рис. 1). Они обозначены на секционных выключателях как в распределительном пункте РП-1101 так и на трансформаторных подстанциях (ЗТП-1, ЗТП-16, ЗТП-2). Приведенные на схеме точки нормального разрыва обозначают, что в данных местах схемы коммутационный аппарат (секционный выключатель либо разъединитель) должен быть отключен в нормальном режиме работы сети, таким образом, точки разделяют сеть, которая питается от двух разных источников, что говорит об их не параллельной работе. В данном случае применяется критерий надежности, показывающий, что при погашении одной магистрали, остается напряжение на второй секции всех ЗТП второй магистрали.



- до оптимизации [кВт]: 558,281;
- после оптимизации [кВт]: 463,303.

Снижение нагрузочных потерь в сети 6–10 кВ: 94,978 кВт (17,01 %).

Суммарное снижение потерь мощности: 94,98 кВт.

Сложность расчетов определяется, прежде всего, двумя причинами:

- большой объем сети, достигающей многих десятков элементов в исходной схеме;

- вариантность режимов работы сети, связанная с изменением конфигурации сети при оперативных и аварийных переключениях, различными режимами работы электротехнического оборудования, приводящим к существенным изменениям ТНР, а также параметров оборудования в схемах замещения.

Исходя из особенностей получения эффекта, в первую очередь для рассматриваемого РЭС рекомендуется:

- установка на подстанциях средств телеизмерений параметров режима сети и средств АСКУЭ (эффект от установки средств телеизмерений параметров режима и средств АСКУЭ определяется дополнительным снижением потерь за счет использования более точной информации при оптимизации режимов электрических сетей и принятия других решений, обусловленных уточнением расчетных значений технических потерь);

- замена измерительных трансформаторов на трансформаторы с повышенными классами точности и номинальными параметрами, соответствующими фактическим нагрузкам;

- замена существующих приборов учета электроэнергии на новые приборы с улучшенными характеристиками;

- проведение переключений в схеме сети, обеспечивающих снижение потерь электроэнергии за счет перераспределения ее потоков по линиям, в том числе за счет оптимизации мест размыкания контуров различных номинальных напряжений – о поиске лучшего места размыкания;

- отключение в режимах малых нагрузок одного из трансформаторов на подстанциях с двумя и более трансформаторами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных расчетов распределительной электрической сети 10 кВ РЭС по алгоритму и программе Gorsr показана необходимость рассмотрения переноса порядка 45 % точек нормального разрыва в тот или иной узел для снижения нагрузочных потерь мощности до 17,01 % и существенно улучшить условия работы потребителей электроэнергии. Следует отметить, что целесообразность изменения существующих точек нормального разрыва принимается во внимание при разработке технических мероприятий по автоматизации наиболее проблемных линий электропередачи 10 кВ с низкой надежностью электроснабжения потребителей района.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Опалева Г. Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник: Учеб. пособие. – М.: ФОРУМ: ИНФРА, 2006. – 480 с.
2. Фурсанов М. И., Гапанюк С. Г. Алгоритм и программа для расчета и анализа режимов и потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях 6–20 кВ. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2013; (2): С 11–20.

УДК 629.7.05

АВТОНОМНЫЙ ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС  
КВАДРОКОПТЕРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ  
AUTONOMOUS FLIGHT AND NAVIGATION COMPLEX  
OF A QUADROCOPTER FOR POWER LINES CONTROL

Шейников А. А., к-т техн. наук, доцент; Иваницкий Л. А.,  
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь  
Суходолов Ю. В., к-т техн. наук, доцент,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
A. Sheinikau, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
L. Ivanitski,  
Military academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus  
U. Suhodolov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Представлена концепция автономного пилотажно-навигационного комплекса квадрокоптера для автоматического контроля линий электропередачи. Основу предлагаемого комплекса составляет бортовая многоспектральная система технического зрения, возможности которой обеспечивают одновременное осуществление автономной воздушной навигации носителя и роботизированного обследования линий электропередачи.

*Abstract.* The concept of a autonomous flight and navigation complex of a quadcopter for automatic power lines control is presented. The basis of the proposed complex is an onboard multispectral vision system, the capabilities of which provide simultaneous autonomous air navigation of the carrier and robotic inspection of power lines.

*Ключевые слова:* роботизированное обследование линий электропередачи, автономный пилотажно-навигационный комплекс квадрокоптера, бортовая многоспектральная система технического зрения.

*Key words:* robotic power lines control, autonomous flight and navigation complex of a quadcopter, onboard multispectral vision system.

## ВВЕДЕНИЕ

Визуальный контроль (непосредственный и с использованием технических средств наблюдения) позволяет оценивать техническое состояние линий электропередачи (ЛЭП) без их отключений, что повышает надежность системы электроснабжения и качество электроэнергии. В настоящее время существует несколько способов обследования ЛЭП: пешие обходы, облеты на вертолете, контроль с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА) (рис. 1). Последний способ наиболее эффективен в условиях большой протяженности сети ЛЭП Республики Беларусь (рис. 2). При этом



для автоматизации процесса обследования ЛЭП требуется обеспечение полета БЛА в соответствии с заданным маршрутом (над ЛЭП) без вмешательства оператора. Главной проблемой при автоматическом облете трасс с помощью БЛА являются помехи, обусловленные действием сильного электромагнитного поля (ЭМП) вокруг объектов контроля (ЛЭП) [1].



Рис. 1. Облет ЛЭП на вертолете и с помощью БЛА

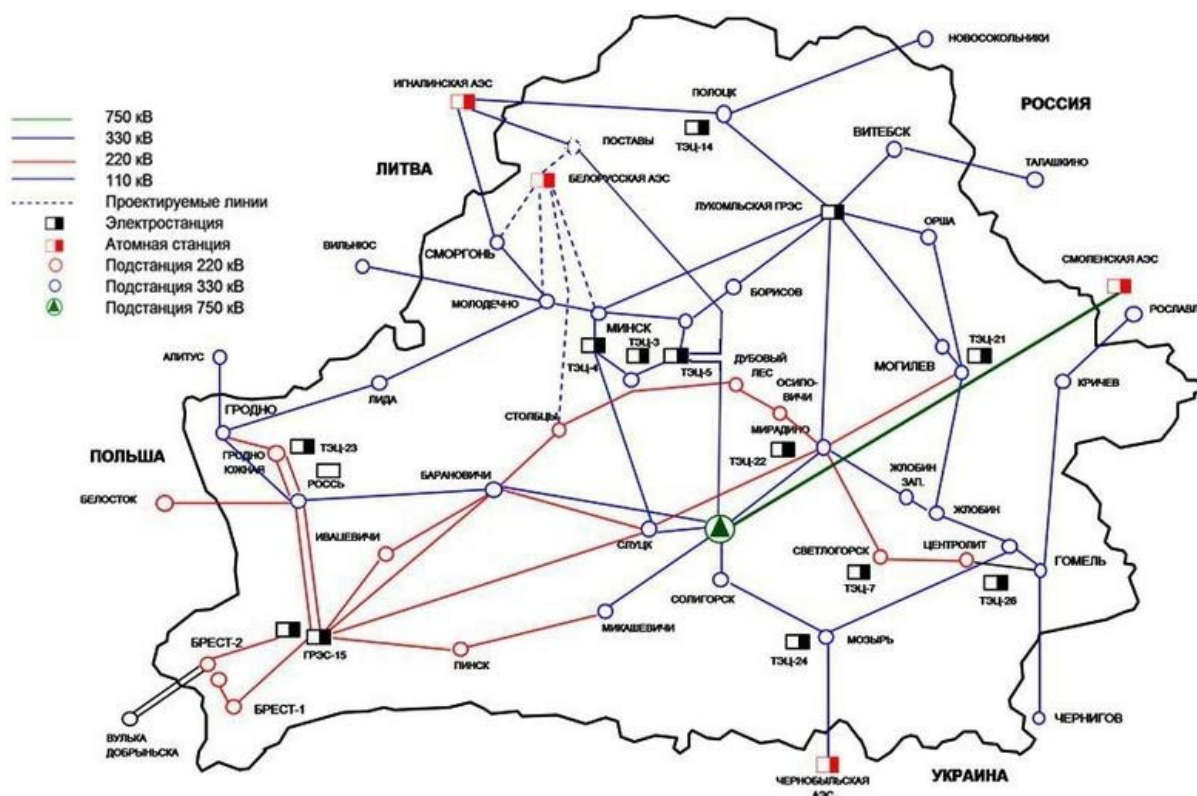


Рис. 2. Сеть ЛЭП Республики Беларусь

Дело в том, что основным способом определения навигационных параметров БЛА в настоящее время является использование спутниковых радиосигналов позиционирования. При этом бортовые радиоприемники БЛА в рассматриваемых условиях имеют низкую помехоустойчивость. В настоящее время ведутся исследования по разработке автономных систем навигации, не требующих наличия внешнего поля сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Так, например, для рассматриваемой области разработан способ автоматического управления квадрокоптером с

использованием данных о напряженности электромагнитного поля в каждой точке пространства вокруг ЛЭП [2] (рис. 3). Этот способ обладает рядом недостатков, главными из которых являются необходимость установки на БЛА дополнительных датчиков, пропорционально снижающих вес полезной нагрузки, и сложность предполетной калибровки измерительных каналов. Требуется поиск альтернативного способа автономной воздушной навигации, лишенного перечисленных недостатков.

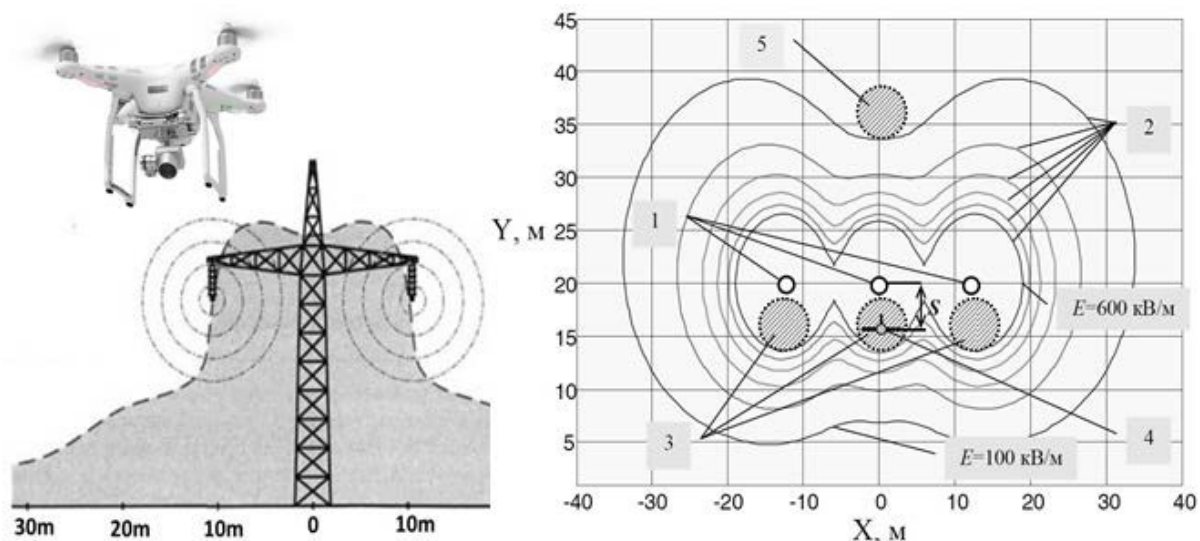


Рис. 3. Распределение напряженности ЭМП ЛЭП

Выход видится в использовании для этих целей потенциала полезной нагрузки квадрокоптера – бортовой оптико-электронной системы.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В последнее время наметилась тенденция использования для обследования ЛЭП робототехнических комплексов, оснащенных системами технического зрения (СТЗ) с несколькими бортовыми цифровыми камерами (БЦК) различных спектральных диапазонов [3]. Так, например, с помощью БЦК, работающей в дальнем инфракрасном диапазоне, можно обнаруживать самые минимальные различия температур контролируемого оборудования (до 0,01 °С). Инфракрасная (ИК) съемка позволяет идентифицировать ненадежные контакты, перегретые участки, источники потерь энергии в сети и т. д. Кроме того, из-за своего активного сопротивления даже исправная ЛЭП рассеивает тепловую энергию в окружающее пространство, что хорошо обнаруживается с помощью ИК БЦК (рис. 4). Учитывая тот факт, что ЛЭП являются контрастными в различных диапазонах спектра электромагнитного излучения, однородными, протяженными объектами с известным направлением и достаточно резкими границами (рис. 5), их можно одновременно использовать и для целей воздушной навигации БЛА в качестве материальных линий заданного пути (ЛЗП).

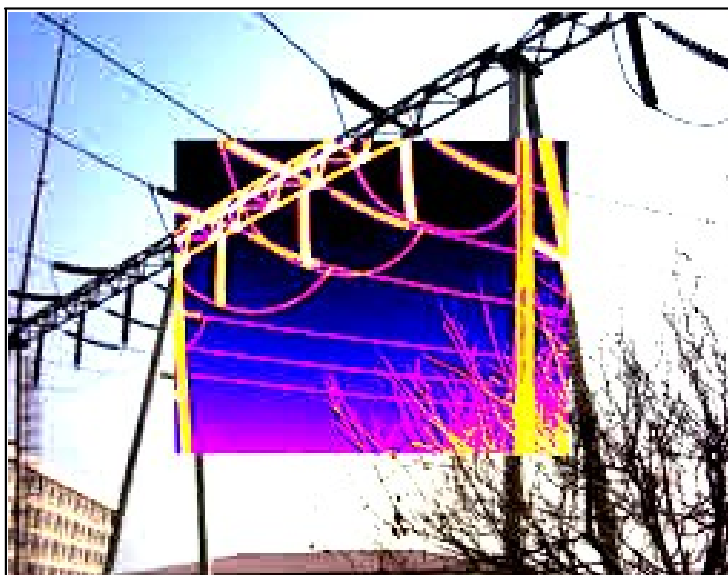


Рис. 4. Изображение ЛЭП в оптическом и инфракрасном диапазонах



Рис. 5. Изображение ЛЭП, обработанное детектором (оператором обнаружения) границ

В этом случае алгоритм работы системы управления автономным полетом БЛА можно описать так (рис. 6):

1. Построение виртуальной ЛЗП – прямой, перпендикулярной верхней границе кадра и проходящей через центр матрицы цифровой камеры.
2. Оценка смещения физической ЛЗП относительно виртуальной ( $\delta$ ) в процессе горизонтального полета.
3. Коррекция значений управляющих сигналов автопилота с целью минимизации  $\delta$  за счет изменения направления полета БЛА [4].
4. Оценка толщины маркерной линии (в пикселях), представляющей собой цифровое изображение (ЦИ) провода ЛЭП.
5. Коррекция значений управляющих сигналов автопилота с целью выдерживания заданной толщины маркерной линии на ЦИ (при постоянном фокусном расстоянии объектива БЦК) за счет изменения высоты полета БЛА (стабилизация высоты полета с использованием информации о толщине проводов на ЦИ ЛЭП).



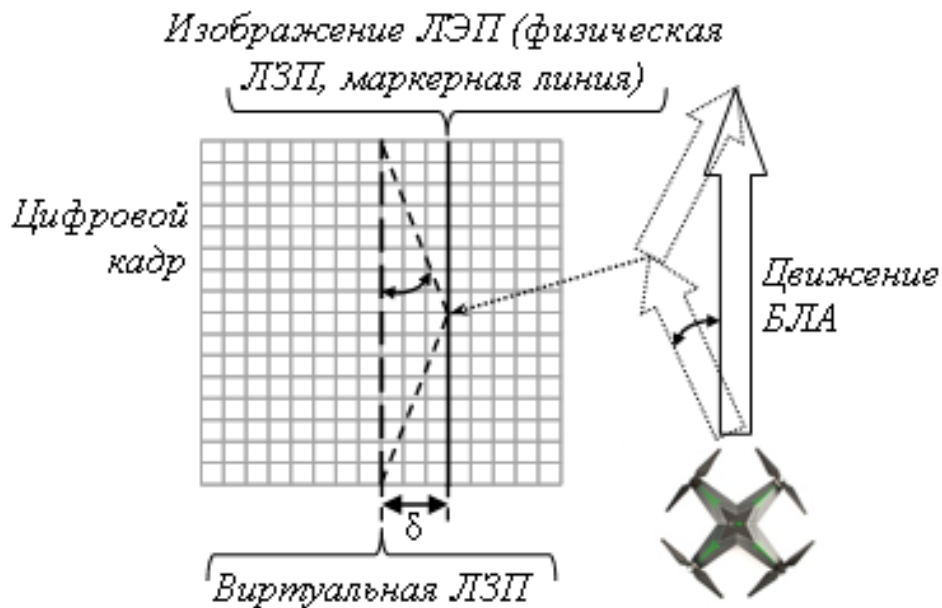


Рис. 6. Устранение автопилотом смещения виртуальной ЛЭП относительно физической

Надежность электроснабжения также во многом зависит от качества содержания просек под ЛЭП. Например, сильные ветра способны ломать деревья, провоцировать обрывы проводов и короткие замыкания, большое количество сухих деревьев повышает пожароопасность в районах прохождения ЛЭП, что также может стать причиной перебоев в электроснабжении. Заращение трасс значительно осложняет наземный контроль за их состоянием, делает труднодоступными аварийные участки, что способствует преждевременному выходу из строя элементов ЛЭП на продолжительное время. Для обеспечения надежности электроснабжения и эффективности обслуживания трасс требуется своевременная расчистка охранных зон ЛЭП. Информация о таких районах собирается в процессе периодического мониторинга трасс различными методами оптико-электронной технической разведки [5]. В связи с тем, что трассы ЛЭП являются контрастными, протяженными объектами с предсказуемым направлением и достаточно резкими границами, имеются возможности организации как автоматического полета БЛА над трассой (просеку можно использовать как проекцию воздушного коридора на земную поверхность), так и автоматического поиска проблемных зон [6] (с функцией отрисовки результатов расчета объемов вырубki) по данным от бортовой СТЗ (рис. 7).

Для одновременного контроля и навигации представляет интерес также трехмерное моделирование трасс ЛЭП (рис. 8). С одной стороны результаты сравнения реконструкций прошлых и текущих изображений трасс ЛЭП наиболее информативно отражают их изменения [5]. С другой – автономные навигационные комплексы мобильных робототехнических систем, использующие трехмерные цифровые модели местности в процессе автоматической локализации, считаются в настоящее время наиболее перспективными [7].

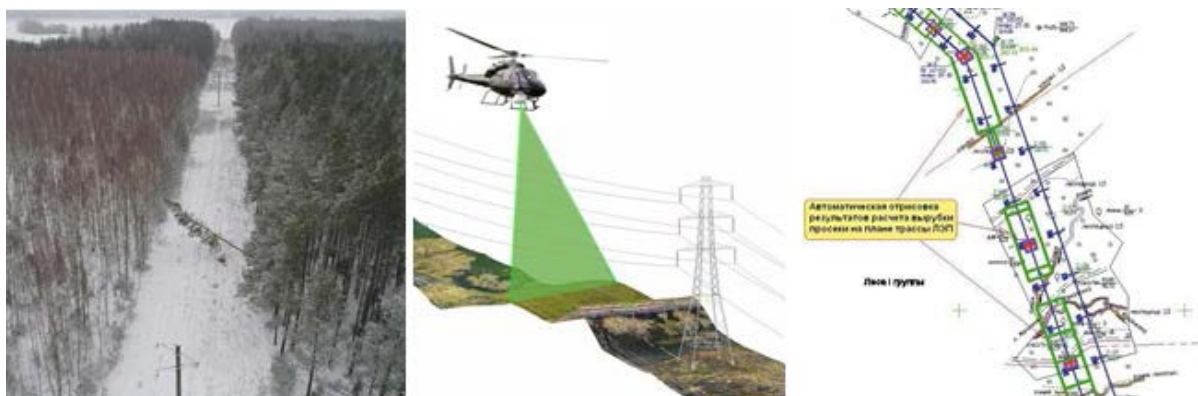


Рис. 7. Контроль зарастания коридора ЛЭП с использованием бортовой СТЗ БЛА

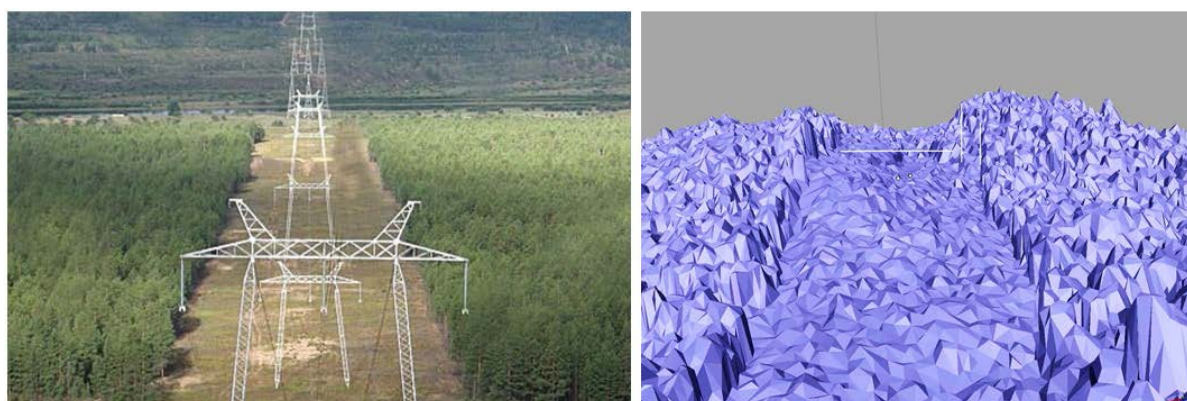


Рис. 8. Трехмерная модель трассы ЛЭП

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоинством представленного способа автоматического управления полетом БЛА является простота и эффективность его практической реализации. Предлагаемая комплексная бортовая система автономной навигации и контроля ЛЭП на базе бортовой СТЗ обеспечивает возможность точного позиционирования мест повреждений ЛЭП и зарастания просек. Результаты проведенных исследований можно отнести к технологиям двойного назначения, так как они, могут быть актуальными в условиях подавления противником сигналов СРНС (о чем свидетельствует опыт большинства современных военных конфликтов). При этом сеть ЛЭП можно использовать в качестве распределенного (рис. 2) наземного навигационного ориентира (обеспечивающего возможность реализации принципа «троллейбусной» навигации).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соленая, О. Я. Характеристики и параметры технического состояния воздушных линий электропередачи / О. Я. Соленая [и др.] // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2021. – Т. 64. – № 7. – С. 583–588.
2. Лебедев, Д. Е. Методы аэродиагностики воздушных линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения / Д. Е. Лебедев // Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 155-летию со дня рождения К. Э. Циолк-

лвского: сб. мат. VIII Всероссийской науч.-техн. конф. / Сибирский федеральный ун-т. – Красноярск, 2012. – С. 42–46.

3. Solyonyj S. V. Robot for inspection and maintenance of overhead power lines / S. V. Solyonyj, O. Ya. Solenaya, V. P. Kuzmenko // Proc. of the 15th Intern. Conf. on Electromechanics and Robotics „Zavalishin's Readings“. – 2020. – P. 487–497.

4. Шейников, А. А. Коррекция ошибок инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата по данным бортовой цифровой камеры / А. А. Шейников, А. М. Коваленко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2019. – № 1 (62). – С. 66–73.

5. Гордиенко, Л. В. Геоинформационная технология мониторинга просек линий электропередач / Л. В. Гордиенко // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 8. – С. 1–10.

6. Шейников, А. А. Использование математических функций библиотеки Open-CV для распознавания объектов воздушной разведки на изображении / А. А. Шейников, А. М. Коваленко // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сб. мат. V Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 15–16 февраля 2018 г. / ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». – Воронеж, 2018. – С. 137–142.

7. Боковой, А. В. Система одновременного картирования, локализации и исследования неизвестной местности по видеопотоку / А. В. Боковой, К. Ф. Муравьев, К. С. Яковлев // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2020. – № 2. – С. 51–61.

УДК 543.522

АКТИВАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОННОГО  
ПОТОКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ РОДИЯ,  
ИНДИЯ И СЕРЕБРА  
ACTIVATION METHOD FOR DETERMINING THE NEUTRON FLUX  
USING DETECTORS BASED ON RHODIUM, INDIUM AND SILVER

Вознесенский М. В., Чернышев В. М., Седов А. Р., Касаткин Н. И.,  
Басов А. А., к-т. техн. наук, доцент; Семенов А. Н., ст. преподаватель,  
Нижегородский государственный технический университет  
им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия  
M. Voznesensky, V. Chernyshev, A. Sedov, N. Kasatkin, A. Basov, Candidate  
of Technical Sciences, Associate Professor; A. Semenenko, Senior Lecturer,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia

*Аннотация.* В работе рассмотрен активационный метод определения величины нейтронного потока с помощью детекторов на основе родия, индия и серебра. Определен период полураспада изотопов, образующихся после активации. Рассчитана величина активационного интеграла для каждого вида детектора. Проведен сравнительный анализ, в ходе которого был определен элемент, обладающий наилучшими качествами по ряду параметров.

*Abstract.* The paper considers an activation method for determining the magnitude of the neutron flux using detectors based on rhodium, indium and silver. The half-life of isotopes formed after activation is determined. The value of the activation integral for each type of detector is calculated. A comparative analysis was carried out, during which the substance with the best qualities in a number of parameters was determined.

*Ключевые слова:* Нейтронно-активационный анализ, нейтронный поток, активационный интеграл, полураспад, детектор, родий, индий, серебро.

*Key words:* Neutron activation analysis, neutron flux, activation integral, half-life, detector, rhodium, indium, silver.

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие ядерной энергетики, а также широкий спектр применения ядерных энергетических установок для различных нужд человека, побуждают к необходимости эффективного решения проблем, основанных на прогнозировании последствий нейтронного облучения живых тканей, узлов механизмов, конструкционных материалов установки, а также радиоэлектронных изделий. Исходя из этого, важно с достаточно высокой точностью определять основные характеристики поля излучения

нейтронов различных энергий. Например, величину плотности потока нейтронов, благодаря которой можно определить флюенс нейтронов на облучаемой поверхности [1].

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Данные о величине нейтронного поля используются при расчете радиационной защиты установки. Для оценки влияния захватного гамма-излучения необходимы сведения о спектре тепловых нейтронов, для расчета прохождения излучения через большие толщины материала – быстрых. Радиометрия нейтронных полей реальных ядерных энергетических установок довольно сложна, и не каждый радиометрический метод будет работоспособным в реальных условиях применения. Кроме высокоинтенсивного нейтронного излучения, большое количество источников ионизирующих излучений в ядерной энергетике обладает также достаточно высоким уровнем гамма-фона. Данный факт определяет невозможность применения некоторых методов анализа нейтронных полей в реальных условиях, таких как, широко распространенного сцинтилляционного метода, или метода водородных пропорциональных счетчиков.

Известны также времяпролетные способы спектрометрии нейтронных полей, основанные на измерении скорости пролета нейтрона от источника до детектора, дальнейшего нахождения его кинетической энергии и, следовательно, восстановлении спектра исследуемого источника. Недостатком данного метода является невозможность измерения произвольных нейтронных потоков, имеющих место в реальных установках. Спектрометры такого типа не являются измерительными приборами, их работа реализуется с помощью сложного комплекса лабораторного оборудования при работе с одним источником ионизирующего излучения.

В работе рассматривается метод активационного анализа нейтронного поля, с помощью детекторов, выполненных из различных материалов. Данный метод имеет некоторые преимущества относительно методов, приведенных ранее. Например, возможно изготовление детектора достаточно малых размеров, что позволяет ему не вносить искажений в поток нейтронов в контролируемой точке, а также производить точечное измерение нейтронного потока. Также появляется возможность восстановления всего сложного энергетического спектра нейтронного излучения при использовании определенных наборов детекторов с наилучшим сечением взаимодействия с нейтронами заданной энергии. Преимуществом является и нечувствительность детекторов к гамма-фону исследуемого источника, что позволяет применять активационный метод для исследования полей высокоинтенсивных источников излучения. Однако данный метод требует значительного времени, необходимого для проведения эксперимента, складывающиеся из времени активации детектора до линии насыщения, времени измерения наведенной активности приборами и времени выдержки детектора. Выдержка необходима для полного распада накопившихся



изотопов, и отсутствия их влияния на дальнейшие измерения. Также данный вид анализа нейтронного поля не дает быстрой информации об исследуемом излучении и применим лишь для исследования постоянных нейтронных потоков, что делает его применение нецелесообразным, например, при пуске или останове ядерного реактора.

Благодаря своим особенностям активационный метод анализа нейтронного потока является одним из самых распространенных методов. Суть метода [2] заключается в том, что специальные вещества (детекторы) подвергаются облучению нейтронным потоком в течение определенного времени (времени активации). Под действием нейтронов в детекторах образуются радиоактивные изотопы, которые в дальнейшем претерпевают распад с выделением ионизирующих излучений. Количество квантов ионизирующего излучения пропорционально числу радиоактивных распадов (активности), которое, в свою очередь, пропорционально изначальному нейтронному потоку. Измеряя наведенную бета-активность в детекторе, можно рассчитать плотность потока нейтронов в контролируемой точке.

К детекторам предъявляется ряд требований [6]. Основным из них является период полураспада изотопов, возникающих в результате облучения нейтронным потоком. Излишне маленький период полураспада ведет к невозможности детектирования активности исследуемого образца, а при слишком большом периоде значительно возрастает время активации, которое в среднем составляет 3–4 периода полураспада, и в следствии этого, растет время измерений и эксперимента. Также детектор должен быть как можно более тонким, для избегания поглощения наведенного бета-излучения материалом самого детектора. Еще одним немаловажным требованием является чистота материала образца – он не должен содержать значительного количества примесей, так как сами примеси могут иметь наведенную активность, которая может значительно увеличить погрешность измерений.

При захвате нейтронов многие элементы образуют радиоактивные изотопы. Однако для практических целей выбор таких элементов ограничен возможностью получения их в удобном для экспериментов виде, достаточным сечением поглощения нейтронов и удобным для измерений периодом полураспада. В работе было решено использовать в качестве радиоактивных детекторов материалы на основе родия, серебра и индия. Чтобы определить какое вещество лучше всего подходит для нейтронно-активационного анализа проведена серия экспериментов, в ходе которых круглые, тонкие пластинки из этих материалов были помещены в поле Pu-Be источника (табл. 1) быстрых нейтронов на расстоянии 13 см от него.

Таблица 1

## Радиационные параметры и размеры источника

Тип источника	Наружный размер, мм		Размер активной части, мм, не более		Поток быстрых нейтронов от источника в угол $4\pi_{ср}$ , нейтр./с.	Активность, Бк, не более
	диаметр	высота	диаметр	высота		
ИБН-8	$24,0 \pm 0,3$	$36,0_{-1,0}$	16,0		$(2,0 \pm 0,4) \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^{10}$

Средняя энергия быстрых нейтронов Pu-Be источника  $E_0 = 4,55 \text{ МэВ}$ .

Активация родия, серебра и индия часто используется при измерениях с тепловыми и надтепловыми нейтронами. Поэтому, между источником и детектором был расположен полиэтиленовый материал, толщиной 3,6 см.

Полиэтилен является хорошим замедлителем, так как содержит большое количество ядер водорода (на 19 % больше, чем у воды). Однако, используемой толщины этого вещества оказалось недостаточно для уменьшения кинетической энергии нейтронов до тепловых значений. Известно, что необходимо 5 см полиэтилена для замедления нейтронов от 10 МэВ до 0,025 эВ. Тогда, с достаточной точностью, можно определить энергию нейтронов после прохождения слоя материала в 3,6 см [3, с. 35–36].

$$E = E_0 \left( \frac{0,025 \text{ эВ}}{10 \cdot 10^6 \text{ эВ}} \right)^{\frac{3,6 \text{ см}}{5 \text{ см}}} = (4,55 \cdot 10^6) \text{ эВ} \cdot \left( \frac{0,025 \text{ эВ}}{10 \cdot 10^6 \text{ эВ}} \right)^{\frac{3,6 \text{ см}}{5 \text{ см}}} \cong 3 \text{ эВ} \quad (1)$$

Все измерения с помощью активационных детекторов были основаны на определении бета-активности с помощью счетчика БЕТА-1-1, наведенной надтепловыми нейтронами в веществе детектора. Чувствительность прибора к гамма-излучению является незначительной и учитывалась в виде паразитного фона.

Накопление изотопов в детекторе, облучаемом надтепловыми нейтронами, определяется результирующим действием двух процессов – образованием активных изотопов и радиоактивным распадом образующихся ядер. Однако, в некоторый момент времени эти процессы выравниваются и количество новых ядер достигает стационарного значения  $N_{нас}$ .

Детекторы активировались нейтронами до максимально возможной бета-активности, называемой активностью насыщения, величина которой пропорциональна максимальному количеству ядер.

$$A_{нас} = \eta \cdot \lambda \cdot N_{нас} = \eta \cdot \lambda \cdot \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot n}{\lambda} = \eta \cdot \sigma \cdot \Phi \cdot n \left( \frac{\text{ядер}}{с} \right), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – постоянная распада;

$\Phi$  – плотность потока;

$n$  – число ядер в детекторе;

$\eta = \zeta \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot q \cdot s$  – общий поправочный коэффициент;

$\sigma$  – сечение активации.

Процессы активации и счета бета-излучения сопровождаются совокупностью факторов, искажающих полученный результат, в связи с чем вводились поправочные коэффициенты, представленные ниже:

–  $\zeta = 2$  – поправка на одностороннее расположение счетчика относительно детектора;

–  $\omega = \frac{d_{\text{детектора}}^2}{d_{\text{счетчика}}^2}$  – поправка на не геометрические условия измерения;

–  $\varepsilon$  – поправка на эффективность регистрации излучения счетчиком;

–  $q = e^{3,6 \text{ см} / 5,5 \text{ см}}$  – поправка на ослабление плотности потока нейтронов в полиэтилене, где 5,5 см – длина релаксации быстрых нейтронов;

–  $s = 3$  – поправка на самопоглощение бета-излучения в индиевом и серебряном детекторах. Толщина этих материалов в 3 раза превышала длину максимального пробега электронов.

По результатам экспериментов с помощью выражения (2) рассчитывался поток быстрых нейтронов, а также поток нейтронов в угол  $4\pi$ . Который сравнивался с теоретическим из табл. 1.

Далее приведены расчетные формулы и схемы распада детекторов.

Активационный интеграл, называемый скоростью реакции. Не зависит от периода полураспада и характеризует число актов данного взаимодействия, происходящих в образце за одну секунду в расчете на одно ядро изотопа мишени:

$$R = \sigma \cdot \Phi = \frac{\eta \cdot A_{\text{нас}}}{n}, \quad (3)$$

где  $n$  – полное число ядер в детекторе.

Плотность потока нейтронов:

$$\Phi = \frac{\eta \cdot A_{\text{нас}}}{\sigma \cdot n} \left( \frac{n}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right). \quad (4)$$

Поток нейтронов в угол  $4\pi$  от точечного источника:

$$F = \Phi \cdot 4\pi r^2 \text{ (н/с)}, \text{ где } r = 13 \text{ см} \quad (5)$$

На рис. 1, 2, 3 приведены сечения активации для нейтронов с энергией 3 эВ согласно справочникам [4–5]. В скобках сечения активации тепловыми нейтронами.

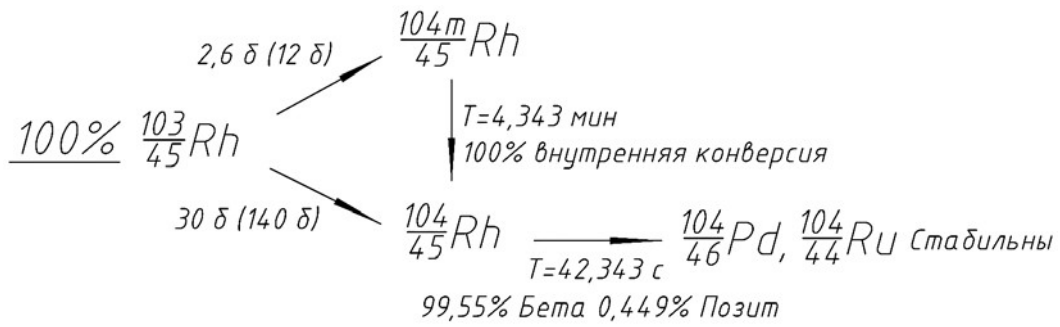


Рис. 1. Радиоактивные превращения ядра родия

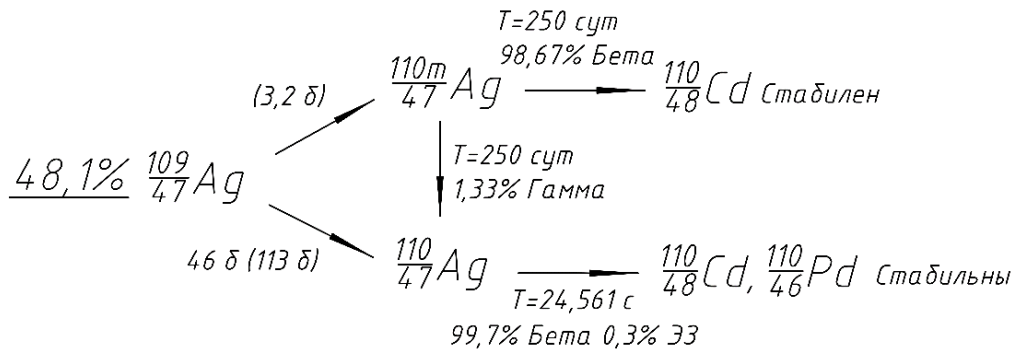
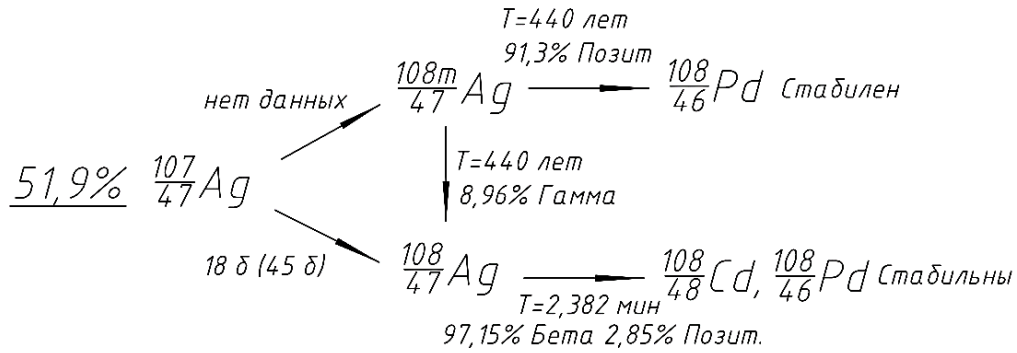


Рис. 2. Радиоактивные превращения изотопов серебра

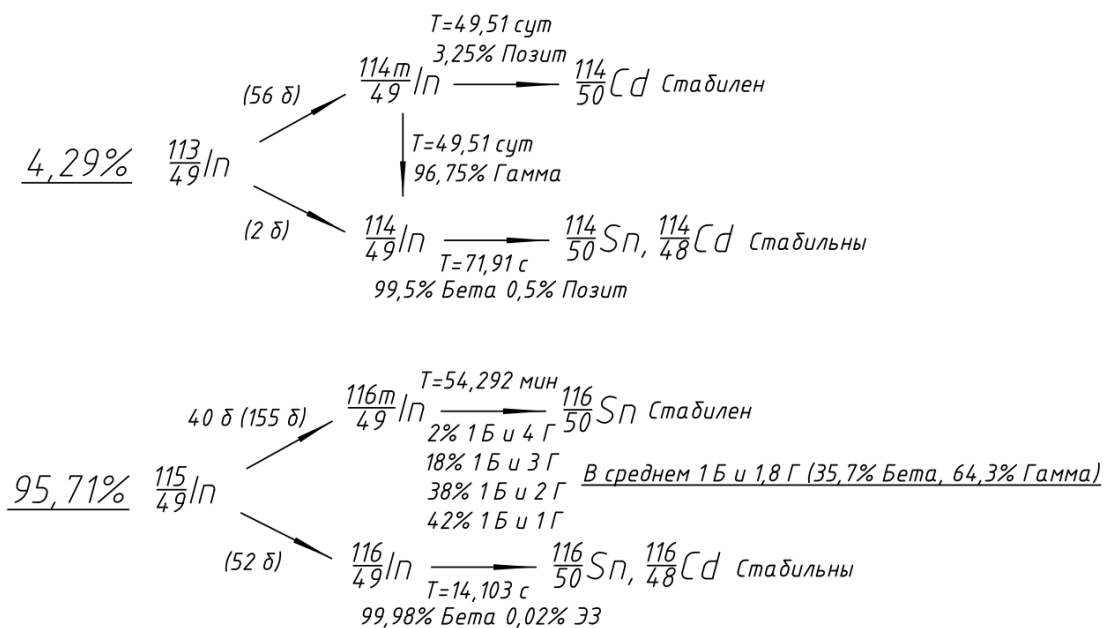


Рис. 3. Радиоактивные превращения изотопов индия

Процессы радиоактивного распада, представленные на рис. 1, 2, 3, довольно сложны так как в детекторах одновременно образуются различные изотопы в неодинаковом количестве в зависимости от периода полураспада и сечения активации. В расчетах по формулам (2), (3), (4) в качестве исходных данных для каждого детектора использовалось только одно направление активации:

- для родия направление с сечением 30 б (140 б);
- для серебра направление с сечением 46 б (113 б);
- для индия направление с сечением 40 б (150 б).

Активация каждого детектора была произведена три раза и усреднена (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчетов и сравнительная характеристика детекторов

Материал детектора	Период полураспада	Скорость активации (акт-й интеграл) $c^{-1} \cdot 10^{-20}$	Плотность потока нейтронов, $n / cm^2 \cdot c$	Поток быстрых нейтронов от источника в угол $4\pi$ , $n / c \cdot 10^6$
Родий	$43,2 \pm 1,7$ сек.	$2,98 \pm 0,05$	$838 \pm 15$	$1,78 \pm 0,05$
Серебро	$27 \pm 8$ сек.	$1,8 \pm 0,3$	$790 \pm 130$	$1,7 \pm 0,3$
Индий	$54 \pm 8$ мин.	$3,17 \pm 0,08$	$828 \pm 21$	$1,76 \pm 0,05$

Плотность потока нейтронов была измерена радиометром. Результат прибора составил  $780 n / cm^2 \cdot c$ , что с учетом погрешности расстояния в 1 см дает поток  $(1,7 - 1,9) \cdot 10^6$  в угол  $4\pi$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве радиоактивного детектора оптимально использовать родий, обладающий приемлемым активационным интегралом и периодом полураспада, удобным для проведения серии экспериментов. А также индий, за счет наибольшей скорости активации. Однако, его применение ограничивается длительностью времени эксперимента, обусловленному большим периодом полураспада.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Крамер-Агеев Е. А. Активационные методы спектрометрии нейтронов / Е. А. Крамер-Агеев, В. С. Трошин, Е. Г. Тихонов. – М.: Атомиздат, 1976. – 232 с.
2. Ломакин, С. С. Радиометрия нейтронов активационным методом / С. С. Ломакин, В. И. Петров, П. С. Самойлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 141 с.

3. Власичев, Г. Н. Физика ядерных реакторов: учеб. Пособие / Г. Н. Власичев; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2008. – 106 с.

4. Маслов И. А. Справочник по нейтронному активационному анализу / И. А. Маслов, В. А. Лукницкий; АН СССР, Отд-ние ядерной физики. – Л.: Наука. Ленингр.отд-ние, 1971. – 312 с.: граф. – Библиогр.: с. 301–307.

5. Гордеев, И. В. Ядерно-физические константы [Текст]: Справочник / И. В. Гордеев, Д. А. Кардашев, А. В. Малышев. – [2-е изд.]. – М.: Госатомиздат, 1963. – 507 с.

6. Вандекастеле К. Активационный анализ с использованием заряженных частиц: Пер.с англ. / К. Вандекастеле. – М.: Мир, 1991. – 208 с.: ил. – Библиогр.: с. 190–191.

УДК 621.313.822.3

АКТУАЛЬНОСТЬ ВОПРОСА ОБ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ  
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОННОГО  
ПОТОКА И ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ  
THE RELEVANCE OF THE ISSUE OF THE OPERATIONAL STABILITY  
OF PERMANENT MAGNETS UNDER THE INFLUENCE OF NEUTRON  
FLUX AND HIGH TEMPERATURE

Вознесенский М. В., Чернышев В. М., Седов А. Р., Касаткин Н. И.,  
Басов А. А., к-т. техн. наук, доцент; Семенов А. Н., ст. преподаватель,  
Нижегородский государственный технический университет  
им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия  
M. Voznesensky, V. Chernyshev, A. Sedov, N. Kasatkin, A. Basov, Candidate  
of Technical Sciences, Associate Professor; A. Semenenko, Senior Lecturer,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia

*Аннотация.* Рассмотрен вопрос радиационной и термической стойкости постоянных магнитов. Измерена магнитная индукция образца магнита из NdFeB до и после облучения в нейтронном поле вблизи Pu-Be источника. Потери остаточной магнитной индукции составили 4,2 % за 15 дней облучения. Также измерена магнитная индукция до и после нагрева магнита выше точки Кюри. Сделана оценка срока службы магнита. Описаны возможные причины потерь магнитной индукции.

*Abstract.* The issue of radiation and thermal resistance of permanent magnets is considered. The magnetic induction of a sample of NdFeB magnets before and after irradiation in a neutron field near a Pu-Be source was measured. The loss of residual magnetic induction amounted to 4.2 % over 15 days of irradiation. Magnetic induction was also measured before and after heating the magnet above the Curie point. The service life of the magnet is estimated. Possible causes of magnetic induction losses are described.

*Ключевые слова:* постоянный магнит, нейтронное поле, остаточная магнитная индукция, радиационная стойкость, термическая стойкость.

*Key words:* permanent magnet, neutron field, residual magnetic induction, radiation resistance, thermal resistance.

## ВВЕДЕНИЕ

Магниты – изделия, главной особенностью которых является наличие собственного магнитного поля. За счет своей силы притяжения и хороших эксплуатационных качеств нашли свое обширное применение в медицине, электроэнергетике, топливной промышленности и атомной энергетике.

Однако, любой материал обладает длительностью своего действия, определяющим «время жизни» установки, для которой он предназначен.

Магнитное поле постоянного магнита может потерять свою силу, что приведет к выходу из строя ответственного агрегата. Поэтому важно изучать условия, влияющие на срок службы магнитного материала. В данной работе к ним относятся флюенс быстрых нейтронов и высокая температура.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время наиболее надежным и перспективным электродвигателем, способным работать в атомной энергетике, является бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ). Он существенно лучше обычных двигателей постоянного тока за счет отсутствия электромеханического коллектора, создающего радиопомехи, снижающего надежность и т. д. Постоянный магнит является главным элементом такого рода двигателей, так как определяет основные параметры его работы.

Другой немаловажной системой, обеспечивающей контроль, управление и прекращение цепной реакции в ядерном реакторе является исполнительный механизм (ИМ) системы управления и защиты (СУЗ). В него входит совокупность оборудования, которая создает условия для перемещения стержня поглотителя в режимах как автоматического, так и дистанционного управления. Поскольку на средства управления и защиты возложены ответственные функции, обеспечивающие ядерную безопасность, то и важнейшим требованием, предъявляемым к ИМ, является высокая надежность, точность, строгое выполнение предписанных процессов регулирования и контроля каждым элементом системы. Одним из этих элементов являются постоянные магниты, применяемые в системах индикации с датчиками угловых и линейных перемещений. Свое место они также нашли в магнитных муфтах, используемых по соображениям безопасности [1, с. 63–69, 100–107].

В данное время наиболее популярны магниты на основе редкоземельных металлов – неодима и самария. После открытия в 70–80х годах и до сегодняшнего дня они активно применяются в различных отраслях промышленности. В том числе и в ядерной отрасли за счет высокой намагниченности.

Магниты из сплава самарий-кобальт ( $SmCo$ ) имеют наилучшую температурную стабильность, сопротивление к коррозии и устойчивость к окислению (нет необходимости в покрытии), а также высокие значения максимального энергетического произведения ( $240 \frac{кДж}{м^3}$ ) и коэрцитивной силы ( $1275 \frac{кА}{м}$ ) [2].

Магниты на основе неодима ( $NdFeB$ ) обладают большим сроком службы, хорошей механической прочностью, небольшой массой и низкой стоимостью, что позволяет применять их повсеместно. Они также имеют высокие значения магнитной индукции ( $1,42 Тл$ ), коэрцитивной силы ( $950 \frac{кА}{м}$ ) и максимального энергетического произведения ( $380 \frac{кДж}{м^3}$ ).



Воздействие нейтронного излучения является фактором, ведущим к изменению магнитных свойств рассматриваемых магнитов. Так как, в отличие от других типов излучений, нейтроны передают свою энергию исключительно посредством взаимодействия с ядрами атомов мишени. Взаимодействие частиц, не имеющих электрического заряда, с атомами решетки приближенно можно рассматривать как столкновение двух шаров, после которого атом решетки приобретает энергию [2, с. 35–36]:

$$E' \approx 2A^{-1}E_n, \quad (1)$$

где  $A$  – массовое число атома ( $A > 20$ ).

Если полученная от нейтрона энергия  $E'$  превысит пороговую энергию смещения атома  $E_d$ , то происходит перемещение атома из узла кристаллической решетки в междоузлие. Образуется дефект.

Длительное воздействие нейтронного потока приводит к разрушению кристаллической структуры магнитного материала. Постепенно в веществе накапливаются простые изолированные дефекты – вакансии и междоузельные атомы, а также сложные комплексы – «простой дефект + химическая примесь». Вследствие этого упорядоченная доменная структура магнита перестраивается, и величина создаваемого магнитного потока падает.

Процесс активации железа посредством ядерных реакций  $Fe-54(n, p)$  с последующим образованием  $Mn-54$  также вносит свой вклад в уменьшение остаточной магнитной индукции. Пороговая энергия нейтронов для такого превращения составляет  $2 \text{ МэВ}$ .

Был проведен эксперимент, в ходе которого образец магнита из неодима с размерами  $20 \times 3$  мм был помещен в нейтронное поле  $Pu-Be$  источника быстрых нейтронов. Радиационные параметры источника представлены в табл. 1.

Таблица 1

Радиационные параметры и размеры источника

Тип источника	Наружный размер, мм		Размер активной части, мм, не более		Поток быстрых нейтронов от источника в угол $4\pi_{\text{ср}}$ , нейтр./с.	Активность, Бк, не более
	диаметр	высота	диаметр	высота		
ИБН-8	$24,0 \pm 0,3$	$36,0_{-1,0}$	16,0		$(2,0 \pm 0,4) \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^{10}$

Средняя энергия быстрых нейтронов  $Pu-Be$  источника  $E_0 = 4,55 \text{ МэВ}$ .

Образец располагался в непосредственной близости к источнику плотно прилегая к его активной части. В таком случае, условно принимая источник точечным, можно оценить плотность потока нейтронов на поверхности магнита.

$$n = \frac{S}{4\pi \cdot r^2} = \frac{2 \cdot 10^6 \text{ н/с}}{4\pi(0,8\text{см})^2} = 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}, \quad (2)$$

где  $S$  – интенсивность источника;

$r = 16 \text{ мм} / 2$  – расстояние до магнита.

Процесс облучения длился ровно 15 дней. Флюенс нейтронов, которому подвергся магнит, по итогу составлял:

$$\Phi = n \cdot t = 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{нейтр}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \cdot (15 \cdot 24 \cdot 3600) \text{с} = 3,2 \cdot 10^{11} \frac{\text{н}}{\text{см}^2}. \quad (3)$$

Была определена остаточная магнитная индукция до и после эксперимента с помощью миллитесламетра ТПМ-250. В качестве характерной точки измерений был выбран центр магнита. Замеры в каждом случае были проведены 10 раз и усреднены. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2

Величина магнитной индукции в центре магнита до и после облучения

Время проведения эксперимента $t$ (дни)	Время проведения эксперимента $\Phi$ (дни)	$B(t), \text{мТл}$
0	0	82,82
15	15	79,33

Таким образом, за 15 дней облучения магнита в потоке быстрых нейтронов со средней энергией 4,55 МэВ неодимовый магнит потерял 4,2 % от начальной остаточной магнитной индукции.

Магниты состоят из миллионов молекул, объединенных в группы, которые называются доменами. Внутри них намагниченность имеет равномерное направление. При одинаковом установлении доменов их сила объединяется. В процессе размагничивания домены перестраиваются, переставая участвовать в создании общего магнитного поля. Если представлять домены как отдельные системы, то с помощью теоремы Бернулли можно сделать предположение, что скорость размагничивания пропорциональна количеству доменов, еще не подвергнувшихся переориентации. Если учитывать, что число однонаправленных доменов  $N(t)$  пропорционально величине остаточной магнитной индукции  $B(t)$ , то можно вывести закон уменьшения магнитной индукции со временем.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \rightarrow (N(t) \sim B(t)) \rightarrow \frac{dB(t)}{dt} = -\lambda B(t). \quad (4)$$

Он означает, что величина приращения поля  $-dB(t)$ , произошедшая за короткий интервал времени  $dt$ , пропорциональна величине этого поля в

момент времени  $t$ . Константа  $\lambda$  – постоянная размагничивания, характеризующая вероятность изменения ориентации домена за единицу времени.

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$B(t) = -B_0 e^{-\lambda t}. \quad (5)$$

В результате, величина остаточной магнитной индукции магнита уменьшается по экспоненциальному закону.

На основании аппроксимации результатов эксперимента (табл. 2) выражение (5) принимает вид:

В зависимости от прошедшего времени, сек.:

$$B(t) = -82,82 \cdot e^{-0,00287021t}. \quad (6)$$

В зависимости от полученного флюенса быстрых нейтронов,  $\frac{H}{\text{см}^2}$ :

$$B(\Phi) = -82,82 \cdot e^{-1,3359 \cdot 10^{-13} \cdot \Phi}, \quad (7)$$

где  $B_0 = 82,82$  мТл – величина изначальной остаточной магнитной индукции.

Постоянные размагничивания:

$$\lambda_1 = 0,00287021, \text{ с}^{-1}, \quad (8)$$

$$\lambda_2 = 1,3359 \cdot 10^{-13}, \text{ см}^2/\text{н}. \quad (9)$$

Далее на рис. 1 представлена аналитическая зависимость (7).

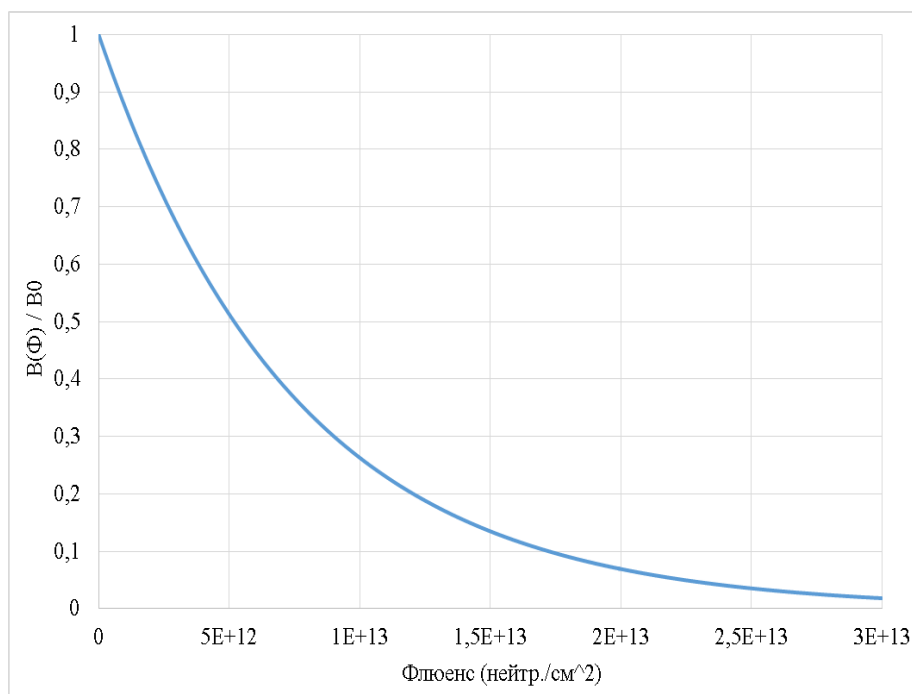


Рис. 1. Зависимость величины остаточной магнитной индукции магнита от времени

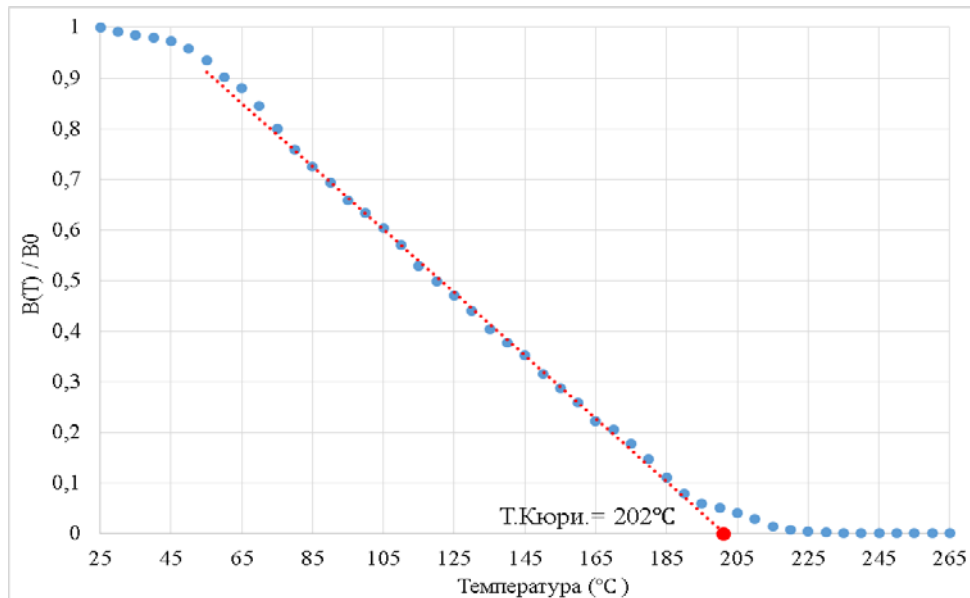


Рис. 2. Зависимость величины остаточной магнитной индукции магнита от температуры

Период полуразмагничивания образца неодимового магнита составляет:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda_1} = 241,5 \text{ дней}. \quad (10)$$

При флюенсе быстрых нейтронов:

$$\Phi_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda_2} = 5,2 \cdot 10^{12} \frac{\text{н}}{\text{см}^2}. \quad (11)$$

В качестве оценки, при проектировании ядерных установок, такой флюенс можно считать существенным, опасно влияющим на работоспособность магнита.

При эксплуатации необходимо также учитывать нагрев магнита, поскольку материал теряет свои ферромагнитные свойства при достижении температуры близкой к точки Кюри. Максимальная рабочая температура для неодимовых ( $NdFeB$ ) магнитов достигает  $150^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$ . При этом у самарий-кобальтовых ( $SmCo$ ) работоспособность сохраняется вплоть до  $300^\circ\text{C}$  [3, с. 9].

На рис. 2 приведена зависимость величины магнитной индукции магнита от температуры. При нагреве начинается размагничивание материала и чем больше температура, тем сильнее наблюдаемый эффект. Получая дополнительную энергию домены из атомов хаотически разворачиваются, переставая участвовать в создании общего магнитного поля.

Между  $70^\circ\text{C}$  и  $180^\circ\text{C}$  температуры магнита наблюдается линейный участок изменения магнитной индукции, описываемый уравнением (12).

$$B(T) = -0,00622 \cdot T + 1,2535 (^\circ\text{C}). \quad (12)$$

Точка Кюри для неодимового магнита согласно (12) равна  $202\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что с достаточной точностью согласуется со справочной информацией.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нейтронное и тепловое воздействие на магниты способно ускорить размагничивание материала и тем самым существенно снизить срок службы ответственных систем и механизмов ядерных установок. Это приводит к повышению фактора риска для аварийных ситуаций, а также величины амортизационных отчислений для замены оборудования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов, И. Я. Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов / И. Я. Емельянов, В. В. Воскобойников, Б. А. Масленок. Под ред. чл.-кор. АН СССР И. Я. Емельянова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 232 с.: ил.
2. Власичев, Г. Н. Физика ядерных реакторов: учеб. Пособие / Г. Н. Власичев; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р. Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2008. – 106 с.
3. Liu, J. Thermal stability and radiation resistance of SM-CO based permanent magnets / J. Liu, P. Vora, P. Dent et al. // Proceed. Space Nuclear Conf. – Boston, 2007.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО  
ВЕЛИЧИНЕ МЕЖВИТКОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
EVALUATION OF THE STATE OF WINDINGS OF ELECTRIC  
MACHINES BY THE VALUE OF INTERTURN RESISTANCE

Исаев А. В.; Суходолов Ю. В., к-т. техн. наук, доцент; Гулич А. Ю.,  
Любинский К. А.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
A. Isaev; Yu. Sukhodolov, Candidate of Technical Sciences, Associate Profes-  
sor; A. Gulich, K. Lyubinsky,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* В работе представлена система, которая на основе анализа уровня сдвига фаз сигналов, получаемых с двух плечей, реализованных из обмоток диагностируемой электрической машины, позволяет определять уровень сопротивления межвитковой изоляции в наиболее дефектном месте, и на основе полученных данных делать выводы как о текущей работоспособности диагностируемой электрической машины, так и закладывать прогноз о периоде планово-предупредительных работ.

*Abstract.* The paper presents a system that, based on the analysis of the level of phase shift of the signals received from two arms, implemented from the windings of the diagnosed electrical machine, allows you to determine the level of resistance of the interturn insulation in the most defective place, and based on the data obtained, draw conclusions about the current performance of the diagnosed electrical machines, and lay a forecast for the period of preventive maintenance.

*Ключевые слова:* неисправность электродвигателя, межвитковое сопротивление, диагностика обмоток электрических машин.

*Key words:* electric motor malfunction, turn-to-turn resistance, diagnostics of electrical machine windings.

## ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие электроники в области приборо- и станкостроения привело к необходимости разработки качественной и своевременной диагностики состояния электрических машин. При этом наиболее существенная проблема состоит в диагностике состояния обмоток статора, на неисправность которых может выпасть до 80 % от всех причин, определяющих их работоспособность [1; 2; 3]. Однако существующие методы диагностики электрических машин чаще всего только констатируют факт выхода ее из строя и не позволяют хотя бы в минимальных пределах определять дальнейшую жизнеспособность и остаточный ресурс диагностируемого оборудования [4]. Кроме этого, применение сложного диагностиче-

ского оборудования и алгоритмов исследования состояния сильно ограничивают сферу их использования так как требует высокой квалификации обслуживающего персонала и больших временных затрат на организацию диагностических процедур. Следовательно, такие методы контроля состояния электрических машин малопригодны в современных реалиях на производственных объектах и тем более совсем не подходят для контроля их состояния в режиме реального времени, в том числе непосредственно в рабочем режиме технологического процесса. Математические модели, построенные на основе статистических данных по выходу из строя электрических машин [5], также не дают никакой гарантии о своевременном обнаружении развивающихся дефектов. Поэтому, в настоящее время максимально актуальной является разработка метода и построение измерительной системы, позволяющих в режиме реального времени отслеживать состояние диагностируемой электрической машины с оценкой не только текущего состояния, но и с возможностью фиксирования начала дефектообразования, что в свою очередь позволит прогнозировать ее дальнейшую работоспособность. Одним из таких способов может являться контроль и измерение межвитковой изоляции в обмотках диагностируемой электрической машины.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время существует достаточное количество методов, оценивающих состояние обмоток электрических машин по анализу параметров добротности контуров, формируемых их обмотками. Однако в большинстве случаев эти способы обладают малой чувствительностью и высокой погрешностью определения состояния, не достаточной для того, чтобы однозначно характеризовать состояние обмоток. И тем более методы не позволяют хоть в какой-то мере измерить уровень межвитковых сопротивлений. Одной, и самой важной причиной, является малая стабильность диагностического сигнала, который, с одной стороны, должен обладать высокой стабильностью по частоте и амплитуде, а с другой – высокими показателями по мощности. А добиться согласования этих условий почти невозможно, тем более на производственном оборудовании.

В результате было разработано устройство для измерения межвитковых сопротивлений в обмотках трехфазных асинхронных электрических двигателях со вьспной обмоткой, структурная схема которого представлена на рис. 1.

Особенностью системы является то, что генератор тестового напряжения в качестве диагностического сигнала использует периодическую импульсную последовательность, которая последовательно формирует импульсы положительной полярности с устанавливаемыми параметрами длительности импульсов  $t_i$  и временами задержки между ними  $t_{z1}$ ,  $t_{z2}$ ,  $t_{z3}$  и т. д., (рис. 2) и тем самым в спектре выделяется одна информативная спектральная составляющая, которая находится в резонансной области контуров

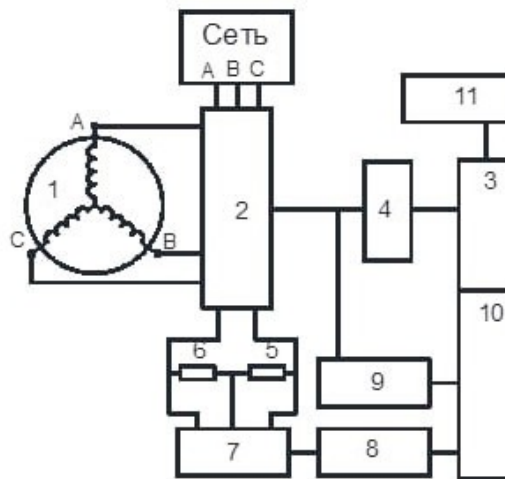


Рис. 1. Структурная схема устройства измерения межвитковых сопротивлений в обмотках трехфазных электрических двигателей

контролируемых обмоток, что позволяет увеличить чувствительность контроля и уменьшить погрешности исследования.

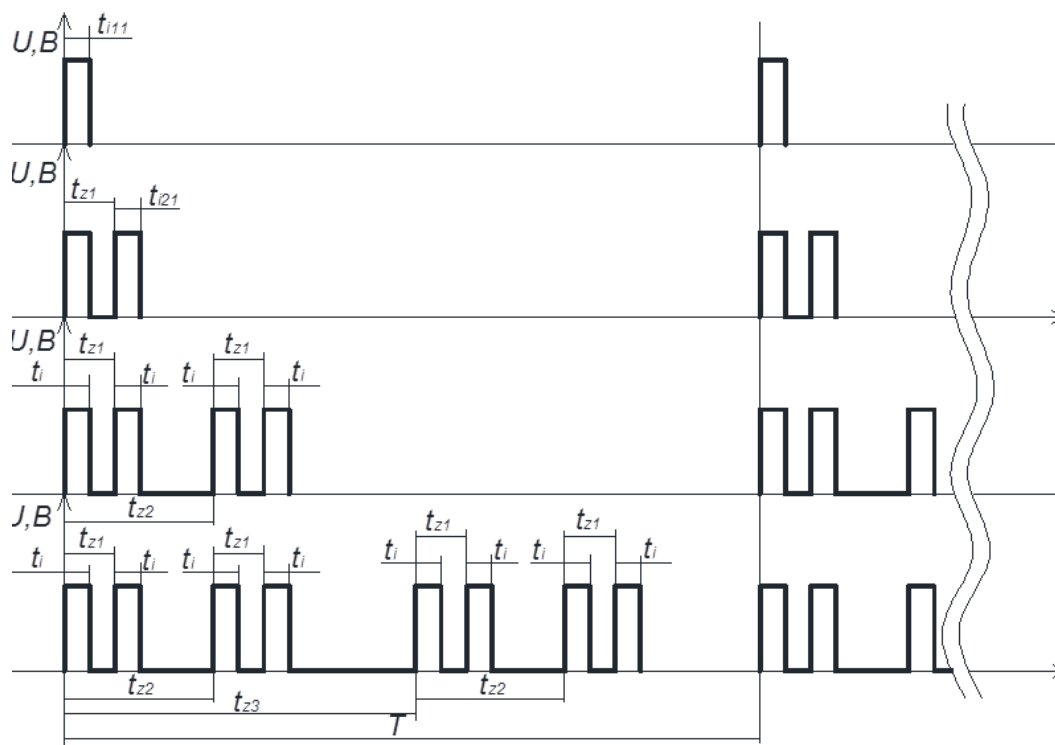


Рис. 2. Построение импульсной последовательности для выделения информативной спектральной составляющей

В соответствии с принципом формирования диагностического сигнала устройство работает следующим образом. С помощью коммутаторов 2 к одной из обмоток ЭМ 1 подключается узел формирования тестируемого сигнала 3, который представляет собой микроконтроллерное устройство преобразованное в блоке усиления 4. Оставшиеся выходы обмоток электрических машин коммутируются к измерительным резисторам 5 и 6, ко-



торые в свою очередь коммутированы на смеситель сигналов 7. Результат на выходе попадает на вход отборочного устройства суммы полученных сигналов 8, выход в свою очередь коммутирован к измерительному входу микроконтроллера 10. На второй вход измерительной системы коммутирован выход отборочного устройства тестового сигнала 9, вход коммутируется к выходу узлу формирования начального тестового сигнала. Состояние работы устройства и результат проведенной диагностики отображена на блоке индикации 11.

В качестве наглядного примера проведем исследование трехфазного АД КР71.1/4 на предмет наличия межвитковых замыканий. Асинхронный двигатель со высыпными обмотками КР71.1/4 развивает мощность 380 Вт и питается от сети 380 В, уровень резонанса в обмотке ~ 45 кГц. Для исследования дефекта в обмотках ЭМ организуем импульсную последовательность с заданными временными параметрами, где, выделим 13-ю спектральную составляющую, при этом подавив соседние (по две спектральные составляющие выше и ниже). Данная последовательность создана с помощью генератора испытательного напряжения, а также усилителя. Эти устройства реализованы с помощью программируемого микроконтроллера серии STM32F1 и N-канального на МОSEF- транзистора IRF740 соответственно.

Через измерительные резисторы снимаются выходные результирующие сигналы, полученные с выводов обмотки тестируемого электродвигателя В и С, после подачи на вывод А импульсного сформированного сигнала. После этого, выходные сигналы, получение с обоих выводов, складываются в единый результирующий сигнал, являющийся, набором спектральных составляющих с уникальными характеристиками. Сложение сигналов осуществляется в сумматоре, построенном на базе ОРА2237 – интегрального двухвентильного операционного усилителя. Далее из полученного результирующего сигнала, используя избирательное устройство, настроенное на информативную составляющую спектра, выделяется составляющая, (сигнал частотой 44,55 кГц). Избирательное устройство создано на основе прецизионного операционного усилителя AD8551ARZ. Полученный сигнал подается на измерительный вход микроконтроллера, параллельно с базовым сигналом, подаваемым на другой измерительный вход устройства. Сравнивая смещение фаз этих двух сигналов, определяется дефектная обмотка и уровень ее межвиткового сопротивления, информация о чем, выводится на индикатор.

Видно, (рис. 3, точка А) что смещение фаз при схеме подключения как на рис. 1 равняется  $27^\circ$ , а уровень сопротивление в дефектной обмотке составит 105 Ом.

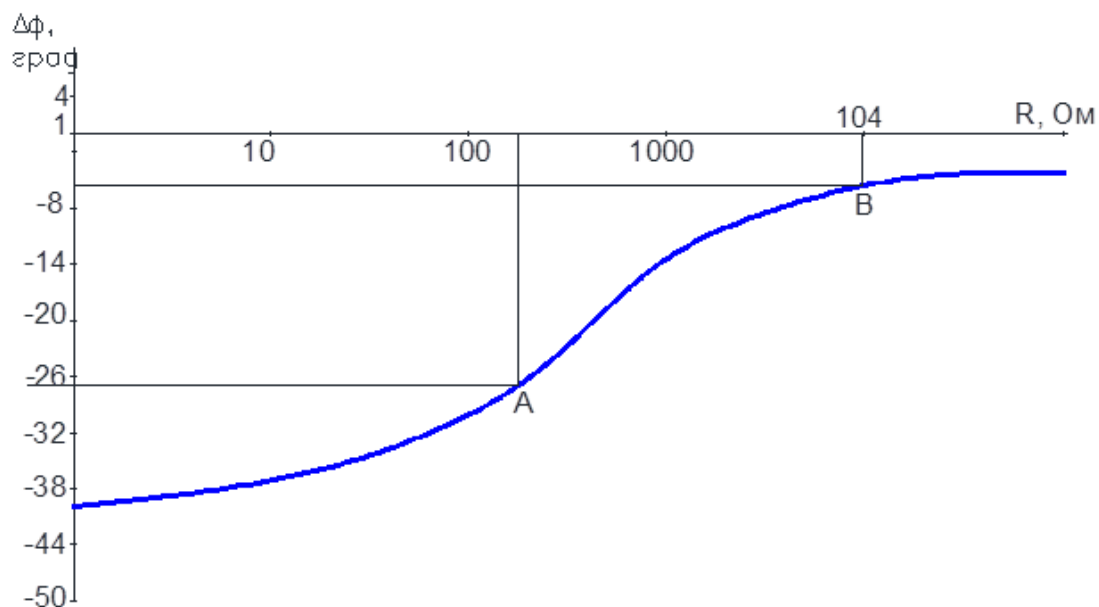


Рис. 3. Зависимость величины межвиткового сопротивления в обмотках асинхронного электродвигателя от значения разности фаз

Для более качественной диагностики, с помощью блока переключения 2 поменяем местами контакты В и А. По результатам проведенных измерений, получим следующие значения  $\Delta\phi = 7^\circ$  и  $R \approx 10$  кОм (рис. 3, точка В). Исходя из двух расчетов, можно сделать вывод, что в обмотке В наблюдается дефект, который мы определили заблаговременно, следовательно испытательный двигатель неисправен и ему требуется ремонт.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное измерительное устройство путем формирования специального диагностического сигнала, позволившего на качественном уровне измерять межвитковые сопротивления в обмотках диагностируемых электрических машин, что позволяет заблаговременно определять не только наличие дефектов в них, но и фиксировать начало дефектообразования. В работе описан принцип, по которому по значениям фаз сигналов и их соотношениям, прибор определяет значения межвиткового сопротивления что позволяет делать вывод о пригодности к работе исследуемой электрической машины.

Данное устройство является очень важным компонентом в построении современных автоматизированных систем диагностики электрических машин.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В. Н., Анализ надежности тяговых электрических машин электровозов, эксплуатируемых на железных дорогах восточного региона, статьи технической тематики из периодических изданий / Региональный Центр Инновационных Технологий [Электронный ресурс]. <https://rcit.su/article080.html>

2. Prof. Fiorenzo Filippetti, Diagnosis and Fault Detection in Electrical Machines and Drives based on Advanced Signal Processing Techniques, Ph.D thesis of: Yasser Gritli, Department of Electrical, Electronic, and Information Engineering «Guglielmo Marconi» Ph.D. in Electrical Engineering XXVI Cycle Power Electronics, Electrical Machines and Drives (ING-IND/32), 2014. – 131 p.

3. Analysis of the causes of traction electric failures of electric cargo cars operated on railways of the Republic of Uzbekistan, Sardor Nuriddinov, Bobomurod Avazov, Fozil Hasanov, and Yulduz Rakhmonova, E3S Web of Conferences, DOI: Путь доступа: [10.1051/e3sconf/202126405041].– Дата доступа: 01.01.2021.

4. Волчихин В. И., Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин. – Воронеж: Кварта, 2004. – 312 с.

5. Гутов И. А., Математические модели для прогнозирования технического состояния изоляции электрооборудования, Ползуновский вестник. – № 4, 2009.

УДК 621.314

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ  
СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ДГУ  
IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRICITY IN AUTONOMOUS  
POWER SUPPLY SYSTEMS WITH RESERVATION FROM  
DIESEL GENERATOR PLANTS

Третьяков Е. А., д-р техн. наук, профессор; Мещеряков А. В., аспирант,  
Политехническая школа ФГБОУ ВО «Югорский государственный универ-  
ситет», Ханты-Мансийск, Россия

E.Tretyakov, Doctor of Technical Sciences, Professor; A. Meshcheryakov,  
Polytechnic School, Yugra University, Khanty-Mansiysk, Russia

*Аннотация.* В статье рассматривается проблема повышения качества электрической энергии в автономных системах электроснабжения при использовании резервного питания от дизель-генераторных установок (ДГУ). Проведен анализ существующих проблем и рассмотрены способы по улучшению качества электрической энергии, такие как настройка регуляторов напряжения и частоты, применение современных систем защиты и автоматики, установка фильтров и устройств сглаживания. В итоге, авторы приходят к выводу о возможности и важности выбора способа повышения качества электрической энергии в автономных системах электроснабжения с ДГУ для обеспечения надежного и высококачественного резервного питания в данных системах.

*Annotation.* The article deals with the problem of improving the quality of electrical energy in autonomous power supply systems when using backup power from diesel generator sets (DGS). The analysis of existing problems is carried out and methods for improving the quality of electrical energy are considered, such as setting up voltage and frequency regulators, using modern protection and automation systems, installing filters and smoothing devices. As a result, the authors conclude about the possibility and importance of choosing a way to improve the quality of electrical energy in autonomous power supply systems with DSU to ensure reliable and high-quality backup power in these systems.

*Ключевые слова:* электрическая энергия, автономные системы, электроснабжение, резервное питание, качество электрической энергии, дизель-генератор.

*Key words:* electric energy, autonomous systems, power supply, backup power, quality of electric energy, diesel generator.

## ВВЕДЕНИЕ

Автономные системы электроснабжения играют важную роль в обеспечении постоянной доступности электроэнергии в удаленных и труднодоступ-

ных местах, а также в бесперебойной работе объектов, чувствительных к прерыванию питания. В случае отключения централизованного электроснабжения, основным источником энергии в таких системах становятся дизель-генераторные установки (ДГУ), выполняющие функцию резервного питания. Однако, существует проблема качества электрической энергии, поставляемой от ДГУ, которая может быть недостаточной для обеспечения нормальной работы электрооборудования. В этой связи рассматривается вопрос повышения качества электрической энергии в автономных системах электроснабжения при использовании резервного питания от ДГУ. На основе анализа существующих решений и практического опыта, в статье будут рассмотрены способы по улучшению качества электрической энергии для обеспечения эффективного и надежного резервного питания.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для обеспечения электрической энергией отдаленных районов с недостаточной инфраструктурой, где нет централизованного электроснабжения используются автономные системы электроснабжения. Это системы, которые позволяют получать электроэнергию независимо от основных источников питания [1].

Основные компоненты автономных систем электроснабжения включают в себя источники энергии (например, солнечные панели, ветрогенераторы, генераторы на био-топливе), системы хранения энергии (батареи, аккумуляторы), системы управления и регулировки (включая системы мониторинга и управления нагрузками), а также энергетические системы безопасности. Одним из элементов данной системы в большинстве случаев является дизель-генераторная установка (ДГУ) [2].

ДГУ – это энергетическая установка, состоящая из дизельного двигателя и генератора, которая преобразует химическую энергию топлива в электрическую энергию. ДГУ широко используется в местах, где отсутствует централизованное электроснабжение и в качестве аварийного и резервного источника электроэнергии в городах, и на объектах промышленности. Она также может использоваться во время чрезвычайных ситуаций, обеспечивая непрерывность работы важных объектов, таких как больницы, водонапорные башни и телекоммуникационные центры. ДГУ представляет собой надежное, безопасное и эффективное средство для обеспечения энергетической независимости в различных условиях.

Не смотря на ряд преимуществ использование данных установок поднимает вопрос о качестве электрической энергии [3].

Одной из основных проблем качества электроэнергии в системах электроснабжения при использовании резервного питания от ДГУ является высокий уровень искажений напряжения и тока. Это связано с тем, что генераторы ДГУ производят несинусоидальное напряжение, которое дополнительно искажается при передаче через трансформаторы и электрические сети [4].

Другой проблемой является нестабильность напряжения. Напряжение, выдаваемое генератором ДГУ, может колебаться в зависимости от изменений нагрузки, что в свою очередь может привести к неполадкам и повреждениям подключенного оборудования [5].

Также возможны проблемы с переключением между источниками питания. Если переключение происходит неправильно или слишком долго, то это может привести к потере производительности оборудования и даже к его поломке.

Рассмотрим методы повышения качества электрической энергии в автономных системах электроснабжения при резервном питании от ДГУ.

#### 1. Использование автоматических систем переключения (АСП).

Данные системы позволяют быстро и автоматически переключаться на работу от резервного источника питания в случае обрыва основного источника. Это позволяет избежать нестабильности напряжения и снижения качества электроэнергии в момент переключения, а наличие возможности удаленного управления позволяет сократить время на поиск и устранение проблем в системе электроснабжения.

АСП состоит из контроллера и переключающих устройств. Контроллер обеспечивает автоматическое управление системой переключения и сигнализирует об уровне заряда аккумуляторной батареи (если система использует аккумуляторы).

Переключающие устройства могут быть механическими или электронными. Механические устройства имеют меньшую стоимость, но они менее надежны и предполагают задержку в переключении. Электронные устройства работают быстрее и точнее, но стоят значительно дороже.

#### 2. Использование ИБП (источника бесперебойного питания).

Он предназначен для обеспечения непрерывного питания в случае сбоя в основном источнике. Благодаря батареям, встроенным в устройство, ИБП способен компенсировать нестабильность напряжения и сохранить качество питания на нужном уровне.

Существуют различные типы ИБП, отличающиеся по конструкции, номинальной мощности, стоимости и другим параметрам. Однако, необходимо учитывать, что использование ИБП может иметь дополнительные затраты на энергоэффективность и обслуживание, в том числе обслуживание аккумуляторных батарей. Также важно выбрать и настроить ИБП в соответствии с требованиями нагрузки и условиями эксплуатации [6].

#### 3. Использование фильтров и стабилизаторов напряжения.

Фильтры напряжения используются для удаления помех и шума в линии питания. Они работают путем блокирования высокочастотных помех и фильтрации низкочастотных перекосов и гармоник, которые могут повлиять на работу электронных устройств. Фильтры напряжения обычно имеют устройства для защиты от перегрузок и коротких замыканий.

Стабилизаторы напряжения используются для обеспечения стабильного уровня напряжения на выходе. Они автоматически регулируют

напряжение в соответствии с изменениями входного напряжения, обеспечивая устойчивую работу электронных устройств. Стабилизаторы могут быть как электромеханическими, так и электронными, и могут использоваться как для индивидуальных устройств, так и для целых сетей [7].

Если в системе питания присутствует значительное количество шумов и помех, большую роль играют фильтры, в то время как стабилизаторы полезны для нормализации уровня напряжения.

Несмотря на то, что фильтры и стабилизаторы предназначены для решения различных задач, в некоторых случаях они могут использоваться вместе для оптимального повышения качества питания электронных устройств.

#### 4. Разделение энергосистем.

Разделение систем питания на независимые цепи осуществляется путем использования автоматических переключателей, которые могут переключаться между различными источниками питания. Например, если основным источником электропитания является сетевое подключение, а резервным источником – ДГУ, то автоматический переключатель может переключать цепи с сети на ДГУ в случае отключения основного источника.

Каждая цепь может содержать свой собственный набор оборудования и устройств, которые не связаны напрямую с другими цепями. Это предотвращает возможное снижение качества электрической энергии во время перехода с одного источника питания на другой, так как разные цепи не будут конкурировать за один и тот же ресурс.

Для оборудования, которое должно работать непосредственно от ДГУ, таких как освещение, системы безопасности, серверные комнаты и т. д., используются отдельные цепи питания, которые подключены к отдельным выходам ДГУ. Это обеспечивает стабильность и надежность питания для оборудования в течение периодов прерывания основного питания.

#### 5. Анализ и поддержание состояния оборудования.

Поддержание в хорошем состоянии всех компонентов системы электроснабжения, включая ДГУ, позволит исключить вероятность сбоев и отказов, а также обеспечить стабильное питание системы.

#### 6. Внедрение умных систем мониторинга электроснабжения.

Данные системы предоставляют детальную информацию о качестве электрической энергии, что помогает операторам системы электроснабжения лучше контролировать и отслеживать процессы производства электроэнергии [8]. Такие системы могут определять шумы и помехи в электрической сети, поэтому они могут предотвратить некоторые проблемы, которые могут произойти при резервном питании от ДГУ.

Другим преимуществом системы мониторинга является возможность автоматического управления, которая позволяет системе быстро и эффективно реагировать на изменения в нагрузке. Это обеспечивает более быстрый и плавный переход от основного источника питания к резервному генератору, минимизируя простои в работе системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, существует несколько способов повышения качества электрической в автономных системах электроснабжения, выбор которого зависит от следующих факторов:

– требования к качеству электрической энергии: различные устройства и оборудование могут иметь разные требования к качеству электрической энергии, такие как диапазон напряжений, степень чистоты и т. д. Изучение этих требований может помочь выбрать наиболее подходящий способ повышения качества электрической энергии;

– размер и структура системы электроснабжения: размер системы электроснабжения, тип и количество генераторов и других компонентов могут также повлиять на выбор способа повышения качества электрической энергии;

– финансовая целесообразность: различные способы повышения качества электрической энергии могут иметь различную стоимость в зависимости от используемого оборудования и технологии. При выборе способа улучшения качества электрической энергии необходимо учитывать данные особенности;

– степень автоматизации: автоматизированные системы управления позволяют повысить качество электрической энергии и повысить надежность системы электроснабжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеева Ю. А., Марьина Т. А. Автономные системы электроснабжения для объектов далекой северной зоны России // *Электричество*. – 2019. – № 6. – С. 35–39.

2. Гершман В. М., Рябушин А. А., Холодов А. В. Применение ДГУ в автономной энергетике // *Электротехника*. – 2006. – № 3. – С. 84–88.

3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ. – 2014. – 20 с.

4. Ошаров А. Г., Романов К. В., Сорокин Д. С. Искажения напряжения в системах резервного электроснабжения на базе дизель-генераторных установок // *Электрика*. – 2017. – № 3. – С. 23–27.

5. Бурлин С. А., Гребенщиков А. Б., Красносельский А. А. Анализ колебаний напряжения в режиме резервного энергоснабжения на базе ДГУ // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. – 2014. – № 6. – С. 45–51.

6. Коттули К. Сравнение статических и динамических ИБП // Информационные статьи *Schneider Electric*. – 2011. – № 92.

7. Олешко А. С. К вопросу стабилизации напряжения и частоты бесконтактных автономных генераторов / А. С. Олешко, О. В. Григораш, О. В.



Новокрещенов, А. А. Хамула, Д. А. Столбчатый // Труды КубГАУ. – № 2. – 2008. – С. 227–232.

8. Лапина, Н. А. Проблема мониторинга качества электроэнергии / Н. А. Лапина, М. Е. Королев // Проблемы современной науки и образования. – 2017. – № 1 (83). – С. 44–46.

УДК 621.311

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ УПРАВЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРОЙ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ  
METHODOLOGICAL APPROACHES TO MANAGING THE  
ARCHITECTURE OF ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS

Калентионок Е. В., к-т. техн. наук, доцент,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
E. Kalentionok, Candidate of technical Sciences, Associate Professor,  
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* На основе анализа методов управления архитектурой распределительных электрических сетей выявлены их недостатки и определены пути их совершенствования.

*Abstract.* Based on the analysis of methods for managing the architecture of distribution electrical networks shortcomings are identified and ways to improve them are determined.

*Ключевые слова:* электрическая сеть, управление архитектурой.  
*Key words:* electrical networks, architecture management.

## ВВЕДЕНИЕ

Распределительные электрические сети номинальными напряжениями 6–35 кВ являются основными поставщиками электрической энергии от питающих центров до конечных потребителей. Суммарная протяженность линий электропередачи как кабельных, так и воздушных на территории Республики Беларусь составляет более 100 тыс. Поэтому задача оптимального управления архитектурой (конфигурацией) распределительных сетей 6–35 кВ является актуальной.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В городских и сельских электрических сетях напряжением 6–35 кВ проблема оптимизации управления их архитектурой в настоящее время обусловлена большой размерностью сети, низкой наблюдаемостью параметров режима (напряжения, перетоков мощности и токовых нагрузок), а также недостаточностью технических средств оперативного управления: РПН трансформаторов на питающих подстанциях, коммутационных аппаратов с дистанционным управлением (выключателей нагрузки, реклоузеров, интеллектуальных разъединителей и т. д.), а также устройств поперечной компенсации реактивной нагрузки потребителей, вольтодобавочных трансформаторов, устройств продольной компенсации параметров линии, средств распределенной генерации и накопителей электрической энергии.

Поэтому на первых порах развития энергетики задача управления архитектурой заключалась в выборе рациональных мест размыкания замкнутых электрических сетей [1]. Это связано с тем, что распределительные сети работают в разомкнутом режиме. Поэтому при проектировании и эксплуатации возникает задача выбора оптимальной схемы сети с учетом минимизации стоимости потерь в ней [1]:

$$C = \beta t_k \Delta P_k \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\beta$  – стоимость 1 кВт·час потерь электроэнергии;

$t_k$  – продолжительность потерь мощности  $\Delta P_k$  на каждой ступени графика нагрузки.

При этом ущербами в системе электроснабжения от изменения надежности сети и затратами, связанными с изменением сложности эксплуатации сети при различном положении мест размыкания, пренебрегали. Это объяснялось тем, что различные положения мест размыкания не изменяют степень надежности электроснабжения и условия эксплуатации сети. При этом не учитывались ущербы в системе электроснабжения из-за неоптимальных уровней напряжения в сети, т. к. имелось в виду, что при принятом определении размыкания сети режимы напряжений в сети улучшаются в сравнении со схемами при произвольных точках размыкания [2]. Недостатками такого метода является не учет сложности эксплуатации сети, изменения надежности электроснабжения потребителей и изменения токовой нагрузки и напряжений при определении мест размыкания замкнутой электрической сети.

Дальнейшим развитием создания оптимальной структуры является минимизация минимума приведенных затрат на обслуживание распределительной сети и функционирования потребителей [3; 4]:

$$Z = \Delta W_\beta + Y_w + Y_u + Y_n + F_{ш} + F_c, \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $\Delta W_\beta$  – потери электроэнергии в рассматриваемой электрической сети;

$Y_w$  – затраты, обусловленные недоотпуском электроэнергии;

$Y_u$  – затраты, вызванные не оптимальными уровнями напряжения у потребителей;

$Y_n$  – затраты сетей и потребителей из-за изменения архитектуры сети;

$F_{ш}$  – затраты, зависящие от уровня токовой нагрузки линий электрической сети;

$F_c$  – затраты, обусловленные ограничениями токов нулевой последовательности.

Недостатком данного методического подхода является сложность, а во многих случаях и невозможность определения затрат  $Y_u$ ,  $Y_n$  и  $Y_\beta$ . По-

этому в работе сделан бездоказательный вывод, что данные составляющие большого влияния на результат решения не оказывают. Кроме того, сомнительно возникновение ущербов от возникновения возможных перегрузок линий электропередач по допустимым токовым нагрузкам, т. к. коэффициент загрузки существующих электрических сетей составляет 0,1–0,4 от номинальных значений.

Для управления конфигурацией распределительных электрических сетей 6–35 кВ в [5] предложен алгоритм построения всех деревьев графа сети на основе [6], последовательность которого включает:

- определение возможных конфигураций электрической сети, с установлением пути передачи электроэнергии каждому потребителю (узлу нагрузки);
- выполнение расчета нормальных установившихся режимов сети для всех возможных конфигураций и исключение из них тех в которых не обеспечиваются условия длительного существования;
- расчет нагрузочных потерь электроэнергии исходя из режима средних нагрузок потребителей;
- оценка надежности системы электроснабжения по выражению:

$$R_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n R_k A_k, \quad (3)$$

где  $R_k$  – надежность электроснабжения  $k$ -ого потребителя;

$A_k$  – значение приоритета  $k$ -ого потребителя;

$n$  – количество потребителей в распределительной электрической сети;

– выбор рациональной конфигурации с учетом весовых коэффициентов каждого потребителя электроэнергии.

Недостаток такой методики выбора оптимальной архитектуры электрической сети состоит в сложности определения весовых коэффициентов показателей надежности и потерь электроэнергии, а также практической невозможности выполнения расчетов без принятия допущения, что для всех конфигураций распределительной электрической сети показатели надежности элементов сети и нагрузки узлов остаются неизменными.

В [7] задачу нахождения оптимальной конфигурации предложено решать методом покоординатного спуска, при этом расчет должен быть периодическим и только в том случае, когда значения целевой функции на соседних циклах не будут существенно отличаться. Недостатком такого подхода является оптимизация только по критерию минимума потерь активной мощности и требования изменения информации по параметрам изменившейся схемы распределительной электрической сети.

При функционировании распределительной электрической сети в условиях SMART GRID, в работе [8] предложен методический подход

нахождения оптимальной конфигурации с учетом распределенных источников малой генерации при следующих условиях:

- источник распределенной генерации работает с неизменными значениями активной и реактивной мощности при подключении его к электрической сети энергосистемы;

- источник распределенной генерации питает автономную нагрузку с соблюдением ограничений по значениям минимальной и максимальной допустимым мощностям.

Существенным недостатком предложенной методики является не учет показателей надежности электрической сети.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что применяемые методы управления архитектурой электрических сетей напряжением 10 кВ не позволяют:

- обеспечить ключевые показатели надежности электроснабжения как отдельного потребителя, так и оптимальной конфигурации всей электрической сети;

- выполнить многокритериальное управление с учетом различных параметров режима и состава включенного оборудования электрической сети;

- использовать дополнительную режимную информацию с элементов электрической сети, получаемую от современных технологических средств автоматизации.

Необходима методика определения индекса эффективности архитектуры функционирования распределительных электрических сетей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Керного, В. В. Местные электрические сети / В. В. Керного, Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. – Минск: Вышэйшая школа, 1972. – 346 с.

2. Холмский, В. Г. Выбор оптимальных точек разрезков в городских электрических сетях с помощью ЭУВМ / В. Г. Холмский // Сб. «Электрические сети и системы». – Львов: ЛПМ, 1965. – С. 17–20.

3. Фурсанов, М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск: УВМУ при УП «Белэнергосбережение», 2005. – 208 с.

4. Фурсанов, М. И. Методические принципы определения оптимальных мест размыкания распределительных электрических сетей с учетом питающей сети 110 кВ и выше / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой, В. В. Макаревич, А. Н. Муха // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: международный научно-технический и производственный журнал. – 2008. – № 6. – С. 23–32.

5. Вуколов, В. У. Управление конфигурацией распределительных электрических сетей 6–35 кВ / В. Ю. Вуколов, А. А. Колесников, Е. Р. Пнев, Б. В. Попков // Электричество. – 2019. – № 2. – С. 10–17.

6. Саати, Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.

7. Булатов, Б. Г. Алгоритмы оптимальной реконфигурации распределительной сети / Б. Г. Булатов, В. В. Тарасенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Том 13, № 2. – С. 14–18.

8. Фурсанов, М. И. О выборе оптимальных точек размыкания в городских электрических сетях в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: международный научно-технический и производственный журнал. – 2018. – № 3. – С. 207–209.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРА НА  
ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ  
ACTIVE POWER FILTER CONTROL SYSTEM BASED ON ADAPTIVE  
FILTERING

Первенёнок Р. Е., к-т. техн. наук, доцент; Сицко А. Л.,  
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь  
R. Pervenyonok, Candidate of technical Sciences, Associate Professor;  
A. Sitsko,  
Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Рассмотрен алгоритм работы системы управления активного силового фильтра на основе адаптивной фильтрации, который позволил снизить коэффициент несинусоидальности гармонического искажения тока. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность применения метода формирования управляющих сигналов в системе управления активного силового фильтра.

*Annotation.* The algorithm of operation of the control system of an active power filter based on adaptive filtering is considered, which made it possible to reduce the non-sinusoidality coefficient of harmonic distortion of the current. Experimental studies have been carried out confirming the effectiveness of the method of generating control signals in the control system of an active power filter.

*Ключевые слова:* активный силовой фильтр, адаптивная фильтрация, система управления.

*Key words:* active power filter, adaptive filtering, control system.

## ВВЕДЕНИЕ

Подключенная к системе электроснабжения (СЭС) нелинейная электрическая нагрузка создает проблемы в поддержании приемлемого качества электрической энергии. Поэтому в СЭС, в которой присутствует такая нагрузка, должно совершенствоваться качество электрической энергии.

Одним из самых эффективных устройств повышения качества электрической энергии и компенсации реактивной мощности и мощности искажений является силовой активный силовой фильтр (АСФ). АСФ может выполнить подавление гармоник, регулирование реактивной мощности, коррекцию коэффициента мощности, балансировку нагрузки, регулирование напряжения и уменьшение мерцания [1–3].

Принцип действия АСФ основан на анализе гармоник тока или напряжения нелинейной нагрузки и генерации в систему электроснабжения СЭС таких же гармоник тока или напряжения, но с противоположной фазой. Основное отличие разрабатываемых систем заключается в приме-

няемом методе формирования задающих воздействий на силовую часть в системах управления (СУ) Одни из перспективных методов является применение адаптивной фильтрации [4–6].

### ОСНОВАННАЯ ЧАСТЬ

Предлагаемом методе адаптивной фильтрации спектральный состав сигнала, формируемого системой управления АСФ, должен совпадать с гармоническим составом несинусоидального тока, генерируемого нелинейной нагрузкой СЭС. В компенсирующем токе основная гармоника должна отсутствовать.

Для получения такого сигнала можно использовать режекторный фильтр, настроенный на частоту основной гармоники. Однако такой подход имеет недостатки, так как режекторный фильтр является статическим устройством, то его характеристики могут изменяться при изменении частоты и амплитуды основной гармоники. Таким образом, для формирования управляющего сигнала АФ необходимо адаптивное устройство, характеристики которого изменяются при изменении спектрального состава несинусоидальных токов.

СУ АСФ построена на основе адаптивной фильтрации представлена на рис. 1.

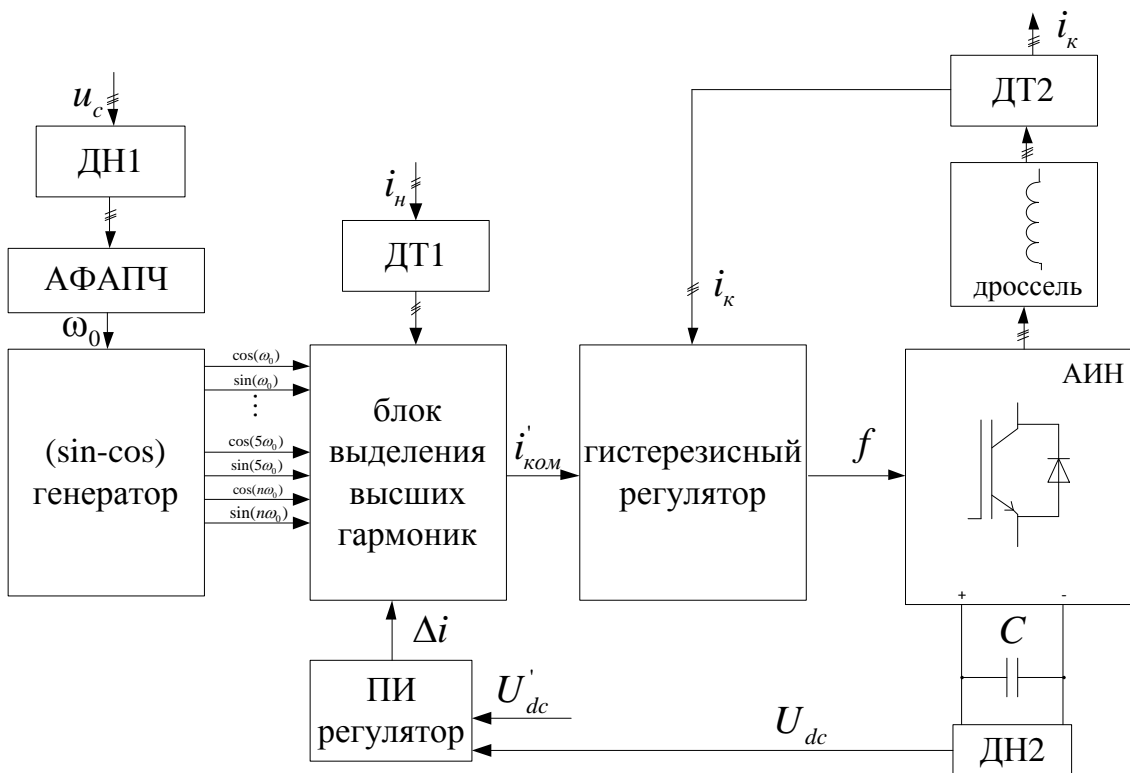


Рис. 1. Структурная схема АСФ с СУ на основе адаптивной фильтрации

Таким образом, алгоритм работы системы управления выглядит следующим образом:



- в начале работы производится измерение значения тока нагрузки  $i_n$  и напряжения сети  $u_c$ . Полученные данные от измеряющих датчиков тока (ДТ) и напряжения (ДН) передаются в блок выделения высших гармоник и адаптивной фазовой автоподстройки частоты (АФАПЧ) соответственно;
- АФАПЧ происходит выделение частоты питающей сети, которая затем поступает на генератор ( $\sin - \cos$ );
- на следующем шаге в блоке выделения высших гармоник происходит генерация высших гармоник;
- на основании полученного сигнала искажения формируется управляющий сигнал силовыми ключами при помощи гистерезесного регулятора;
- далее в силовой части активного фильтра путем переключений ключей по заданному сигналу формируется ток фильтра  $i_k$ , который представляет собой «зеркальное» отображение искажающего сигнала;
- на завершающем этапе происходит генерация полученного сигнала в сеть.

Таким образом, для того чтобы обеспечить компенсацию высших гармонических составляющих, генерируемых нелинейными нагрузками, необходимо установить по три датчика напряжения и тока в каждую фазу на общей секции шин и три датчика тока для определения тока фильтра, а также датчик напряжения на конденсаторе С.

Чтобы показать эффективность предложенного способа управления, проводились экспериментальные исследования. Представлена структура макета АСФ с СУ на рис. 2, которая включает в себя программное обеспечение Matlab [7], одноплатный компьютер Raspberry Pi3 и источник бесперебойного питания (ИБП).

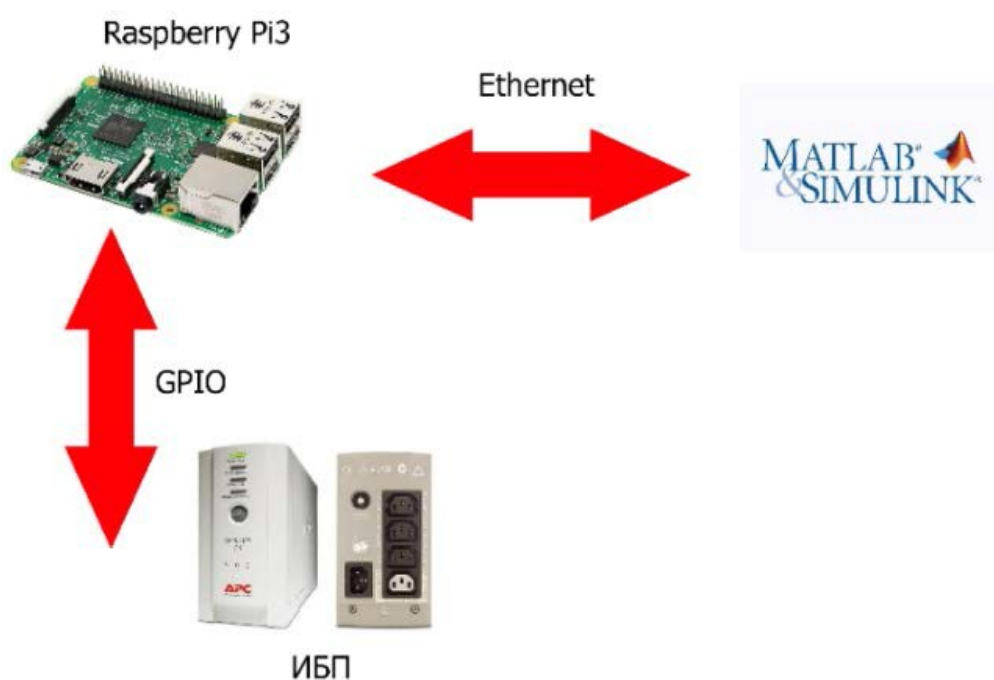


Рис. 2. Структура макета АСФ с СУ

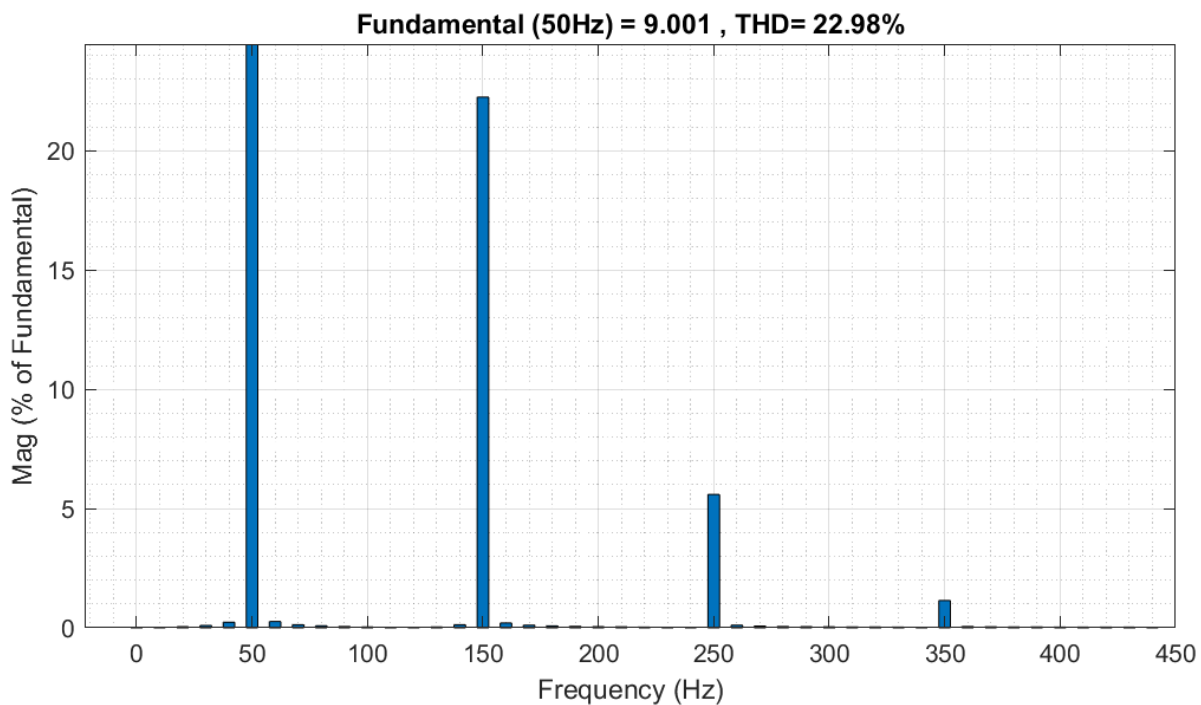


Рис. 3. Спектральный состав тока нелинейной нагрузки без АСФ

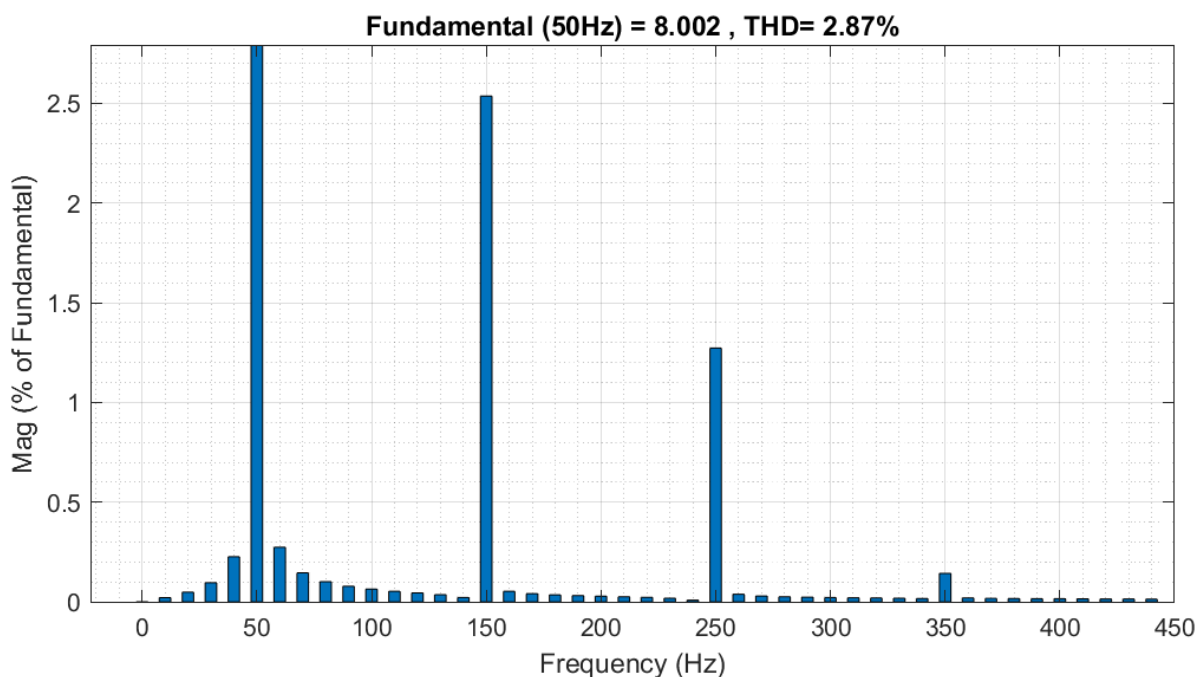


Рис. 4. Спектральный состав тока сети с подключенным АСФ

На рис. 3 и 4 приведены спектральные составы токов сети с включенной нелинейной нагрузкой до подключения и после включения АСФ соответственно. Из рис. 3 и 4 видно, что суммарное гармоническое искажение тока до включения АСФ составляет  $THD$  22,98 %, а после включения АСФ имеет  $THD$  2,87 %, что говорит об эффективности применения адаптивной фильтрации в СУ АСФ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен метод формирования управляющих сигналов для АСФ, основанный на использовании адаптивной фильтрации.

Основой системы формирования управляющих сигналов является адаптивный цифровой фильтр в форме линии задержки с отводами, настраиваемый с помощью упрощенного алгоритма Ньютона.

Результаты имитационного моделирования предложенного метода показали, суммарное гармоническое искажение тока до включения АСФ составляет ТНД 22,98 %, а после включения АСФ имеет ТНД 2,87 %, что говорит об эффективности применения адаптивной фильтрации в СУ АСФ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер.: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. Изд. 2-е. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.
3. Жежеленко, И. В. Электромагнитная совместимость потребителей / И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк и др. – Машиностроение, 2012. – 351 с.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 2006. – 856 с.: ил.
5. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. – 528 с.
6. Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К. Ф. Н. Коуэна, П. М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.: ил.
7. Дьяконов В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений [Текст] / В. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

# **Теплоэнергетика**

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РАБОТЫ  
ТУРБОУСТАНОВКИ ЭНЕРГОБЛОКА БЛОКА АЭС  
В МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМАХ  
MODERN METHODS AND ALGORITHMS OF OPERATION OF THE  
TURBINE OF THE NPP UNIT IN FLEXIBILITY MODES

Худяков И. С., аспирант,  
Нижегородский государственный технический университет  
им. Р. Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
I. Khudyakov, Postgraduate,  
Nizhny Novgorod state technical University named after R. E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation

*Аннотация.* В данной статье отражены основные методы и алгоритмы работы турбоустановки энергоблока блока АЭС в маневренных режимах, таких как режим первичного регулирования частоты, вторичное регулирование частоты и режим следования за нагрузкой. В статье рассмотрен подход к моделированию работы регулятора частоты вращения турбоустановки подключенной к энергосети в режиме первичного регулирования частоты и вторичного регулирования частоты.

*Abstract.* This article reflects the main methods and algorithms for the operation of the turbine of the NPP power unit in flexibility modes, such as the primary frequency control mode, the secondary frequency control and the load following mode. The article considers an approach to modeling the operation of the speed controller of a turbine plant connected to the power grid in the mode of primary frequency control and secondary frequency control.

*Ключевые слова:* маневренные режимы работы, турбина, регулятор, регулирование частоты в сети, АЭС.

*Key words:* feasibility modes of operation, turbine, governor, network frequency regulation, nuclear power plant.

## ВЕДЕНИЕ

Как было изложено в [1; 2] нарушение баланса между производимой и потребляемой мощностью в энергосети ведет к отклонению частоты тока относительно номинального значения 50 Гц (нормальное отклонение частоты переменного тока в электросети в соответствии с ГОСТ 32144-2013 составляет  $\pm 0,2$  Гц, а предельно допустимое  $\pm 0,4$  Гц). Для устойчивой работы энергосети необходимо поддерживать стандартную частоту, т. е. регулировать нагрузку энергосети – поддерживать баланс производимой и потребляемой мощности, что делается в основном за счет изменения мощности входящих в энергосеть энергоблоков. Для конкретного энергоблока

это осуществляется путем изменения расхода или параметров рабочего тела через турбину. Режимы изменения мощности энергоблока с целью регулирования нагрузки энергосети называются маневренными режимами.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассматривая маневренные режимы, необходимо учитывать принципиальное различие между случайными и плановыми изменениями нагрузки энергосети.

Случайные изменения нагрузки энергосети происходят в результате отключений, подключений или изменений режимов работы множества маломощных бытовых потребителей, а также в результате аварийных отключений крупных потребителей или производителей электроэнергии. Компенсация случайных изменений нагрузки энергосети обеспечивается изменением мощности энергоблоков в автоматическом режиме, который называется режимом первичного регулирования частоты (ПРЧ).

ПРЧ стабилизирует частоту тока на уровне, который может отличаться от номинального значения. При необходимости, восстановление номинального значения частоты тока и восстановление исходной мощности энергоблоков, изменивших нагрузку в режиме ПРЧ, обеспечивается за счет изменения мощности других специально выделенных для этой цели энергоблоков. Этот процесс называется вторичным регулированием частоты (ВРЧ). Вторичное регулирование может осуществляться как автоматически – по сигналам центрального регулятора энергосети, так и вручную – оператором энергоблока по заданию, согласованному с диспетчером энергосети.

Электрическая мощность энергоблока определяется мощностью турбогенератора. Управление его мощностью осуществляется изменением расхода пара на турбину при помощи стопорно-регулирующих клапанов турбины, под действием системы регулирования турбины. Она, в свою очередь, может работать либо поддерживая электрическую мощность турбогенератора, либо изменять ее в заданном темпе – режим РМ. Или поддерживать давления пара в заданном диапазоне – режим РД [3]. При работе энергоблока в режиме маневрирования основным режимом работы системы регулирования турбины является режим РМ. При этом автоматический регулятор мощности реактора должен работать в поддержания постоянной температуры [4]. Традиционно регулирование мощности ВВЭР при работе в базовом режиме основано на сохранении баланса между мощностью реактора и мощностью турбины за счет поддержания заданного давления пара в ГПК – программа  $P_{const}$  [5]. Зависимость заданного номинального давления пара от мощности реактора называется статической программой регулирования мощности

В данной статье рассматривается подход к моделированию работы турбоустановки в энергосистеме в режимах ПРЧ и ВРЧ.

Для поддержания частоты вращения на заданном уровне необходимо постоянно сохранять баланс мощностей турбины и генератора (нагрузки). Приведенные выше рассуждения для одного изолированного агрегата, работающего на изолированную нагрузку, справедливы и для нескольких агрегатов, работающих параллельно на общую нагрузку. Так, для энергосистемы, состоящей из большого числа турбогенераторов, в первый момент изменения нагрузки (при неизменном открытии регулирующих органов) последняя покрывается за счет кинетической энергии всех вращающихся масс системы. При увеличении нагрузки кинетическая энергия и частота вращения агрегатов снижается. Снижение нагрузки приводит к увеличению частоты вращения и, следовательно, к увеличению кинетической энергии вращающихся масс системы. Так как нагрузка системы непрерывно меняется, то для поддержания постоянной частоты вращения агрегатов системы необходимо менять мощности, развиваемые турбинами, постоянно сохраняя при этом баланс вырабатываемой и потребляемой мощностей. Такое непрерывное наблюдение за сохранением баланса мощностей генерации и потребления в энергосистеме выполняется автоматически регуляторами частоты вращения турбин. В энергосистеме, помимо сохранения баланса мощностей, возникает задача распределения нагрузок между отдельными агрегатами, которая решается с помощью дополнительных регуляторов частоты и обменной мощности [6; 7].

Структурная схема модели турбогенератора, включенного в энергосистему представлена на рис. 1.

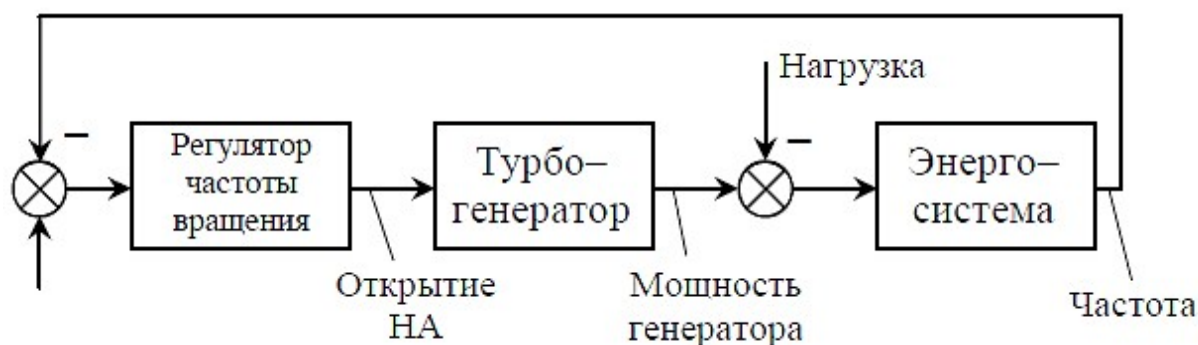


Рис. 1. Структурная схема модели турбогенератора, включенного в энергосистему

В качестве регулятора частоты могут использоваться электрогидравлические регуляторы частоты или же более простые аналоговые регуляторы угловой скорости. Функциональная схема аналогового регулятора показана на рис. 2.

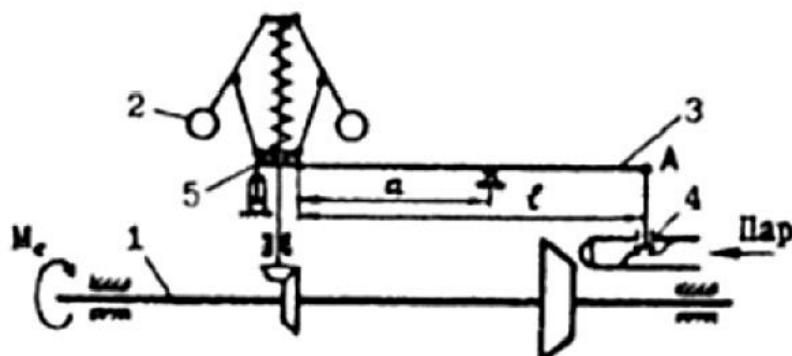


Рис. 2. Функциональная схема аналогового регулятора:  
 1 – турбина; 2 – грузы; 3 – рычаг; 4 – задвижка; 5 – муфта

При отклонении угловой скорости турбины от заданного значения меняется центробежная сила грузов, в связи с чем изменяется положение муфты, которая рычагом приводит в действие исполнительный механизм – задвижку. Данная САР является системой прямого действия.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании упрощенного моделирования системы турбоустановка – сеть в большинстве источников [6; 7] в качестве передаточных функций звеньев структурной схемы, показанной на рис. 2, используются простые апериодические звенья первого порядка. При таком подходе и жесткой обратной связи процесс носит колебательный характер. Уменьшение времени и амплитуды колебаний, а также выбора зон нечувствительности заставляет использовать более современные электронные регуляторы и существенно более сложные модели систем управления, чем это показано на рис. 1 и 2. От совершенствования систем управления и их компонентов напрямую зависит качество и стоимость электроэнергии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Худяков И. С., Власичев Г. Н. Обоснование целесообразности работы энергоблока АЭС в маневренных режимах // XIV Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых. – Том I Технические и естественные науки, 2020 – с. 280–282.
2. Худяков И. С., Власичев Г. Н., Ворошилов А. А. Обзор различных программ для моделирования работы АЭС и их применимость для анализа маневренных режимов // Будущее технической науки: сборник материалов XIX Всероссийской молодежной научно-техн. конф.; НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. – С. 79–80.
3. Баскаков В. Е, Максимов М. В, Маслов О. В. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы // Труды Одесского политехнического университета. – 2007. – вып. 2 (28).



4. Тодорцев Ю. К., Фощ Т. В., Никольский М. В. Анализ методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором при маневрировании // восточно-европейский журнал передовых технологий. – 6/8 (66). – 2013.

5. Аверьянова С. П., Дубов А. А., Косоуров К. Б., Семченков Ю. М., Филимонов П. Е. Развитие способов управления ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки. Атомная энергия. – Т. 114, вып. 5. – май 2013.

6. Павлов Г. М., Меркурьев Г. В. Автоматика энергосистем. – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2005.

7. Меркурьев, Г. В. Устойчивость энергосистем / Г. В. Меркурьев, Ю. М. Шаргин – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2008. – Т. 2. – С. 376.

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОПРЕСНЕНИЯ  
КОЛЛЕКТОРНО-ДРЕНАЖНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ПУСТЫНИ  
SOLAR ENERGY IN SOLVING THE PROBLEMS OF COLLECTOR-  
DRAINAGE WATER DESALINATION IN DESERT CONDITIONS

Бекмурзаев Б. Х., преподаватель; Бабаев М. Б., преподаватель,  
Туркменский государственный архитектурно-строительный институт,  
г. Ашхабад, Туркменистан

B. Bekmurzaev, Senior Lecture, M. Babayev, Senior Lecture,  
Turkmen State Architecture and Construction Institute,  
Ashgabat, Turkmenistan

*Аннотация.* В статье рассмотрены вопросы о возможностях и преимуществах установок электродиализа с использованием Солнечной энергии, в частности: выбор и обоснование установок опреснения, работающих на Солнечной энергии в пустынных условиях; обоснование важности использования солнечной энергии в энергообеспечении установок опреснения воды.

*Abstract.* The article deals with the possibilities and advantages of electro dialysis plants using solar energy, particularly: the choice and justification of desalination plants operating on solar power in desert conditions; substantiation the importance of using solar energy in the energy supply of water desalination plants.

*Ключевые слова:* солнечная энергия, инновационные технологии, электродиализ, установка опреснения, дренажные воды.

*Key words:* solar energy, innovative technologies, electro dialysis, desalination plant, drainage water.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобального изменения климата и нарастающего дефицита воды в мировом масштабе чрезвычайно актуальной становится задача эффективного управления водными ресурсами, как на уровне стран, так и на уровне целых регионов [1].

Одним из важных резервов источников воды для водоснабжения населенных пунктов и экономики в Туркменистане являются коллекторно-дренажные воды, отводимые с орошаемых площадей, которые составляют примерно 20–30 % используемого в стране объема воды.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для решения множества локальных проблем в зоне влияния Туркменского озера «Алтын асыр» использование электрической энергии, полученной солнечными фотоэлектрическими станциями, позволит быстро и эффективно

использовать в производстве электродиализные опреснительные установки. Поэтому, создание и внедрение опреснительных установок, питающихся от солнечных фотоэлектрических станций для водо-энергоснабжения пустынных потребителей в зоне Туркменского озера, является весьма перспективным [2]. Предпосылками этого являются: большое число солнечных дней на территории Каракумов (до 240–260 дней в году), дневная продолжительность 10–12 часов и высокая интенсивность солнечного излучения (до  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ).

При отсутствии централизованного энергоснабжения солнечные установки экономически эффективнее по сравнению традиционными методами. Высокая эффективность солнечной энергии в зоне влияния Туркменского озера «Алтын асыр» позволяет широко использовать солнечные батареи для энергоснабжения опреснительных установок малой и средней мощности.

Используемый метод электродиализа, работающий на солнечной энергии, при сравнении с другими методами опреснения воды является одним из самых выгодных [2]. Для этих целей совместно с учеными института «Туркменсувылымтаслама» нами создана установка, которая будет работать на солнечных батареях.

Созданные автономные электродиализные опреснительные установки малой мощности предусматривают в составе солнечной фотоэлектрической станции, фильтра предварительной и окончательной очистки, электродиализа, то есть одновременно проводить очистку, обеззараживание, умягчение и опреснение воды [4]. Разработаны технологические схемы функционирования от солнечных батарей (СБ) электродиализной опреснительной установки, опресняющей дренажной воды Туркменского озера «Алтын асыр». Определены основные составные части технологической цепей электродиализной опреснительной установки, работающей от солнечных батарей, а также созданы усовершенствованные опытно-экспериментальные образцы электродиализной установки малой мощности, а также принята подходящая схема работы при использовании СБ в качестве источника энергии для установки [3].

Научные исследования проводились совместно с учеными института «Туркменсувылымтаслама» на созданном ими опытном участке.

Проведенные исследования и опыты показали возможность работы подобных малых производительных сооружений. Солнечные батареи, используемые при этом методе, способны опреснять дренажные воды с уровнем солености 5 г/л и получать с его помощью питьевую воду.

Результаты созданного автономного электродиализного опреснительного аппарата малой мощности при опреснении коллекторно-дренажных вод приведены в (табл.). Исследования проводились в дневное время при минерализация исходной дренажной воды 4,5–8,14 г/л; количестве солнечных батарей 4 шт; количестве ячеек аппарата 50 штук. Производительность аппарата была постоянной и составляла 10 л/ч. Максимальный вырабатываемый ток солнечных батарей был равен 0,95–1,06 А, а вырабатываемое напряжение составляло 48,8–50,25 Вольт, вырабатываемый мощность 47,63–51,73 Вт.

В процессе исследований были определены средние значения рабочих параметров электродиализного аппарата при работе от 4-х солнечных батарей при различных концентрациях солей в коллекторно-дренажных водах. В результате проведенной работы были установлены приемлемые энергопоказатели электродиализа малой мощности опреснителя дренажных вод – производительность установки составляет 10 литров в час, а при работе по схеме прямого течения опресняются дренажные воды с соленостью до 5 г/л и понижается уровень солености до 0,48 г/л. Были продемонстрированы возможности опреснения коллекторно-дренажных вод Туркменского озера «Алтын асыр» при помощи электродиализа опреснения вод.

Таблица

Средние энергетические показатели автономного электродиализного аппарата малой мощности при опреснении различных соленостями коллекторно-дренажных водах

Соленость исходной воды, $C_{исх}$ (г/л)	Соленость опресненной воды, $C_{кон}$ (г/л)	Количество солнечных батарей, шт	Средние значения потребляемого тока аппарата $I_{ср.ЭДА}$ раб (А)	Средние значения потребляемого напряжения аппарата $U_{ср.ЭДА}$ раб (В)	Средние значения потребляемой мощности аппарата $N_{ср.ЭДА}$ (Вт)	Максимальный вырабатываемый ток солнечной батареи, $I_{СБ}$ м. (А)	Максимальное вырабатываемое напряжение солнечных батарей $U_{СБ}$ м. (В)	Максимальная вырабатываемая мощность солнечных батарей, $N_{СБ}$ м. (Вт)
8,14	3,37	4СБ	0,48	68,28	32,77	1,06	48,8	51,73
6,65	1,06	4СБ	0,36	65,57	23,61	0,95	50,14	47,63
4,5	0,48	4СБ	0,28	64,72	18,12	1,01	50,25	50,75

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная установка представляет, возможность обеспечения питьевой водой водопользователей проживающих и работающих в зоне действия Главного коллектора Туркменского озера «Алтын асыр» (животноводческие фермы, экспедиции, временные трудовые коллективы и т. д.).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бертокс П., Радц Д. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнения. Пер. с англ. / Под ред. Я. Б. Черткова. – М.: Мир, 1980.
2. Павлов Ю. В. Опреснение воды. М.: Просвещение, 1972.
3. G.Havens, Pasific Factoru. – № 5. – 1964.
4. Смагин В. И. Обработка воды методом электродиализа. – М. 1986 г.

УДК 628.336.6

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ КОТЕЛЬНЫХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ  
ON THE POSSIBILITY OF USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES  
FOR LOW-POWER BOILER HOUSES

Джумадурдыев Т. М., ст. преподаватель; Курбансахедов К. А.,  
ст. преподаватель,  
Туркменский государственный архитектурно-строительный институт,  
г. Ашхабат, Туркменистан  
T. Jumadurdiev, Senior Lecture; K. Kurbansahedov, Senior Lecture,  
Turkmen State Architecture and Construction Institute,  
Ashgabat, Turkmenistan

*Аннотация.* В статье рассмотрены возможности использования возобновляемых источников энергии (биогазового топлива) на территории городе Ашхабат. Приведен расчет оправданности внедрения данной технологии на города. Также описана экономическая выгода и ориентировочный срок окупаемости биогазовой технологии.

*Abstract.* The article considers the possibility of using renewable energy sources (biogas fuel) in the city of Ashgabat. The calculation of the justification for the introduction of this technology in cities is given. The economic benefits and estimated payback period of biogas technology are also described.

*Ключевые слова:* возобновляемые источники энергии, альтернативное топливо, биогаз, биомасса.

*Key words:* renewable energy sources, alternative fuels, biogas, biomass.

## ВВЕДЕНИЕ

Одними из самых востребованных направлений науки являются разработка энергосберегающих технологий, поиск возобновляемых источников энергии, рационального и эффективного использования уже имеющихся знаний в этой области, а также разработка технологий для улучшения экологии.

В связи с ростом стоимости природного газа все больший интерес вызывает использование в качестве альтернативного топлива биогаза, производимого на городских очистных сооружениях. В настоящее время использование биогаза еще не получило широкого распространения (в основном из-за того, что это требует больших капитальных вложений)

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Результатом роста численности населения больших городов является увеличение объема сточных вод в связи с чем вопрос их очистки в соответствии с требованиями экологических норм становится весьма

актуальным. К тому же завершающей стадией очистки городских сточных вод является производство биогаза на очистных сооружениях.

На данный момент развитие методов использования возобновляемых источников энергии принимает главную роль в энергетике. Это связано с ограниченностью запасов основных видов топлива, таких как газ и нефть, уголь и др., что приводит к ежемесячному удорожанию их использования. С другой стороны, их добыча и использование приводит к постоянному загрязнению окружающей среды.

Огромный экологический ущерб, связанный с парниковым эффектом, т. е. глобальным изменением климата наносят добыча, переработка, сжигание ископаемых видов топлива.

Биотопливо занимает одну из ведущих позиций в структуре возобновляемых источников энергии, которые позволяют улучшить экономическую составляющую и сократить выбросы парниковых газов.

Биогаз – общее название горючей газовой смеси, получаемой при разложении органических субстанций в результате анаэробного микробиологического процесса (метанового брожения). Его основные компоненты: метан ( $\text{CH}_4$ ) – 55–65 % и углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) – 35–45 %, а также в очень малых количествах, около 1 %, другие газы, например – водород ( $\text{H}_2$ ) и сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Средняя теплота сгорания биогаза, содержащего около 60 % метана, равна 22 МДж/м<sup>3</sup>. Поскольку горючая часть биогаза состоит из метана (температура воспламенения метана около 645 °С), его причисляют к семейству природных газов.

Следует отметить, что производство биогаза позволяет не только заместить часть природного газа, используемого на предприятиях по очистке городских стоков, но и решить ряд сопутствующих задач:

- уменьшить массу органических веществ путем их биологической деструкции с образованием биогаза;
- снизить антропогенную нагрузку на окружающую природную среду за счет сокращения выбросов в атмосферу вредных органических соединений;
- уменьшить парниковый эффект за счет сжигания получаемого биогаза в котлах, двигателях внутреннего сгорания или свечах аварийного дожигания (перевод  $\text{CH}_4$  в  $\text{CO}_2$  снижает парниковый эффект в 5,5 раза);
- обеспечить частично электроэнергией очистные сооружения.

В зависимости от биомассы, используемой для производства биогаза, можно выделить следующие его виды:

- газ метантенков, получаемый на городских канализационных очистных сооружениях (БГ КОС);
- биогаз, получаемый в биогазовых установках при сбраживании отходов сельскохозяйственных производств (БГ СХП);
- биогаз, получаемый на полигонах отходов, содержащих органические компоненты (БГ ТБО) [1].



Рис. Процесс образование биогаза

При рассмотрении возможности производства биогаза для котельных города Ашхабада с населением около 1,1 млн. человек. В качестве сырья предлагается использовать канализационные стоки из системы городской канализации. Центральной канализацией обеспечено почти 100 % домовладений. При объеме канализационных сбросов, составляющем около 300000 м<sup>3</sup> в сутки, и при пересчете его в биогаз выходит около 46 млн м<sup>3</sup>/год биогаза, что определяется по формуле

$$V = 365 \times v \times \mu \times km, \quad (1)$$

где  $V$  – годовой объем биогаза, м<sup>3</sup>;

$v$  – среднесуточный объем сбросов, м<sup>3</sup>/сут.;

$\mu$  – теоретический выход газа, м<sup>3</sup>/кг;

$m$  – масса биомассы, кг;

$k$  – процентное соотношение сухого остатка от общей массы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по соотношению полученной теплоты при пересчете на природный газ мы можем получить объем эквивалентный 29 млн. м<sup>3</sup> в год.

Среднее значение низшей теплоты сгорания биогаза равно 20,6 МДж/м<sup>3</sup>, а у природного газа 32,7 МДж/м<sup>3</sup>, т. е. по теплоте сгорания 1 м<sup>3</sup> биогаза эквивалентен 0,63 м<sup>3</sup> природного газа [2]. По соотношению теплоты сгорания потенциальная экономия природного газа при замещении его биогазом составляет 29 млн. м<sup>3</sup>, при стоимости 1 тыс. м<sup>3</sup> природного газа 5990 руб. (в 2021 г.) ежегодная экономическая выгода составит около 275730 млн. руб. Расчеты показывают, что внедрение данной технологии на территории Ашхабада является перспективным и экономически оправданным решением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чадова, Н. А., Чадов, А. Ю. Технологии производства биогаза и перспективы его применения в России // Материалы VIII Международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум». – Путь доступа: [http://www.scienceforum.ru /2017/2203/28016](http://www.scienceforum.ru/2017/2203/28016). – Дата доступа: 03.05.2023.
2. Баадер, В. Биогаз: теория и практика / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер; пер. с нем. и предисл. М. И. Серебряного. – М.: Колос, 1982. – 148 с.



УДК 639.021

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ ПРАВИЛЬНОЙ И НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМ  
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE HYDRAULIC RESISTANCE  
OF REGULAR AND IRREGULARLY SHAPED BODIES

Андреев В. В., д-р техн. наук, профессор; Заузолкова Н. О., Пахомов А. В.,  
Сабурина Т. С., Самойлов А. М.,

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

V. Andreev, Doctor of technical Sciences, Professor; N. Zauzolkova,  
A. Pakhomov, T. Saburina, A. Samoilov,

Nizhny Novgorod state technical University named after R. E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation

*Аннотация.* Было проведено исследование гидравлического сопротивления разнородной засыпки из шаровых элементов, а также засыпки из тел неправильной формы (кварцевый песок), проведен сравнительный анализ полученных результатов исследования с теоретическими зависимостями. Показано, что в сравнении с теоретическими данными полученные результаты для засыпки из шаровых элементов имеют достаточно высокую степень сходимости, однако для засыпки из тел неправильной формы результаты имеют отклонение от теоретических данных.

*Abstract.* The study of hydraulic resistance of heterogeneous backfill made of ball elements, as well as backfill made of irregularly shaped bodies (quartz sand) has been conducted, a comparative analysis of the results of the study with the theoretical dependencies has been carried out. It is shown that in comparison with the theoretical data, the results obtained for the backfill of ball elements have a sufficiently high degree of convergence, but for the backfill of irregularly shaped bodies, the results have a deviation from the theoretical data.

*Ключевые слова:* гидравлическое сопротивление, пористость, засыпные элементы.

*Key words:* hydraulic resistance, porosity, filling elements.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проводится множество гидравлических испытаний различного технологического оборудования, в частности для ядерных энергетических установок с целью определения оптимальных гидравлических характеристик активных зон реакторных установок с шаровыми ТВЭЛ, фильтрующего оборудования с разнородными засыпными элементами и др.

Так как эмпирически подтвержденных теоретических зависимостей для конкретного вида засыпных элементов в технической литературе недостаточ-

но [1], возникает необходимость в проведении сравнительного анализа экспериментальных данных с имеющимися теоретическими и верификации данных выражений для определения гидравлического сопротивления таких структур.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В лаборатории теплогидравлики кафедры «Ядерных реакторов и энергетических установок» НГТУ им. Р. Е. Алексеева находится стенд (рис. 1) для проведения гидравлических испытаний. Установка представляет собой замкнутую трассу циркуляции, состоящую из насоса, экспериментального участка, представляющего собой емкость со штуцером для загрузки и выгрузки засыпных элементов (рис. 2, на входе и выходе экспериментального участка установлена сетка), основного и вспомогательного трубопроводов. Для измерения перепада давления на экспериментальном участке используется дифференциальный манометр. Расход среды измеряется турбинным расходомером.

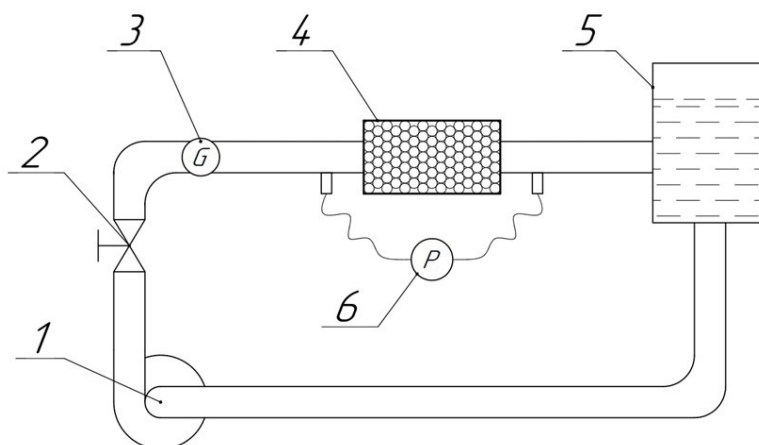


Рис. 1. Схема лабораторного стенда: 1 – насос; 2 – запорная арматура; 3 – расходомер турбинный; 4 – емкость для загрузки и выгрузки засыпных элементов; 5 – цистерна с водой; 6 – дифференциальный манометр

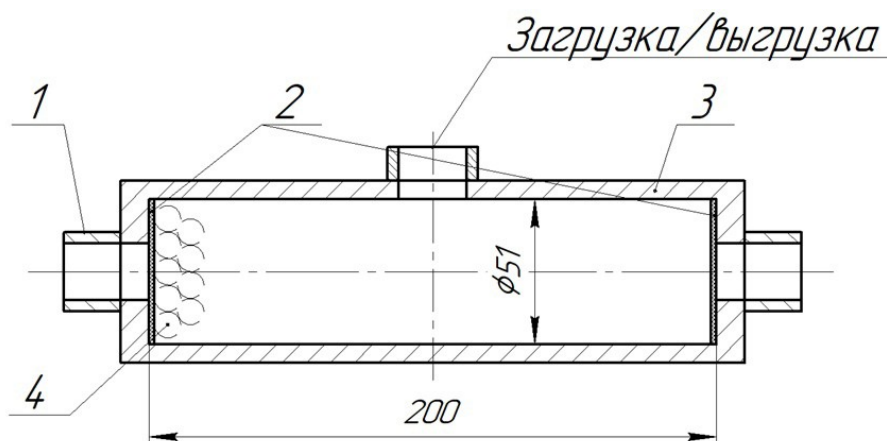


Рис. 2. Емкость для загрузки и выгрузки засыпных элементов: 1 – штуцер входа/выхода; 2 – фиксирующая сетка; 3 – корпус; 4 – засыпные элементы (показаны условно)

В качестве объектов исследования выступали смесь пластиковых и свинцовых шаровых элементов диаметром 6 мм и кварцевый песок фракциями 2–5 мм.

Определяющими параметрами при оценках гидравлического сопротивления засыпных структур являются: режим течения, средний диаметр одного элемента, пористость [1].

$$\xi = \frac{l_0}{d_s} \left[ \frac{360(1-\varepsilon')^2}{\varepsilon'^3 \text{Re}} + \frac{B'(1-\varepsilon')}{\varepsilon'^3} \right], \quad (1)$$

где  $\varepsilon'$  – пористость слоя;

Re – критерий Рейнольдса;

$B' = 1,8$  – для тел с гладкой поверхностью,  $B' = 4$  для тел с шероховатой поверхностью;

$l_0$  – толщина слоя, м;

$d_s$  – средний размер (диаметр) тела, м.

Перепад давления на участке определяется по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho Q^2}{2S^2}, \quad (2)$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;

$S$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>.

В случае произвольной беспорядочной засыпки в каналах большого поперечного сечения пористость слоя составляет величину порядка 0,4 [2]. Диаметр одного шарового элемента составляет 6 мм, а средний эквивалентный диаметр одного элемента неправильной формы – 3,4 мм. Полученные результаты приводились к скорости среды в подводящем патрубке.

Для всех засыпных элементов были определены гидравлические характеристики (рис. 3, 4).

По данным, представленным на рис. 3, 4 видно, что гидравлические характеристики засыпных тел правильной формы хорошо согласуются с теоретическими зависимостями (среднее отклонение 6 %). Для засыпных тел неправильной формы имеет место значительное рассогласование полученных экспериментальных и теоретических данных (среднее отклонение 70 %).

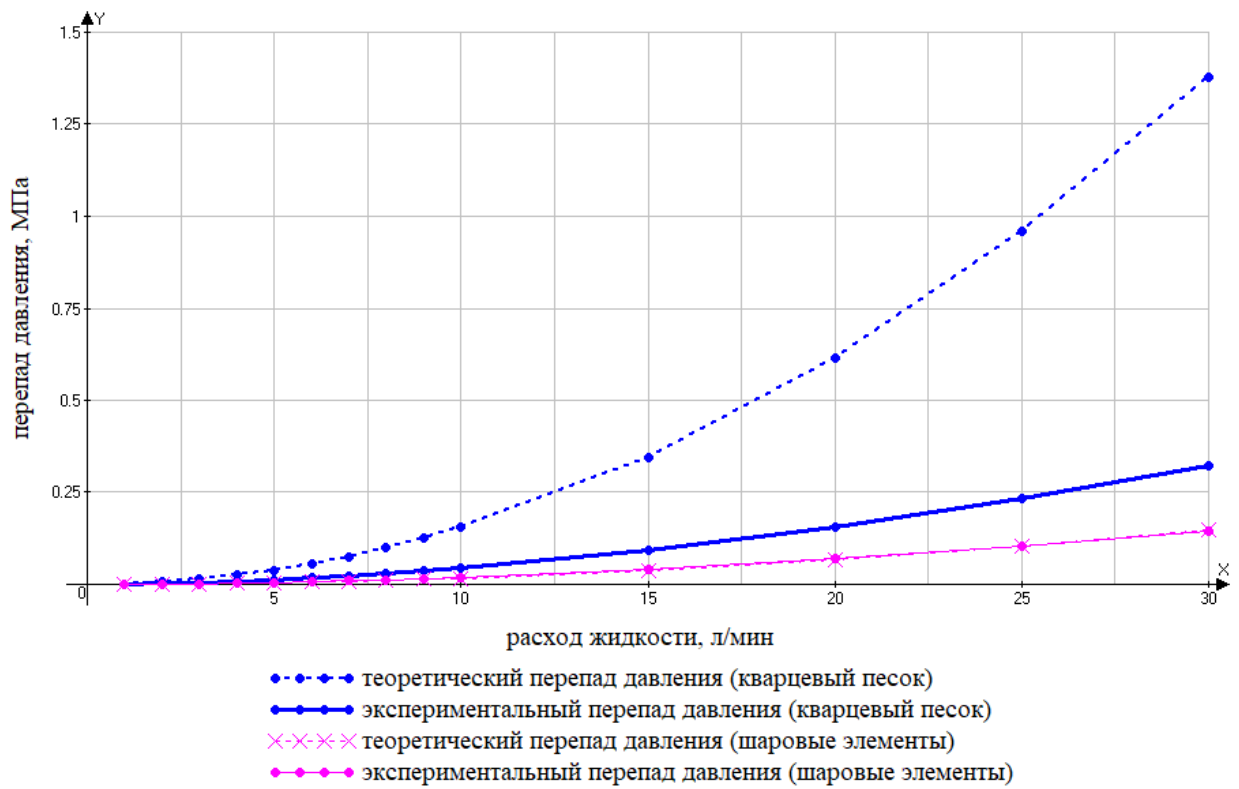


Рис. 3. Зависимость перепада давления от расхода

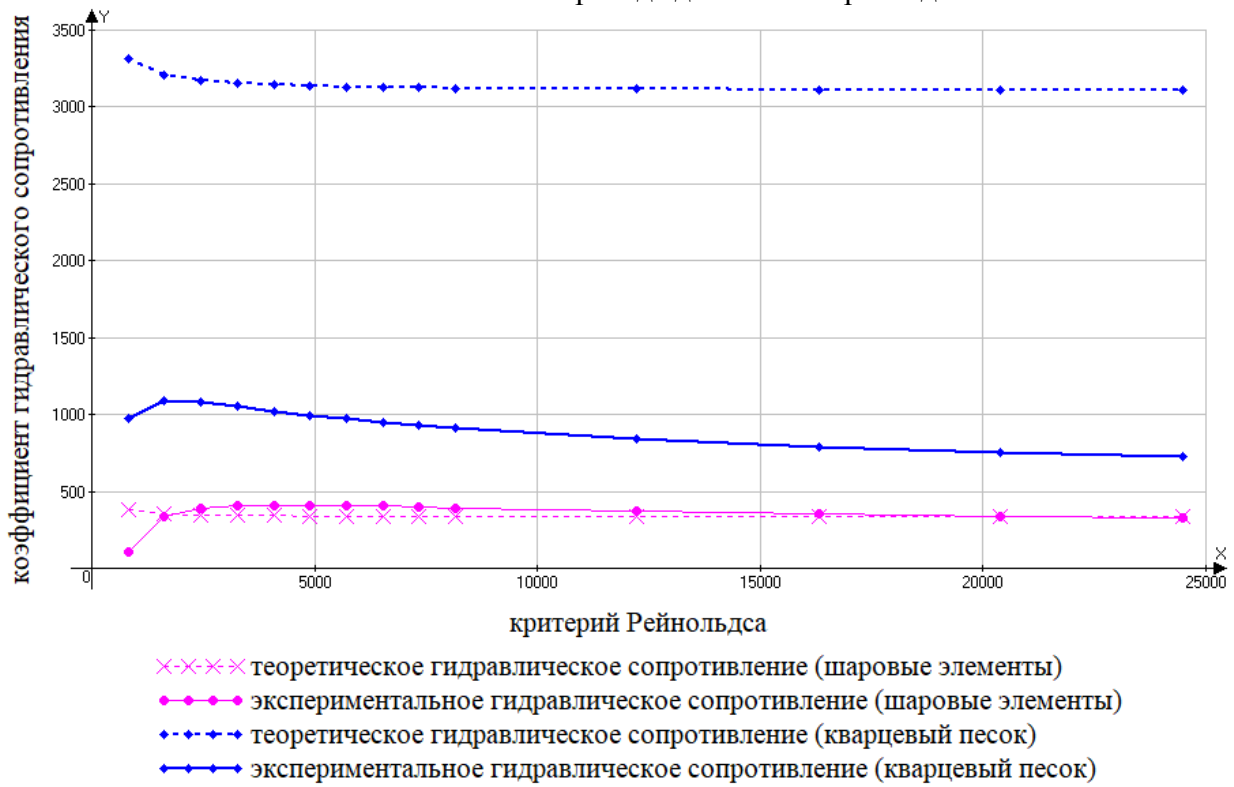


Рис. 4. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от критерия Рейнольдса

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных можно заключить, что для тел правильной формы имеет место корреляция теоретических и экспериментальных данных, для тел неправильной формы наблюдается существенное расхождение, следовательно, необходимо проведение индивидуальных гидравлических испытаний для определения сопротивления засыпных структур неправильной формы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 671, [1] с. : ил.; 24 см.; ISBN 5-217-00393-6 (В пер.)
2. Петухов Б. С. Теплообмен в ядерных энергетических установках: [учебное пособие для энерг. спец. вузов] / Б. С. Петухов, Л. Г. Генин, С. А. Ковалев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 470 с. – Б. ц.

ОДИН ИЗ СПОСОБОВ УДАЛЕНИЯ НАКИПИ В ТЕПЛООБМЕННИКАХ  
ONE WAY TO REMOVE SCALING IN HEAT EXCHANGERS

Аразклычев А. Т., ст. преподаватель; Аманов М. Э., ст. преподаватель,  
Туркменский государственный архитектурный строительный институт,  
г. Ашхабад, Туркменистан

A. Arazklychev, senior lecturer; M. Amanov, Senior Lecture,  
Turkmen State Architecture and Construction Institute,  
Ashgabat, Turkmenistan

*Аннотация.* В данной статье рассматривается один из способов очистки накипи в теплообменниках с помощью молочной сыворотки. При очистке теплообменных аппаратов от наростов со сложным химическим составом молочной сывороткой установлены преимущества данного метода, моющий состав удобный, экологически чистый, безопасный и не требует больших материальных затрат.

*Abstract.* This article discusses one of the ways to clean scale in heat exchangers using whey. When cleaning heat exchangers from growths with a complex chemical composition of milk whey, the advantages of this method are established, the detergent composition is convenient, environmentally friendly, safe and does not require large material costs.

*Ключевые слова:* технология, тепловая энергия, теплообменник, молочная сыворотка, накипь, электроэнергия, теплоэнергетика.

*Key words:* technology, thermal energy, heat exchanger, whey, scale, electricity, thermal power engineering.

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективное применение современных достижений науки и техники в государственном управлении, экономике и промышленности в настоящем является одним из важнейших аспектов будущего развития всего государства. Кроме того, актуальными сферами, вызывающими интерес практически всех стран, можно назвать нанотехнологии, химические технологии, исследования новых материалов, биотехнологии, молекулярная биология, сельское хозяйство, экология, информационные и коммуникационные системы, современная медицина и фармацевтические исследования, инновационная экономика, гуманитарные науки и многие другие области науки.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На сегодняшний день наиболее привлекательными выглядят новые методы повышения эффективности производства тепловой энергии объектами теплоэнергетики. Проблемы использования металла, тепла, природ-

ных ископаемых (угля, нефти, природного газа), то есть, экономного и рационального сжигания топлива, получаемого из них экономии электроэнергии, защиты окружающей среды, продления срока эксплуатации объектов теплоэнергетики являются задачами, стоящими перед специалистами в области энергетических технологий.

Внутренние стенки бойлеров, паровых котлов и труб теплообменников со временем разрушаются под воздействием солей, содержащихся в используемой воде.

Появление накипи возможно предотвратить, очищая несколькими способами воду, поступающую в теплообменники, но несмотря на эти меры, накипь все равно будет появляться.

Образующаяся в теплообменниках накипь удаляется гидромеханическим, гидродинамическим, гидрохимическим, электрогидроимпульсным и ультразвуковым методами.

Для очистки оборудования используется несколько методов. Однако с этой точки зрения одной из приоритетных задач является изобретение и разработка экологически безопасного, экономически доступного, высокоэффективного способа удаления накипи, не воздействующего на металл.

В настоящее время с целью повышения очистных мощностей и проверки эффективности очистки выбранной нами молочной сыворотки на источнике производства тепловой энергии треста «Ашгабаттепло» создана экспериментально-испытательная установка.



Рис. 1. Экспериментально-испытательная установка

Определен химический и физический состав накипи и шлаков, образовавшихся в латунных трубах 2-х скоростных водонагревателей типа ВВПЛ-150 источника производства тепловой энергии треста «Ашгабат-тепло». Также выяснилось, что трубы были сделаны из латуни, а «борта» – из стали, причем в трубах образовалась накипь толщиной более 4 мм, а на «бортах» – 1,5 мм. Был определен химический состав накипи, а полученные результаты наблюдений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав накипи в латунных трубах скоростного водонагревателя, %

H <sub>2</sub> O	Потери от перегрева	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , в общем	CaO, в общем	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Итого
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,10	42,6	0,8	0,2	1,9	52,0	1,8	0,1	0,1	0,2	99

На Ашхабадском молочном комбинате вначале была определена кислотность молочной сыворотки в пределах 68°–73° рассматриваемого нами очистителя, получаемого после образования творога из молока. В некоторых странах, в зависимости от времени года, кислотность сыворотки колеблется от 25° до 90°.

Для проверки проводимой работы эксперименты проводились двумя способами, т. е. способом термической циркуляции и практической разработки.

К очистке были подготовлены и обработаны два последовательно соединенных скоростных водонагревателей, один из которых имел 37 латунные трубы.

Впервые влияние молочной сыворотки на накипь в целом наблюдалось как при нормальной, так и при более низкой температуре.

Научные испытания проводились в скоростном водонагревателе при температуре от 35 °С до 81,5 °С, а полученные результаты испытаний представлены в табл. 2.

При проведении анализа нами было обнаружено, что повышение температуры и давления молочной сыворотки приводит к ее вспениванию.

Когда температура молочной сыворотки повысилась до 41,5 °С, то она начала пениться. Испытания проводились при температуре от 41,5 °С до 81,5 °С, а полученные результаты испытаний представлены в табл. 3



Таблица 2

Выявленные показатели очистки водного раствора молочной сыворотки при нагревании молочной сыворотки до температуры выше 35 °С (продолжительность испытания 72 часа)

Потери от перегрева	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , в общем	CaO, в общем	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
63,3	5,5	0,1	12	4,1	0,15	1,9	0,15	11	0,7	0,1



Рис. 2. Состояние экспериментально-испытательной установки и образование пены во время очистки

Таблица 3

Выявленные показатели при нагревании молочной сыворотки до температуры выше 41,5 °С, и очистка пенным раствором (продолжительность испытания 72 часа)

Потери от перегрева	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , в общем	CaO, в общем	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
64	2,8	0,2	7,75	16	0,7	2,24	0,7	3,1	0,61	1,42

По итогам исследований можно сказать, что удалось провести производственный эксперимент по способу удалению накипи с помощью пены молочной сыворотки и ее водного раствора.

В результате эффективности пены молочной сыворотки установлено, что количество накипи уменьшается равномерно, в зависимости от растворимости ее примесей.

Очистительные работы циркулярным методом периодически проводились в течение 72 часов. Затем циркуляционный насос был остановлен, а раствор выведен из системы. При сливе отработанного раствора выпадали отколотые крупные образования накипи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В теплообменниках при очистке крупных отложений накипи с помощью молочной сыворотки в качестве очистителя, ее преимущества заключаются в следующем:

1. Было обнаружено, что молочная сыворотка, используемая в качестве очищающего раствора, может быть повторно использована после фильтрации.

2. Дешевизна используемого местного сырья и простота разработанной технологии показала уместность реализации предложенного способа в производстве.

3. Доказано, что молочная сыворотка в экономическом сравнении в 4 раза дешевле кислот и других методов очистки.

4. Молочная сыворотка, служащая очищающим раствором, экологически чистая и безопасная, не требует больших вложений и рационального использования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жарков В. В., Курбанов Х. К., Оразглыджов А. Т. Способы очистки поверхностей теплообменников котельных установок от накипи // Наука и техника в Туркменистане, – А.: Академия наук Туркменистана, – № 6. 2010. – С. 24–30.

2. Оразглыджов А. Т. Способ продления срока службы теплообменников в источниках производства тепловой энергии // Краткое описание докладов международной научной конференции «Наука, техника и инновационные технологии в эпоху Великого возрождения». – А: Наука, 2011.

3. Патентный департамент Министерства экономики и развития Туркменистана. Ограниченный патент на изобретение № 504. «Способы очистки поверхностей теплообменников котельных установок от накипи». Дата регистрации в Государственном реестре: 13.02.2012 г.

4. Аразклычев А. А. Проведение научного анализа накипи образующейся в теплообменном оборудовании // Международная научно-практическая конференция «Цели устойчивого развития: молодежная политика и инновационные технологии». – А: 2023.

УДК 621.438

ХАРАКТЕРНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПИКОВО-РЕЗЕРВНЫХ  
ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ НА БАЗЕ ГТУ, ПРИНЯТЫХ К УСТАНОВКЕ  
В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ  
CHARACTERISTIC MODES OF OPERATION OF PEAK-RESERVE  
POWER SOURCES ON THE BASIS OF GTP ACCEPTED FOR  
INSTALLATION IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Богдан Е. В., аспирант; Карницкий Н. Б., д-р техн. наук., профессор,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
E. Bohdan, Graduate student; N. Karnitskiy, Doctor of technical Science,  
Professor,  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

*Аннотация.* В статье проанализированы основные режимы работы пиково-резервных энергоисточников на базе газовых турбин типа SGT-800, предназначенных для резервирования мощностей и регулирования нагрузки энергосистемы республики после ввода АЭС. Дана оценка маневренности газотурбинных установок, отмечены основные технико-экономические показатели работы.

*Abstract.* The article analyzes the main modes of operation of peak-reserve power sources based on gas turbines of the SGT-800 type, intended for reserving power and regulating the load of the energy system of the republic after the introduction of the nuclear power plant. An assessment of the maneuverability of gas turbine plants is given, the main technical economic performance indicators are noted.

*Ключевые слова:* газовая турбина, ПРЭИ, энергосистема, атомная электростанция, резерв, маневренность, пиковая нагрузка.

*Key words:* gas turbine, PRPS, power system, nuclear power plant, reserve, maneuverability, peak load.

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с интеграцией в Белорусскую энергосистему атомной электростанции мощностью 2400 МВт при отсутствии изменений уровня максимального электропотребления роль конденсационных энергоисточников в структуре баланса электрических мощностей энергосистемы в значительной мере изменится. Наличие в Белорусской энергосистеме такого источника энергии, как атомная электростанция (АЭС), предъявляет специфические требования к режиму работы энергосистемы:

– наличие в энергосистеме в любой момент времени резерва мощности, позволяющего при аварийном останове энергоблока АЭС за короткое время восстановить плановую величину генерации энергосистемы;

- в период плановых и внеплановых остановов энергоблоков АЭС должна быть обеспечена выработка электроэнергии на замещающих источниках;
- в энергосистеме должны быть реализованы специальные мероприятия по регулированию суточного графика нагрузок для обеспечения баланса электрических мощностей в часы провала электрических нагрузок.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

С вводом в эксплуатацию двух блоков АЭС возникает проблема регулирования нагрузки энергосистемы, поскольку из генерации вытесняются традиционные регуляторы мощности. Прогнозируемая структура отпуска электроэнергии приведена на рис. 1.

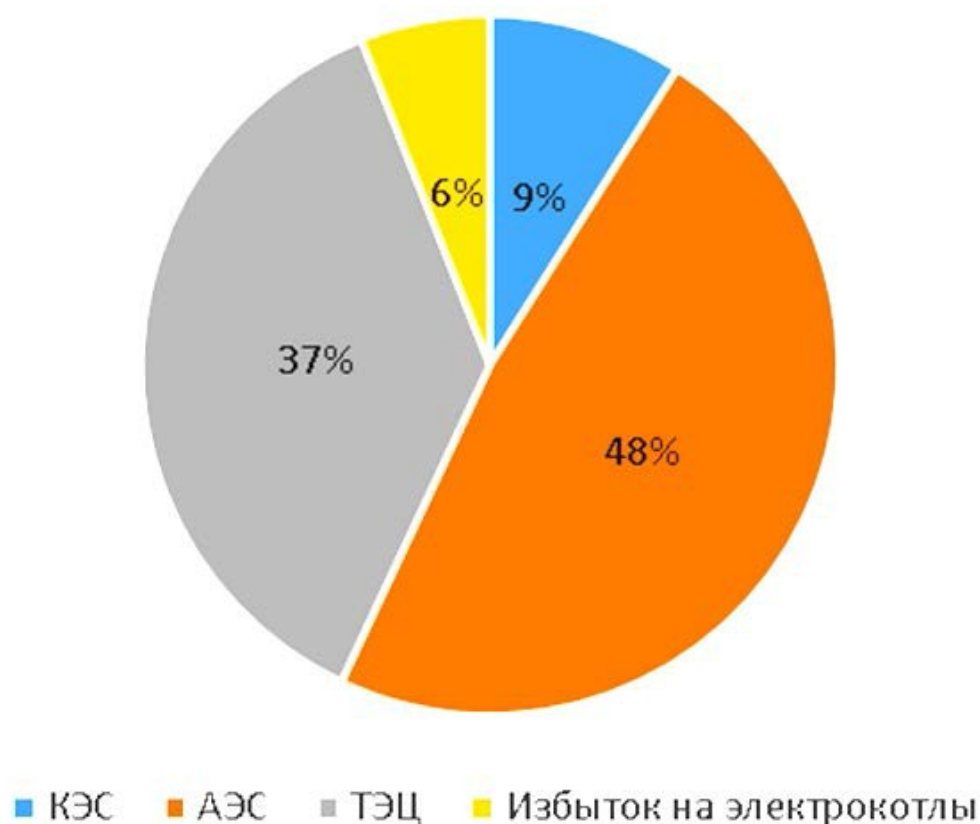


Рис. 1. Прогнозная структура отпуска электроэнергии после ввода АЭС

Пиково-резервные энергоисточники (ПРЭИ) с установленными на них высокоманевренными газовыми турбинами SGT-800 компании Siemens предназначены для резервирования мощности энергосистемы в период максимальных нагрузок и в период отключения блоков БелАЭС. Время набора номинальной нагрузки с момента пуска согласно проектным данным не превышает 15 минут с учетом времени на синхронизацию с энергосистемой. Указанные газовые турбины обладают высокой маневренностью, высоким КПД и обеспечивают низкий уровень выбросов в атмосферу.

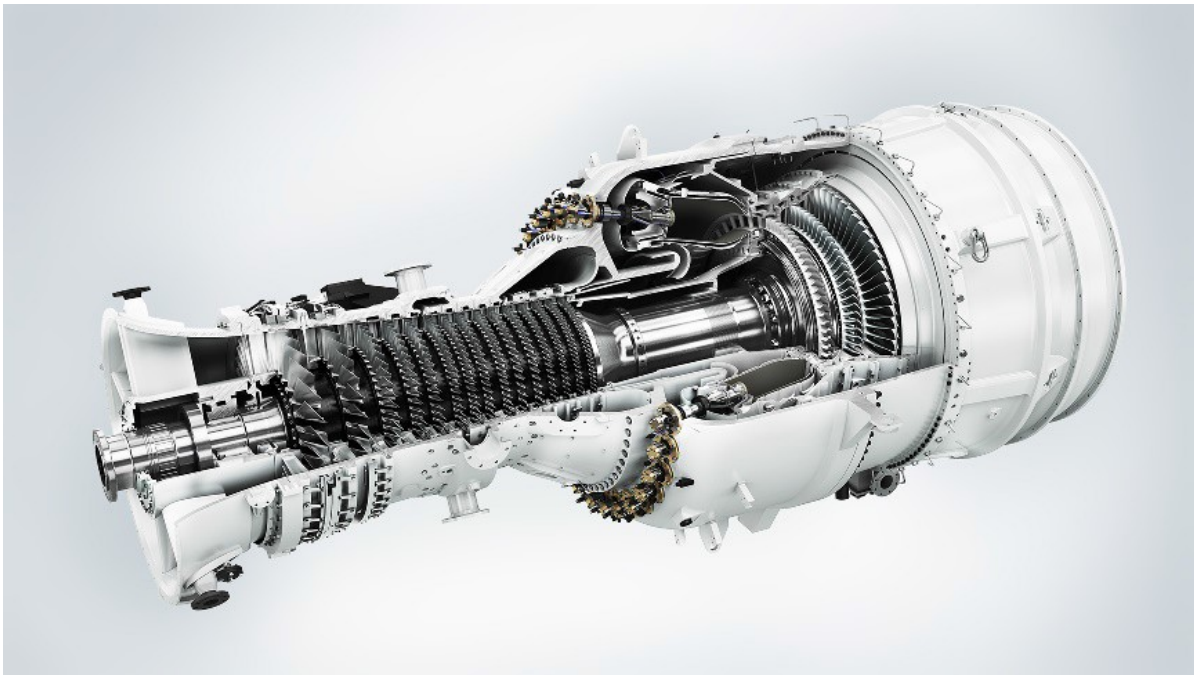


Рис. 2. Газовая турбина SGT-800, Siemens

Кроме резервирования мощности, ввиду высоких маневренных характеристик ГТУ, предусматривается функция покрытия ими пиковых нагрузок. ПРЭИ запланировано ежедневно пускать в часы максимума графика электрических нагрузок. Число часов работы в пиковом режиме за год составит около 700 часов, т. е. в среднем за день энергоисточник отработает 2 часа преимущественно для покрытия пиков суточного графика нагрузки. Наличие пиково-резервных энергоисточников позволит снизить величину небаланса электрических мощностей в часы минимальных нагрузок.

В энергосистеме республики на завершающем этапе находится реализация проектов по строительству ПРЭИ на базе ГТУ SGT-800 (табл).

Таблица

Строительство пиково-резервных энергоисточников

№ п/п	Наименование ТЭС	Установленная мощность, МВт
1	Новополоцкая ТЭЦ	100 (2 SGT-800)
2	Лукомльская ГРЭС	150 (3 SGT-800)
3	Березовская ГРЭС	250 (5 SGT-800)
4	ТЭЦ-5 РУП «Минскэнерго»	300 (6 SGT-800)

ПРЭИ на указанных площадках предусматривает использование объектов существующей электростанции, в частности, подключается к существующим системам и электрическим подстанциям. Выработанная электроэнергия будет передаваться в национальную энергосистему для покрытия пиковых нагрузок и компенсации возмущений.

Режимы работы ПРЭИ:

- покрытие ежедневных пиков в сети, 350 пусков в год, наработка 700 ч;
- аварийное резервирование;
- ограничение максимально допустимых колебаний мощности (разнятся для каждого энергоисточника);
- отпуск 100 % мощности через 15 минут после пуска (при любых условиях);
- максимальные допустимые изменения мощности, – вызванные климатическими условиями не более 5 % от номинальной мощности ПРЭИ.

Предусмотрена возможность пуска ПРЭИ из полностью обесточенного состояния. Основные режимы работы ПРЭИ:

- режим простоя;
- базовый режим (режим готовности к пуску);
- режим эксплуатации.

В состоянии режима простоя ПРЭИ полностью остановлен. Давление в системах отсутствует, системы могут быть опорожнены. Дизель генератор, предназначенный для пуска при отсутствии внешних источников энергоснабжения, остановлен. В режиме базового состояния ПРЭИ полностью подготовлен к пуску. Пуск из этого состояния возможен в автоматическом режиме. При прекращении работы, ПРЭИ автоматически возвращается в базовое состояние. В базовом состоянии основные элементы ПРЭИ готовы к пуску.

Нагрузка ПРЭИ задается с диспетчерского центра в соответствии с графиком электрической нагрузки. Нагрузка распределяется равномерно между работающими газовыми турбинами по условию обеспечения оптимальных характеристик ПРЭИ в целом. Используя регулирование частоты вращения со статической неравномерностью, ГТ поддерживают требуемую частоту сети.

КПД «брутто» энергетических установок на базе SGT-800 превышает 39 %. На рис. 3 приведен график изменения удельного расход тепла на выработку электроэнергии пиково-резервным энергоисточником, включающим шесть газовых турбин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительство пико-резервных источников суммарной мощностью 800 МВт и ввод их в эксплуатацию позволит повысить надежность резервирования выводимых на техобслуживание, перегрузку топлива и плановые ремонты энергоблоков АЭС в сочетании с другими сопутствующими мероприятиями.

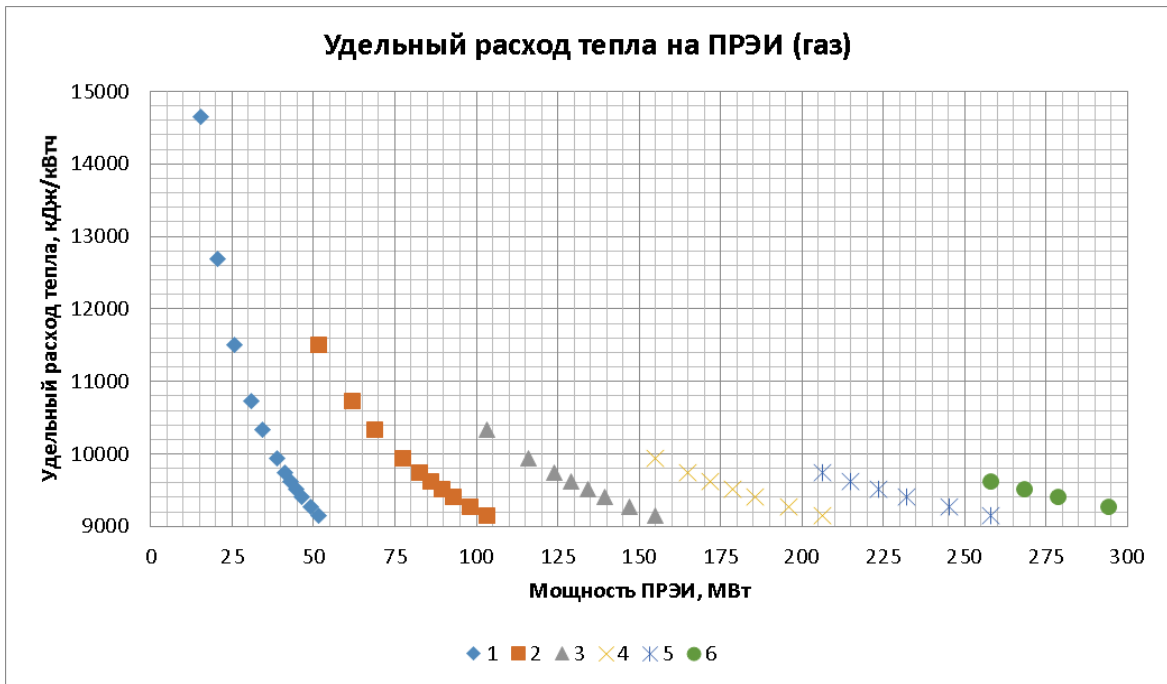


Рис. 3. Изменение удельного расхода тепла на выработку электроэнергии в зависимости от мощности

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богдан Е. В., Карницкий Н. Б. Оценка изменения межинспекционного периода парогазовых энергоблоков при работе в режимах частых пуско-остановов // ЭНЕРГОСТАРТ. Материалы IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции, 18–20 ноября 2021 г., Кемерово [Электронный ресурс]. / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2021. – С. 113-1 – 113-6.



АТОМНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ УДАЛЕННЫХ ПОСЕЛЕНИЙ  
NUCLEAR HEAT SUPPLY TO REMOTE SETTLEMENTS

Кокурина Д. А., Малыгина Д. А., Басов А. А., к-т. техн. наук, доцент;  
Семенов А. Н., ст. преподаватель,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Россия  
D. Kokurina, D. Malygina, A. Basov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; A. Semenenko, Senior Lecturer,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia

*Аннотация.* Рассмотрен вопрос радиационной безопасности АСТ. Описан принцип работы, а также процесс эксплуатации АСТ. Выявлены положительные и отрицательные стороны в использовании ядерной энергетики.

*Abstract.* The issue of AST radiation safety is considered. The principle of operation, as well as the process of operation of the AST, are described. The positive and negative sides in the use of nuclear energy are revealed.

*Ключевые слова:* атомная станция теплоснабжения, ядерное топливо, естественная циркуляция, радиация, атомная энергетика.

*Key words:* nuclear power plant, nuclear fuel, natural circulation, radiation, nuclear power engineering.

## ВВЕДЕНИЕ

Атомная энергетика является одним из наиболее перспективных и обсуждаемых видов альтернативной энергетики в мире. Атомные станции теплоснабжения – одно из наиболее инновационных направлений использования атомной энергии. Эти станции являются стабильным и надежным источником тепловой и электрической энергии для городов и промышленных предприятий.

Развитие атомного теплоснабжения закономерно для нашей северной страны, имеющей традиции централизованного теплоснабжения, и преследует следующие цели:

– экономическую – сократить использование органического топлива (поскольку расход углеводородного топлива на отопление и горячее водоснабжение достигает 30–35 % топливных ресурсов), топливо-транспортных потоков, а также получить прямой экономический эффект за счет более дешевого атомного тепла;

– экологическую – сокращение выбросов продуктов сгорания, химически вредных и канцерогенных веществ, убыли кислорода из воздуха.

В то же время, использование атомной энергии вызывает опасения и требует строгого соблюдения требований безопасности. В данной статье



мы рассмотрим основные преимущества и недостатки атомных станций теплоснабжения, их принцип работы, а также влияние на окружающую среду и меры безопасности, которые необходимо принимать при использовании такого вида энергетики.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Принцип работы и защита реактора АСТ.** Принцип работы атомной станции теплоснабжения основан на процессе ядерного деления, который происходит в специальных реакторах, а именно водо-водяных, в которых замедлителем нейтронов и теплоносителем является вода. Реакторы работают на базе ядерного топлива, которое может быть различного вида – уран, плутоний, торий и др.

В процессе работы реактора ядерное топливо подвергается делению, при этом выделяется большое количество тепловой энергии. Энергия передается теплоносителю – обычно воде – через систему охлаждения. Пар, полученный в результате нагрева воды, приводит в движение турбину, которая в свою очередь приводит в действие генератор электроэнергии. Электроэнергия поступает на трансформаторную подстанцию, где происходит ее преобразование для передачи в электрическую сеть.

Следует отметить важную особенность конструкции – естественная циркуляция теплоносителя. Циркуляция не зависит от работоспособности механизмов и подачи энергии на них. Данный фактор исключает сложные динамические режимы, связанные с отказами и пусками насосов, приводящие к перегреву активной зоны, термомеханическим нагрузкам на реакторные конструкции и твэлы. Такая особенность обеспечивает надежный теплосъем с активной зоны в условиях нормальной эксплуатации и ее охлаждение в аварийных режимах.

Использование естественной циркуляции позволило все кассеты активной зоны снабдить так называемыми тяговыми трубами, являющимися продолжением кассет. Это обеспечивает естественным образом распределение расхода воды по кассетам в соответствии с их мощностями.

Важным элементом работы атомной станции теплоснабжения является система безопасности. Реакторы оснащены множеством систем, обеспечивающих контроль за процессом деления ядерного топлива, регулирования мощности реактора, а также систему аварийного охлаждения. Эти системы должны работать надежно и эффективно, чтобы предотвратить возможные аварии и минимизировать риски для окружающей среды и жизни людей.

Так, одной из особенностей систем безопасности является внутренняя самозащищенность реактора АСТ.

В связи с тем, что в качестве замедлителя нейтронов используется вода, при повышении мощности, температуры или появлении пара количество замедлителя в зоне реакции сокращается, происходит самоглушение реактора и процесс тепловыделения прекращается. Таким образом, быст-

рое увеличение мощности или оснований для процессов типа взрыва в реакторах АСТ полностью исключено.

В реакторе АСТ отсутствуют циркуляционные насосы, а расход теплоносителя через активную зону обеспечивается за счет естественной циркуляции. Циркуляция теплоносителя и охлаждение активной зоны ни при каких условиях не прекращается. Соответственно, достигнуто новое качество внутренней самозащищенности – самоциркуляция теплоносителя в реакторе.

Новым решением в АСТ стало размещение реактора в прочном герметичном страховочном корпусе, рассчитанном на давление, устанавливаемое при разгерметизации корпуса реактора. Такую систему назвали «корпус в корпусе» Активная зона находится под уровнем воды и исключено ее плавление. Не требуется высокопроизводительной оперативной подпитки водой, исключена в течение длительного времени необходимость вмешательства персонала в ход аварии. Таким образом, реактор АСТ, имеющий второй корпус, не теряет воду при разгерметизации основного корпуса реактора.

Применение интегральной схемы реактора и размещение всей массы теплоносителя первого контура внутри корпуса реактора увеличивает суммарную теплоемкость системы и способность аккумулировать остаточное энерговыделение активной зоны при отказах в системах теплоотвода, тем самым обеспечивается значительный резерв времени для принятия мер. Интегральная компоновка оборудования, естественная циркуляция теплоносителя, низкий уровень энергонапряженности и параметров обеспечивает свойство внутренней самозащищенности реактора – самоохлаждение активной зоны.

Реактор АСТ обладает свойством самоохлаждения активной зоны в течение нескольких часов, достаточных для включения систем теплоотвода. Отвод остаточного тепла от реактора АСТ осуществляется при естественной циркуляции воды в контурах в течение нескольких суток без подвода электроэнергии и воды. Внутренняя самозащищенность обеспечивает неуязвимость реактора АСТ к ошибкам персонала, отказам и дефектам оборудования.

Таким образом в реакторе АСТ за счет оригинальных конструктивных решений значительно развиты качества внутренней самозащищенности, являющиеся основой повышенной безопасности реактора.

**Влияние на окружающую среду.** Все чаще мы слышим понятие – «экологическая катастрофа», т. е. проблемы необратимого антропогенного воздействия на окружающую среду. Концентрация углекислого газа в атмосфере сейчас на 23 % выше, нежели 150 лет назад, и она возрастает со скоростью 0,4 % в год. CO<sub>2</sub> и другие газы поглощают длинноволновую радиацию, излучаемую земной поверхностью, происходит рост температуры нижнего слоя атмосферы, – «парниковый эффект». Антропогенное воздей-

ствии на атмосферу при сжигании органического топлива вызывает все большую обеспокоенность ученых.

Острота проблемы охраны окружающей среды делает особенно актуальной задачу развития атомной энергетики. При работе атомной станции полностью исключаются выбросы в атмосферу опасных и вредных для здоровья людей химических продуктов и твердых частиц. Это объясняется свойствами уранового топлива, «горение» которого происходит без потребления атмосферного кислорода и не сопровождается какими-либо химическими реакциями. Поэтому развитие атомной энергетики есть ключ к решению не только энергетической, но и экологической проблемы, мощный фактор не только технического прогресса, но и оздоровления окружающей среды.

Конечно, в ядерной энергетике нет нерешенных проблем. Они есть, как и в любой современной высокотехнологичной отрасли. К числу наиболее важных экологических проблем относятся вопросы надежного долговременного захоронения высокорadioактивных отходов химпереработки облученного ядерного топлива. Однако, эта проблема не имеет драматичного и срочного характера. В этой области проводятся и научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки. В настоящее время существует целый ряд технологий обработки и захоронения высокоактивных отходов. Задача состоит в том, чтобы решить, какой подход из нескольких возможных следует выбрать, а также определить, когда его выбрать.

Ученые отмечают, что продолжает расти энерговооруженность общества. Энергонасыщенные и использующие опасные вещества объекты концентрируются. Во имя экономических показателей повышается их единичная мощность. Возрастает давление в основных промышленных аппаратах и транспортных коммуникациях, сеть которых становится все более разветвленной. Только в сфере энергетики ежегодно в мире добывается, транспортируется, хранится и используется около 10 миллиардов тонн условного топлива. По энергетическому эквиваленту эта масса топлива, способная гореть и взрываться, стала соизмеримой с арсеналом ядерного оружия, накопленного в мире за всю историю его существования. При этом, сдвиг структуры топливообеспечения в сторону все более широкого применения газожидкостных энергоносителей с одновременным увеличением мощности добывающих и использующих их производств заметно повысил риск взрывопожарных явлений крупного масштаба.

**Влияние на человека.** Воздействие радиация на организм человека заключается в расходовании поглощенной энергии на разрыв химических связей в клетках с образованием высокоактивных в химическом отношении соединений, так называемых свободных радикалов. Мерой радиационного облучения служит эквивалентная доза облучения. Эквивалентная доза ионизирующего излучения является основной величиной, определяющей уровень радиационной опасности при облучении человека. Человек

всегда был подвержен действию естественной радиации. Он подвергается воздействию космического излучения. Радиоактивные вещества находятся в земле, в зданиях, в которых мы живем, а также в пище и воде, которые мы потребляем. Радиоактивные газы находятся в воздухе, которым мы дышим, а наши тела сами являются радиоактивными. Уровни естественной радиации колеблются в значительных пределах в различных местах.

Помимо естественной радиации, человек подвержен действию источников излучения, которые он сам создал: рентгеновские лучи и другие виды излучения, используемые для медицинских целей, последствия осадков, выпавших при испытании ядерных зарядов и др.

Требования радиационной безопасности сводятся к тому, чтобы максимально ограничить утечку и выход радиоактивных веществ со станции. Выполнение этих требований достигается конструктивными решениями и технологическими параметрами реакторной установки и станции. Они состоят в следующем.

Реакторная установка АСТ выполнена герметичной, при ее работе отсутствует заметные технологические сдвиги среды 1 контура. Конструктивные решения по обеспечению герметичности первого контура отработаны на реакторах атомных ледоколов. Кроме того, реакторная установка размещена внутри прочного герметичного страховочного корпуса. Выброс радиоактивности из реактора установки при эксплуатации исключается. Это характеристика непрерывно контролируется различными способами. Появление продуктов деления в первом контуре в пренебрежимо малых количествах обусловлено потенциально возможной негерметичностью 1–2 твэлов из 18 000 штук. Выполнение этого требования подтверждено опытом эксплуатации АЭС и непрерывно контролируется спецсистемой контроля герметичности оболочек твэлов. Основным источником незначительного выхода активности из реактора является сброс паро-газовой среды перед перегрузкой топлива один раз в два года. Сброс осуществляется через угольные и аэрозольные фильтры и содержит инертные радиоактивные газы, в основном Хе и Кг. Воздух, охлаждающий оборудование станции слабо активизируется. Эта активность обусловлена также короткоживущим инертным газом аргоном. Указанные источники активности формируют годовое радиологическое воздействие при эксплуатации атомной станции теплоснабжения. Годовая доза облучения населения при эксплуатации АСТ составит около 0,01 мбэр за год и пренебрежимо мала по сравнению с естественным радиационным фоном, воздействующим на человека. Для обеспечения радиационной безопасности при использовании горячей воды в бытовых целях тепло от реактора в тепловую сеть передается посредством промежуточного водяного контура. Вода контура активного теплоносителя отделена от воды промежуточного контура, а вода промежуточного контура – от сетевого контура герметичными теплообменными поверхностями. В случае возникновения малейшей утечки теплообменники отсекаются от основного контура. Кроме того, для исключения утечки активности в сетевой контур в нем поддерживается более высокое давление воды, чем в промежу-

точным контуре. С той же целью в промежуточном контуре поддерживается активность теплоносителя на минимальном уровне: она не должна в процессе эксплуатации превышать более чем в 10 раз допустимую активность воды в открытых водоемах. Это позволяет обеспечить принятыми конструктивными мерами активность воды в сетевом контуре не больше, чем в воде открытых водоемов и других источниках водоснабжения.

Допустимые уровни активности теплоносителя и герметичность оборудования технологических контуров непрерывно контролируются автоматической системой радиационного технологического контроля. В случае превышения установленных пределов активности негерметичное оборудование или реакторная установка в целом выводятся из действия. Горячее водоснабжение производится по четырехконтурной схеме.

Попадание радиоактивности потребителю полностью исключено.

**Энергетика.** Подавляющая часть ресурсов органического топлива и сырья в России размещена в районах Западной и Восточной Сибири с суровыми условиями, в то же время около 80 % потребляемого топлива приходится на европейскую часть.

В наших географических условиях около четверти всей запасенной в транспортируемом газе энергии тратится на его перекачку по газопроводам, причем, в среднем протяженность газопровода к потребителю превышает 2400 км. Еще сложнее выглядит транспортировка угля. Поток топлива на единицу производимой электроэнергии в угольном топливном цикле превышает поток топлива в ядерном топливном цикле в десятки тысяч раз.

Наши запасы нефти и газа все еще велики, однако и они отнюдь не неисчерпаемы. Кроме того, нефть и газ – ценнейшее сырье, значение которого для общества будет постоянно возрастать, поэтому сжигать его в топках электростанций вряд ли целесообразно.

Единой панацее нет, это знали еще древние. Крайне важно энергосбережение, нужен газ, особенно для бытовых целей, для вытеснения угля и мазута в городах. Необходимо использование нетрадиционных возобновляемых источников для энергообеспечения местного значения. Но совершенно необходима атомная энергетика.

Сейчас определенно можно утверждать, что атомная энергетика в состоянии обеспечить народное хозяйство всеми видами энергоносителей: электроэнергия (АЭС), низкопотенциальное тепло (АСТ, АТЭЦ), высокотемпературное тепло на высокотемпературных гелиевых реакторах; производство водорода для транспорта (ВТГР), бридинг (воспроизводство ядерного топлива в реакторах на быстрых нейтронах). То есть образуется замкнутая система энергообеспечения общества, полностью обеспеченная ресурсами на тысячелетия.

Несколько слов об экологических достоинствах атомной станции теплоснабжения. АСТ позволит уменьшить вредные для здоровья людей выбросы в атмосферу города: сернистого газа (на 20–30 тыс. тонн в год); окислов азота (на 7–9 тыс. тонн в год). Одновременно с этим в ат-

мосфере будет сохраняться около полутора миллиардов кубометров кислорода ежегодно.

АСТ имеет высокую тепловую экономичность – практически все выделившееся из топлива тепло направляется в сеть без сбросов тепла в водоемы и атмосферу. В связи с отсутствием на АСТ турбин водопотребление практически отсутствует. АСТ позволит высвободить около миллиона тонн условного топлива в виде газа. Этот газ может «вытеснить» 1,1 млн. тонн угля, а, например, в Нижегородской области сжигается 3 млн. тонн экологически вредного угля.

Реактор АСТ экологически очень благоприятен. И следует объективно рассмотреть ежедневные и ежегодные последствия воздействия «привычных» вредных выбросов энергетических и промышленных объектов и сопоставить риск от АСТ и городской «органической» энергетики «без повязки на глазах».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Атомная станция теплоснабжения с экологической социальной точек зрения – это наиболее предпочтительный, исторически неизбежный источник бытового теплоснабжения.

В АСТ инженеры и ученые вложили огромный потенциал знаний и технологического опыта. Энергетические водо-водяные реакторы имеют «стаж» свыше 5000 реактор-лет. Сотни реакторов ядерных двигателей подводных лодок у нас в стране, несомненно, также обогатили этот технологический и научный опыт.

Методология системных исследований безопасности, принятая сегодня в мире к сложным промышленным системам (энергетика, химия и т. д.) применена на АСТ в полном объеме. Использован и детерминистский подход постулированных аварий («все может быть»), и системные вероятностные оценки безопасности с исследованием сотен последовательностей аварийных событий, инициированных внутренними отказами, внешними событиями и ошибочными действиями (или бездействиями) персонала.

Все это дает основание утверждать, что АСТ имеет гарантированную безопасность. Да, аварии могут быть, хотя многое сделано чтобы вероятность была незначительна. Но главное, что радиологические последствия любой самой тяжелой аварии ограничены фоновыми значениями. Эти последствия и соответствующий риск много меньше аварийных последствий других видов промышленной деятельности.

В реакторе АСТ решены именно, те задачи, которые поставил Чернобыль перед ядерной энергетикой мира.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлов О. Б. Что такое атомная станция теплоснабжения / О. Б. Самойлов, В. С. Кууль, Б. А. Авербах и др; Под ред. О. Б. Самойлова, В. С. Кууля. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 96 с.: ил.

РАДИАЦИЯ И ПИЩА ЧЕЛОВЕКА  
RADIOACTIVITY AND HUMAN DIET

Малыгина Д. А., Кокурина Д. А., Семененко А. Н., ст. преподаватель;  
Басов А. А., к-т. техн. наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия  
D. Malygina, D. Kokurina, A. Semenenko, Senior Lecturer; A. Basov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia

*Аннотация.* Радиация является одним из самых волнующих людей факторов окружающей среды и источников искусственного происхождения. Также она способна загрязнять пищевые продукты. В данной работе рассмотрены пути поступления радиации в пищу, способы ее выведения и контроля за содержанием в пище.

*Abstract.* Radiation is one of the most exciting environmental factors and sources of artificial origin for people. It is also capable of contaminating food products. In this work, the ways of radiation ingestion into food, methods of its excretion and control of the content in food are considered.

*Ключевые слова:* радиация, радиоактивные изотопы, окружающая среда, цезий, стронций, йод, пищевые цепи, контроль заражения, радиоактивное заражение.

*Key words:* radiation, radioactive isotopes, environment, cesium, strontium, iodine, food chains, contamination control, radioactive contamination.

## ВВЕДЕНИЕ

Радиация является одним из самых важных факторов, влияющих на здоровье человека. Ежедневно мы подвергаемся естественной радиации, которая происходит от космических лучей, а также от геологических и биологических источников. Тем не менее, люди также могут быть подвергнуты радиации от источников искусственного происхождения, таких как медицинские процедуры, промышленные и ядерные аварии. Самым волнующим аспектом рассматриваемой проблемы является загрязнение пищевых продуктов радиоактивными веществами.

Основной интерес и цель рассмотрения влияния радиации на пищу представляет вопрос оценки вероятности получения дозы облучения радиоактивными веществами через пищу и выявление конкретных веществ, которые могут послужить причиной заболеваний.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Какие же именно вещества могут заразить пищу человека? Это радиоактивные изотопы элементов. Изотопы – это разновидности атомов химических элементов, имеющие одинаковый атомный номер, но разные массовые числа. Изотопы могут быть стабильными, то есть устойчивыми, и нестабильными, то есть радиоактивными, способными испытывать радиоактивный распад и ионизировать вещество. У любого химического элемента существуют изотопы. Это можно пронаблюдать по таблице химических элементов Д. И. Менделеева. Массовые числа всех элементов не целые. Это объясняется тем, что они рассчитываются с учетом масс всех изотопов и их распределения в природе. Как было указано выше, не все изотопы элементов являются радиоактивными. Однако те из них, которые все же являются нестабильными, могут нести опасность человеческому организму. Пути их поступления из внешней среды в пищевые рационы, очевидно, такие же, как и для всего элемента. Поэтому является целесообразным рассматривать цепи передвижения отдельных химических элементов без разделения на изотопы.

В зависимости от физических и химических свойств радиоактивных веществ и места их поступления в окружающую среду содержание их в продуктах питания может меняться в сотни и тысячи раз. Нуклиды, легко поступающие в пищевые продукты, обладают способностью свободно передвигаться в биологических системах. Эти процессы описываются как перенос через пищевые цепи. Соответственно, знание физиологии питания растений и животных является необходимой основой для изучения пищевых цепей. Это, в частности, подтверждается тем, что основные радиоактивные вещества являются обычно сходными для элементов, играющих важную роль в обмене веществ или тесно связанных с ним. Рассмотрим на примере стронция. В периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева стронций находится во 2 группе. Также в этой группе находится и кальций, важный составной элемент человеческой кости. Элементы в рамках одной группы объединены схожими свойствами. Поэтому вместо кальция наш организм иногда может поглощать сходный ему радиоактивный стронций.

Наиболее опасными для организма человека элементами искусственного происхождения являются цезий-137, стронций-90, йод-131.

Обнаружить радиоактивный йод во внешней среде можно только в местах ядерных испытаний и аварий на предприятиях атомной отрасли. Наибольший ущерб йод-131 может нанести щитовидной железе. Масса ее мала относительно организма человека в целом, всего около 12–25 грамм, поэтому даже небольшое количество радиоактивного йода может послужить причиной локального облучения.

Длительное воздействие стронция-90 способно поражать костную ткань и костный мозг, что приводит к развитию лучевой болезни, опухоли кости и кроветворной ткани.



Выброс цезия-137 во внешнюю среду также происходит в основном в результате ядерных испытаний и аварий на предприятиях атомной энергетики. Но также он содержится в радиоактивных выпадениях, отходах, сбросах заводов, перерабатывающих отходы атомных электростанций. Хотя кожа человека служит хорошей защитой от цезия-137, он проникает внутрь организма через продукты питания. Основная его часть накапливается в мышцах и небольшая в костях и других тканях.

Из информации, представленной выше, легко понять, что радиоактивные изотопы, представляющую наибольшую опасность организму человека, не содержатся в окружающей среде в свободном виде, а встречаются лишь в случаях аварий на предприятиях атомной отрасли и применения ядерного оружия. Поэтому вероятность получить отравление радиоактивными веществами при отсутствии перечисленных факторов крайне мала.

В первые годы развития атомной промышленности и энергетики сведения как о возможном составе радиоактивных нуклидов, которые могли быть выведены во внешнюю среду, так и о процессах, контролируемых их переход в пищевые продукты, были очень ограничены. В этих условиях масштаб и важность радиоактивного загрязнения пищевых рационов могли быть достаточны только точно определены лишь на основании сбора и анализа проб пищевых продуктов. Если учесть, что до сих пор сбор и анализ пищевых продуктов требовал затраты большого труда, а также принять во внимание необходимость проводить обследования вокруг ядерных установок, число которых растет, то становится очевидной важность рассмотрения вопроса, каким образом можно добиться оптимального сочетания точности обследования и количества затрачиваемого труда.

Обследования и контроль за содержанием в пище человека радиоактивных веществ принято разделять на несколько наиболее распространенных и результативных типов. Среди них есть регулярно проводимые обследования во внешней среде вблизи ядерных реакторов с основной целью проверки обеспечения такого режима ее работы, который не привел бы к облучению населения, проживающего в окрестностях этой установки; экстренные обследования во внешней среде вблизи ядерных реакторов в аварийных ситуациях, так как если при аварии происходит значительное загрязнение внешней среды, проведения одних лишь регулярных обследований становится недостаточно и возникает необходимость осуществления экстренных обследований; обследование загрязнения пищевых продуктов при глобальных радиоактивных выпадениях, основная задача которого состоит в определении средних уровней загрязнения пищевых продуктов; локальные обследования загрязнения пищевых продуктов радиоактивными выпадениями, основная задача которого состоит в определении тех территорий, где плотность выпадений достигает максимальных значений; сбор информации о механизмах переноса по пищевым цепям, позволяющий установить количественные зависимости между уровнями загрязнения пищевых продуктов и интенсивностью выпадений и отложений радиоак-

тивных веществ. Комплексное применение методов позволяет обеспечить безопасность населения и внешней среды.

Однако мало знать способы обнаружения и воздействие радиоактивных веществ на организм. Важно также понимать, как избежать их попадания в организм посредством пищи.

Наиболее часто в списке продуктов, подверженных заражению, значится молоко и свежее мясо. Для снижения этого фактора можно замачивать мясо в подсоленной воде, а затем варить. Для молока же подходит его переработка. Например, после процедуры сепарирования около 90 % радионуклидов остается в сыворотке.

Уменьшить радиоактивное загрязнение овощей, грибов и фруктов помогает снятие кожуры, промывание и замачивание в воде. Это связано со скоплением радиоактивного вещества на внешней поверхности продукта.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Также следует обратить внимание, что из-за сходности свойств радиоактивных изотопов некоторых элементов с минеральными веществами, представляющими ценность для человеческого организма, как было отмечено, наиболее простым способом защиты от их поглощения являются профилактические меры в виде курсов принятия витаминно-минеральных комплексов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Радиоактивность и пища человека / Под ред. Р. Расселла; Пер. с англ. Р. М. Алексахина и Ф. А. Тихомирова; Под ред. В. М. Клечковского. – М.: Атомиздат, 1971. – 373 с.

ВОЗДУХОАККУМУЛИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НЕБОЛЬШОЙ  
МОЩНОСТИ НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК  
SMALL CAPACITY AIR STORAGE POWER PLANTS  
BASED ON GAS TURBINE UNITS

Качан С. А., к-т. техн. наук, доцент,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
S. Kachan, Candidate of technical Sciences, Associate Professor,  
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Рассмотрены воздухоаккумулирующие электростанции небольшой мощности, созданные на базе газотурбинной установки Mercury мощностью 4,6 МВт с регенерацией тепла и искусственного резервуара-хранилища сжатого воздуха. С учетом безопасности эксплуатации максимально достижимо увеличение мощности газовой турбины за счет ввода сжатого воздуха примерно на 30 % (около 1,46 МВт). Применение воздушной турбины высокого давления позволяет увеличить производство электроэнергии примерно на 0,3 МВт. Эффективность хранения энергии сжатого воздуха достаточно высока и увеличивается за счет сокращения продолжительности периода разгрузки.

*Abstract.* Small capacity air-storage power plants based on a Mercury 4,6 MW gas turbine with heat recovery and an artificial compressed air storage tank are considered. Taking into account the safety of operation, the maximum increase of the power due to input of compressed air is by approximately 30 % (about 1,46 MW). Using of a high-pressure air turbine may increase the electricity output by approximately 0,3 MW. The efficiency of compressed air storage energy is quite high and increases by reducing the duration of the unloading period.

*Ключевые слова:* воздухоаккумулирующие электростанции, газотурбинная установка, резервуар-накопитель, повышение мощности.

*Key words:* air storage power plants, gas turbine units, storage tank, peak power.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ужесточаются требования к маневренности основного оборудования энергосистем. В мировой энергетике это связано с интенсивным внедрением возобновляемых источников энергии, характеризующихся непостоянством и непредсказуемостью генерации; в Беларуси, после ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС, – с большой долей базовых энергоисточников.

Небаланс между выработкой и потреблением электроэнергии в настоящее время устраняется за счет разворачивания имеющегося в сети

вращающегося резерва и ввода в действие генераторов с быстрым временем запуска.

Значительные преимущества могут быть достигнуты за счет внедрения систем накопления энергии.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Среди доступных в настоящее время решений интересным вариантом является хранение энергии сжатого воздуха в воздухоаккумулирующих электростанциях (ВАЭС). Системы ВАЭС работают по циклу Брайтона, в котором процессы сжатия и расширения не происходят одновременно, как в газотурбинной установке (ГТУ), а разъединены и сдвинуты во времени. В непиковые периоды работы энергосистемы электроэнергия забирается из сети для сжатия воздуха, который затем хранится в резервуаре-накопителе соответствующих размеров. В периоды пиковой нагрузки хранящийся воздух нагревается и расширяется в турбине для производства электроэнергии.

Крупногабаритные ВАЭС (например действующие установки Hunt-dorf, Эльсфлет в Нижней Саксонии, Германия и McIntosh в Алабаме, США мощностью 290 МВт и 110 МВт соответственно) требуют подземных хранилищ сжатого воздуха (в соляных, пористых и скальных кавернах), что ограничивает размещение станций участками с подходящими геологическими характеристиками.

Установки малого и среднего размера могут быть созданы с использованием искусственных надземных резервуаров, объединяя систему сжатия и хранения воздуха с типовой ГТУ.

В [1] рассматриваются малогабаритные ВАЭС на базе ГТУ Mercury компании Solar, США мощностью 4,6 МВт с газовой регенерацией теплоты (табл. 1) [2].

Таблица 1  
Технические характеристики ГТУ Mercury (условия ISO\*) [2]

№ п/п	Показатель, размерность	Значение
1	Электрическая мощность, МВт	4,6
2	Удельный расход теплоты, кДж/(кВт*ч)	9350
3	КПД, %	38,5
4	Расход воздуха через компрессор, кг/с	17,45
5	Расход выхлопных газов, кг/с	17,7
6	Температура выхлопных газов, °С	365

\* температура наружного воздуха +15 °С, атмосферное давление 101,3 кПа, относительная влажность 60 %.

Выбор ГТУ Mercury обусловлен двумя основными причинами:

– высоким КПД для установок такого класса мощности;

– усовершенствованной конструкцией 10-ступенчатого компрессора, которая обеспечивает относительно высокий запас по помпажу в широком рабочем диапазоне.

В [1] рассматриваются два технических решения:

- ВАЭС с вводом сжатого воздуха из резервуара-накопителя (ВАЭС ВВ);
- ВАЭС с вводом сжатого воздуха из резервуара-накопителя и турбинной надстройкой высокого давления (ВАЭС ВВТ).

В ВАЭС ВВ (рис. 1) [1] сжатый воздух (находящийся в резервуаре-накопителе под давлением 40 бар) дросселируется и смешивается с потоком воздуха, выходящим из компрессора ГТУ. Полученный поток предварительно подогревается в регенеративном подогревателе отработавшими газами и подается в камеру сгорания ГТУ.

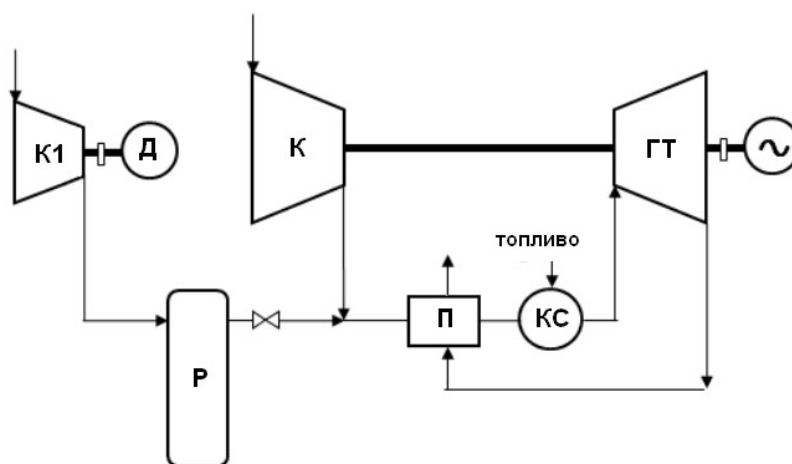


Рис. 1. Схема ВАЭС ВВ:

К1 – компрессор ВАЭС; К – компрессор ГТУ; ГТ – газовая турбина; КС – камера сгорания; П – регенеративный подогреватель; Р – резервуар-накопитель; Д – двигатель

Производительность установки может быть повышена за счет нагрева и расширения хранящегося сжатого воздуха в воздушной турбине высокого давления перед его добавлением в цикл ГТУ.

Так, в ВАЭС ВВТ (рис. 2) [1] сжатый воздух (находящийся в резервуаре-накопителе под давлением 80 бар) предварительно нагревается, расширяется в турбине высокого давления и, наконец, вводится в поток после компрессора ГТУ.

Предполагается, что турбина высокого давления работает при фиксированном давлении на входе, снижая давление потока воздуха, выходящего из резервуара-накопителя, до 50 бар.

По условиям достаточного запаса по помпажу максимальная величина впрыска сжатого воздуха для ГТУ Mercury была оценена на уровне 2,5 кг/с, то есть примерно 15 %, что обеспечивает прирост мощности примерно на 30 % (табл. 2) [1].

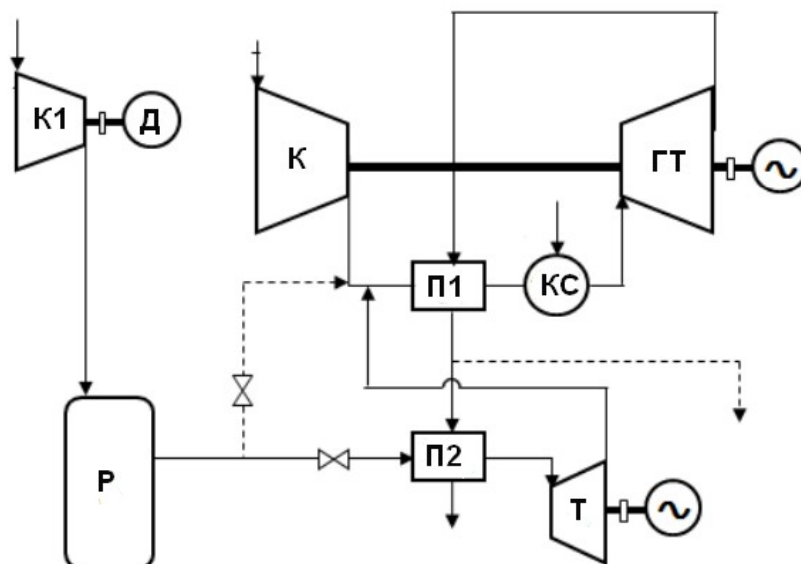


Рис. 2. Схема ВАЭС ВВТ:

К1 – компрессор ВАЭС; К – компрессор ГТУ; ГТ – газовая турбина ГТУ; КС – камера сгорания; Т – турбина высокого давления; П1, П2 – регенеративные подогреватели; Р – резервуар-накопитель; Д – двигатель

Таблица 2

Производительность ГТУ при изменении величины впрыска сжатого воздуха (условия ISO)

№ п/п	Показатель, размерность	Значение		
1	Величина впрыска сжатого воздуха, кг/с	–	2,0	2,5
2	Величина впрыска сжатого воздуха, %	–	10	15
3	Степень повышения давления в компрессоре	9,90	11,15	11,43
4	Мощность на клеммах генератора, МВт	4,60	5,80	6,06
5	Увеличение мощности, %	–	26,1	31,7
6	Массовый расход топлива, кг/с	0,249	0,289	0,299
7	КПД, %	38,5	41,8	42,6
8	Продолжительность периода разряда, мин.	–	83	67

Повышение мощности и КПД ГТУ связано во-первых с увеличением массового расхода газов, поступающих в турбину и, во-вторых, с более высокой удельной работой газов за счет большего перепада давления.

Применение в схеме ВАЭС ВВТ турбины высокого давления позволяет увеличить производство электроэнергии примерно на 300 кВт (на 6,5 %) [1].

Как показано в табл. 2, при повышении пиковой мощности за счет увеличения впрыскиваемого воздуха закономерно сокращается продолжительность разрядного периода.

В технико-экономических расчетах ВАЭС [3] исходили из минимального периода разрядки около одного часа и максимального массового расхода впрыскиваемого воздуха из резервуара-накопителя 2,5 кг/с или около 9000 кг/ч.

Оптимальные давление хранения и объем резервуара-накопителя выбраны на уровне 4000 кПа = 40 бар и 325 м<sup>3</sup>. Принята система хранения воздуха, состоящая из секций стальных труб большого диаметра (около 760 мм) длиной 12 м, соединенных коллекторами [3].

Система повышения давления воздуха выбрана, исходя из продолжительности периода зарядки 5–6 часов, в составе охлаждаемого поршневого компрессора.

Удельные инвестиционные затраты на систему хранения сжатого воздуха оцениваются примерно в 50 \$/(кВт·ч) запасенной энергии [1].

Во время фазы разрядки ВАЭС может работать очень гибко, регулируя массовый расход хранимого воздуха в соответствии с требуемым графиком производства электроэнергии. При этом сокращение длительности периодов разрядки приводит к более высоким показателям дополнительной выработки электроэнергии и эффективности хранения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные схемы ВАЭС характеризуются относительно низкими инвестиционными затратами, хорошей эффективностью хранения, высоким уровнем готовности и надежности, а также быстрым реагированием на запросы энергосистемы о изменении нагрузки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Salvini, C. Performance Analysis of Small Size Compressed Air Energy Storage Systems for Power Augmentation: Air Injection and Air Injection / Expander Schemes [Electronic resource] / Heat Transfer Engineering. – Volume 39. – 2018. – Issue 3. – Mode of access: <http://dx.doi.org/10.1080/01457632.2017.1295746>. – Date of access: 12.04.2023.
2. Mercury 50 / Solar Turbines [Electronic resource]. – Mode of access: [https://www.solarturbines.com/en\\_US/products/power-generation-packages/mercury-50.html](https://www.solarturbines.com/en_US/products/power-generation-packages/mercury-50.html). – Date of access: 12.04.2023.
3. Salvini, C. Techno-Economic Analysis of Small Size Second Generation CAES System / 70th Conference of the ATI Engineering Association. – December. – 2015. [Electronic resource]. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/289992049\\_Techno-Economic\\_Analysis\\_of\\_Small\\_Size\\_Second\\_Generation\\_CAES\\_System](https://www.researchgate.net/publication/289992049_Techno-Economic_Analysis_of_Small_Size_Second_Generation_CAES_System). – Date of access: 12.04.2023.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ МИНИЭНЕРГОУСТАНОВОК  
НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ  
ACCOUNTING FOR THE IMPACT OF MINI-POWER PLANTS  
ON THE ENVIRONMENT

Короткевич М. А., д-р техн. наук, профессор;  
Старжинский А. Л., к-т техн. наук, доцент

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
M. Korotkevich, Doctor of technical Sciences, Professor;  
A. Starzhinsky, Candidate of technical Sciences, Associate Professor,  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Определено количество твердых частиц золы, оксидов серы, оксидов азота, оксидов углерода и углекислого газа, выбрасываемых в атмосферу вместе с дымовыми газами при сжигании твердого топлива, а также произведена экономическая оценка ущерба, причиняемая годовыми выбросами загрязнений в атмосферный воздух при работе миниэнергоустановки.

*Abstract.* The amount of solid particles of ash, sulfur oxides, nitrogen oxides, carbon oxides and carbon dioxide emitted into the atmosphere together with flue gases during the combustion of solid fuels was determined, and an economic assessment was made of the damage caused by annual emissions of pollution into the atmospheric air during the operation of a mini-power plant.

*Ключевые слова:* миниэнергоустановка, местные виды топлива.  
*Key words:* mini power plant, local fuels.

## ВВЕДЕНИЕ

Включение в электрическую сеть миниэлектростанций приводит к изменению надежности сети, необходимости сохранения статической и динамической устойчивости электростанции и учета влияния миниэнергоустановок на окружающую среду.

Нами в порядке оценки влияния малой генерации на окружающую среду первоначально определяются объемы вредных выбросов в окружающий воздух (совместно с дымовыми газами: золы, оксидов серы, азота и углерода, а также углекислого газа), при сжигании твердого топлива на миниэнергоустановках. При этом интересно знать соотношение между удельными (приходящимся на 1 МВт мощности) объемами вредных веществ, испускаемых миниэнергоустановками и мощными электростанциями энергосистем. Выбрасываемые в атмосферу вредные вещества имеют различную токсичность. Поэтому суммирование объемов этих веществ для получения эквивалентного значения должно производиться с учетом их относительной агрессивности. Предстоит выяснить также соотношение между объемом израсходованного на



электростанции топлива и объемом выброшенного в воздух оксида углерода и углекислого газа.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Оценим значения вредных выбросов (оксидов азота, сернистого ангидрида, золы, оксида углерода и углекислого газа) в атмосферу при сжигании топлива (древесной щепы и торфа) на электростанциях малой мощности [1].

Известно [2], что в структуре топлива электростанций Республики Беларусь 80 % занимает природный газ, далее идут сернистый мазут и попутный газ. Ежегодно на электростанциях сжигается  $12 \cdot 10^6$  тонн условного топлива и ежегодно выбросы составляют: оксидов азота ( $NO$  и  $NO_2$  или  $NO_x$ ) –  $(30 - 32) \cdot 10^3$ , тонн, окислов серы ( $SO_2$ ) –  $60 \cdot 10^3$  тонн, золы –  $6 \cdot 10^3$  тонн; оксида углерода ( $CO$  – угарный газ) –  $5 \cdot 10^3$  тонн, т. е. объем выбросов составляет 0,86 % от всего сожженного топлива.

Критерии экологического воздействия энергетического объекта на окружающую среду должны учитывать факторы термодинамические (коэффициент полезного действия установки (КПД)), топливные (качество топлива) и технологические (особенности конструкции топочных устройств) [2].

К наиболее важному показателю, определяемому термодинамическим циклом, относится тепловое загрязнение окружающей среды, значение которого в относительных единицах приближенно может быть определено как

$$\Pi_{T^*} = \frac{1}{\eta} - 1, \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия установки; равен 0,39; 0,44; 0,35; 0,7 [2] соответственно для паротурбинных, парогазовых, газотурбинных установок, теплоэлектроцентралей (ТЭЦ).

Значение  $\Pi_{T^*}$  определенное по данной формуле, равно 1,56; 1,27, 1,85 и 0,43; соответственно для паротурбинных, парогазовых, газотурбинных установок и ТЭЦ.

Чем меньше КПД, тем больше уровень теплового загрязнения окружающей среды. Так, загрязнение окружающей среды при работе газотурбинных установок примерно в 1,2 раза большее, чем при работе паротурбинных установок одинаковой мощности.

Основные характеристики местного топлива; подлежащего сжиганию в котельных установках мини-электростанций: торф – влажность до 50 %; теплота сгорания –  $2560 \text{ ккал / кг} = 10,726 \cdot 10^6 \text{ Дж / кг}$ ; зольность на сухую массу 1 % [2], например, в угле (0,2–5 %) [2]; щепа древесная влажность до 45–57 %; теплота сгорания –  $2400 \text{ ккал / кг} = 10,056 \cdot 10^6 \text{ Дж / кг}$ ; зольность на сухую массу 1 %.

В качестве основных загрязнителей воздушного бассейна основное место занимают оксиды азота, они составляют 6–8 % общего выброса всех загрязнителей, уступая лишь выбросу угарного газа, сернистого ангидрида и твердых частиц. Суммарное количество оксидов азота ( $NO + NO_2 = NO_x$ ), выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами при сжигании твердого или жидкого топлива определяется как [2].

$$M_{NO_x} = 10^{-3} \cdot k \cdot B \cdot \left(1 - \frac{Q_4}{100}\right) \cdot (1 - \varepsilon_1 \cdot r) \cdot (1 - \eta_{a3}), \text{ т / год}, \quad (2)$$

где  $k = D / 20$  – коэффициент, характеризующий выход окислов азота, кг/т.у.т.;

$D$  – паропроизводительность котла, т/ч;

$B$  – расход условного топлива за рассматриваемый период, т.у.т/год;

$Q_4$  – потеря теплоты от механической неполноты сгорания топлива; можно принять равным 4 % [2];

$\varepsilon_1$  – коэффициент, характеризующий эффективность воздействия рециркулирующих газов на снижение содержания оксидов азота; можно принять равным при сжигании твердого топлива 0,005 [2];

$r$  – степень рециркуляции дымовых газов; равна не менее 0,3 [2];

$\eta_{a3}$  – доля оксидов азота, улавливаемых в азотоочистительной установке, можно принять равной 0,85 [2].

Формула (2) составлена при условии одинаковой длительности работы азотоочистительной установки и котла, а также при твердом шлакоудалении, одноступенчатом сжигании топлива, без учета влияния качества топлива на выход оксидов азота.

При паропроизводительности котла 21,7 т/ч (Пружанская ТЭЦ мощностью 3,7 МВт), значение  $k$  равно 1,085 кг/т.у.т.; расход условного топлива  $13 \cdot 10^3$  тонн за год: в том числе  $7,8 \cdot 10^3$  тонн древесной щепы и  $5,2 \cdot 10^3$  тонн торфа [1].

Значение  $M_{NO_x}$  определенное по формуле (2) и приведенным выше данным, равно 2,07 т/год (0,015 % от всего сожженного топлива или 559,4 кг/МВт).

Одним из наиболее агрессивных и трудно поддающихся очистке загрязнителей атмосферного воздуха, выбрасываемых главным образом энергетическими установками, являются оксиды серы  $SO_2$ . Количество оксидов серы  $SO_2$ , выбрасываемое в атмосферу с дымовыми газами при сжигании фрезерного торфа вычисляют по формуле [2]:

$$M_{SO_2} = 0,02 \cdot B_H \cdot S^P \cdot (1 - \eta_{SO_2}) \cdot (1 - \eta_{SO_2}^c), \text{ т / год}, \quad (3)$$

где  $B_H$  – расход натурального топлива за год, т/год;

$S^P$  – содержание серы в топливе: равно 0,2 % для торфа [2];

$\eta_{SO_2}$  – доля оксидов серы, связываемых летучей золой в котле: равна 0,15 для торфа [2];

$\eta_{SO_2}$  – доля оксидов серы, улавливаемых в сероочистительных установках; примем равной 0,85.

Значение  $M_{SO_2}$  для мини-ТЭЦ мощностью 3,7 МВт, сжигающей за год фрезерного торфа в объеме  $18,7 \cdot 10^3$  тонн, вычисленное по формуле (3), при отмеченных значениях  $S^P$ ,  $\eta_{SO_2}$ ,  $\eta_{SO_2}^c$  равно 9,5 т/год. Заметим, что формула (3) составлена при условии одинаковой длительности работы сероочистительной установки и котла и использовании сухих золоуловителей.

Основными промышленными источниками выброса в атмосферу твердых частиц являются электростанции. Количество твердых частиц летучей золы и несгоревшего топлива, выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами, может быть определено по формуле:

$$M_{TB} = 0,01 \cdot B_H \cdot (a_{yH} \cdot A^P + q_4 \cdot \frac{Q_H^P}{32680}) \cdot (1 - \eta_3), \text{ т / год}, \quad (4)$$

где  $a_{yH}$  – доля золы в уносе; можно принять при сжигании древесных отходов равным 0,85; торфа 0,7 [2];

$A^P$  – зольность рабочего топлива, дров – 1 %; торфа – 12,5 % [2];

$Q_H^P$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

32680 кДж/кг – теплота сгорания углерода;

$\eta_3 = (0,8 \dots 0,995)$  коэффициент полезного действия золоулавливания [2].

При принятых исходных данных  $M_{TB}$ , определенное по формуле (4) будет равно 6,24 т/год. Здесь принято, что доля золы в уносе при сжигании древесного топлива равна 0,85; торфа – 0,7; зольность дров 1 %; торфа 12,5 %.

При экспертном сравнении между собой энергетических установок, та имеет большее преимущество, у которой меньшее суммарное значение массы  $M_i$  вредных выбросов, приходящихся на 1 мегаватт установленной мощности. Общая масса вредных выбросов при работе мини-электростанции (без окиси углерода)  $M_{NO_2} = 2,07 \text{ т / год}$ ,  $M_{SO_2} = 9,5 \text{ т / год}$ ,  $M_{TB} = 6,24 \text{ т / год}$ ;  $M_{сум1} = M_{NO_2} + M_{SO_2} + M_{TB} = 17,8 \text{ т / год}$  или на 1 МВт установленной мощности в год 4,8 т/(МВт·год).

Для крупных ТЭЦ Республики Беларусь, работающих на природном газе и мазуте, например на Гомельской ТЭЦ-2 мощностью 540 МВт при сжигании 498397 тыс. м<sup>3</sup> природного газа (568429 т.у.т) и 48852 т мазута (63111 т.у.т) (соответственно 90,01 % и 9,99 % от всего сожженного топлива) характерен выброс окиси углерода 188,766 т/год или 0,35 т/(МВт·год). Общая масса вредных выбросов при работе Гомельской ТЭЦ (без окиси углерода)  $M_{NO_2} = 1471,698 \text{ т / год}$ ,  $M_{SO_2} = 1797,945 \text{ т / год}$ ,  $M_{TB} = 5,639 \text{ т / год}$ ,

$M_{\text{СУМ2}} = M_{\text{NO2}} + M_{\text{SO2}} + M_{\text{ТВ}} = 3275,282 \text{ т/год}$  или 6,065 т/(МВт·год), что выше для приведенного нами примера миниэлектростанции мощностью 3,7 МВт 4,8 т/(МВт·год).

Одним из наиболее значительных токсичных веществ, попадающих в воздушный бассейн, является продукт неполного сгорания топлива: оксид углерода ( $\text{CO}$ ). Оценим значение вредных выбросов оксида углерода в атмосферу при сжигании топлива на электростанциях малой мощности. Количество оксидов углерода  $M_{\text{CO}}$  в тоннах в год, выбрасываемого в атмосферу с дымовыми газами при сжигании твердого топлива вычисляются по формуле [2]:

$$M_{\text{CO}} = 0,01 \cdot C_{\text{CO}} \cdot V \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \cdot K_p, \text{ т/год}, \quad (5)$$

где  $C_{\text{CO}}$  – выход оксида углерода при сжигании твердого топлива (кг/т) (для щепы  $C_{\text{CO щепы}} = 2,978 \text{ кг/т}$ , для торфа  $C_{\text{CO торфа}} = 3,177 \text{ кг/т}$ );

$V$  – расход топлива за рассматриваемый период, т/год;

$K_p$  – режимный коэффициент (при определении максимальных выбросов оксидов углерода значение  $K_p = 1$ ).

При сжигании на Пружанской ТЭЦ топливной смеси древесной щепы 60 % и торфа 40 % по формуле (5) имеем  $M_{\text{CO}} = 133,96 \text{ т/год}$  или на 1 МВт установленной мощности в год 36,205 т/(МВт·год).

Особое положение в составе выбросов в атмосферу от тепловых электростанций занимает углекислый газ, содержание которого в воздухе постоянно растет. Количество диоксида углерода  $M_{\text{CO2}}$  в тоннах за расчетный период, выбрасываемое в атмосферу с дымовыми газами при сжигании твердого или жидкого топлива, вычисляется по формуле [2].

$$M_{\text{CO2}} = 3,67 \cdot 0,01 \cdot C^P \cdot V \cdot \left(1 - \frac{q_3}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right), \text{ т/год} \quad (6)$$

где 3,67 – количество диоксида углерода, образующееся при полном сжигании 1 т углерода, т/т;

$C^P$  – содержание углерода в рабочей массе топлива, можно принять равным 31,21 % для щепы и 30 % для торфа фрезерного [2];

$V$  – расход натурального топлива за расчетный период, т/год;

$q_3$  – потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, % ( $q_3 = 0,3$  % по [2]).

При сжигании на Пружанской ТЭЦ топливной смеси древесной щепы 60 % и торфа 40 % по формуле (6) имеем  $M_{\text{CO2}} = 49175,12 \text{ т/год}$  или на 1 МВт установленной мощности в год 13290,6 т/(МВт·год). Выбросы  $\text{CO}_2$  крупной электростанцией энергосистемы мощностью 540 МВт составляет 1131953 т/год или 2096,2 т/(МВт·год), что ниже примерно в 6 раз по сравнению с выбросами  $\text{CO}_2$  мини-электростанцией.

При работе миниэлектростанций, использующих топливо (торф, древесную щепу) в атмосферу вместе с дымовыми газами выбрасывается зола, а также оксиды серы (при сжигании торфа), оксиды азота, оксиды углерода и углекислый газ (создающий так называемый «парниковый эффект»).

Экономическая оценка ущерба  $Y_i$ , причиняемая годовыми выбросами загрязнений в атмосферный воздух для отдельного источника определяется как [2]

$$Y = \gamma \cdot \sigma \cdot f \sum_{i=1}^N A_i \cdot m_i = a \sum_{i=1}^N M_i, \quad (7)$$

где  $\gamma = 24$  руб/у.т – удельный ущерб (в ценах 1991 – 2,4 руб/у.т; в ценах 2022 г. – 24 руб/у.т);

$\sigma$  – безразмерный коэффициент, зависящий от типа загрязняемой территории; для городов с населением свыше 300 тысяч человек,  $\sigma = 8$  [2];

$f$  – безразмерный коэффициент, учитывающий характер рассеивания примесей в атмосферу, зависящий от высоты источника по отношению к среднему уровню и скорости ветра; равен 0,38 для газообразных (при высоте источника 75 м, разности температур газов 75 °С, средней скорости ветра 3 м/с) и равен 2,11 для золы торфа или дров;

$A_i$  – показатель относительной агрессивности примеси  $i$ -го вида равен: для оксида углерода 1 усл. т/т; сернистого ангидрида 22 усл. т/т; оксида азота 41,1 усл. т/т; золы торфа 60 усл. т/т;

$M_i$  – масса годового выброса примеси  $i$ -го вида в год, т/год, так, для Пружанской ТЭЦ характерно  $M_{NO_2} = 2,07$  т/год,  $M_{SO_2} = 9,5$  т/год,  $M_{TB} = 6,24$  т/год;  $M_{CO} = 33,96$  т/год;  $M_{CO_2} = 49175,12$  т/год.

Эквивалентная масса годового выброса примесей с учетом их агрессивности, определенная для одной миниэлектростанции мощностью 3,7 МВт будет равна. Тогда значение ущерба, причиняемого годовыми выбросами загрязнений в атмосферный воздух, пропорционально составляющей  $A_i$  (формула 7):

– при сжигании твердого топлива на мини-электростанциях:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N A_i \cdot m_i &= M_{SO_2} \cdot A_{SO_2} + M_{NO_x} \cdot A_{NO_x} + M_{TB} \cdot A_{TB} + (M_{CO} + M_{CO_2}) \cdot A_{CO} = \\ &= 9,5 \cdot 22 + 2,07 \cdot 41,4 + 6,24 \cdot 60 + (137,96 + 49175,12) \cdot 1 = \\ &= 49981,1 \text{ т/год или } 49981/3,7 = 13508,4 \text{ т/(МВт}\cdot\text{год)}; \end{aligned}$$

– при сжигании топлива (газ, мазут) на электростанции мощностью 540 МВт энергосистемы:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N A_i \cdot m_i &= 1797,945 \cdot 22 + 1471,698 \cdot 41,4 + 5,639 \cdot 60 + 188,766 + \\ &+ 1131953 = 232953,3 \text{ т/год или } 232953,3/540 = \\ &= 2283,26 \text{ т/(МВт}\cdot\text{год)}. \end{aligned}$$

Таким образом, учесть влияние миниэлектростанций на окружающую среду можно путем определения ущерба, причиняемого годовыми выбросами загрязнений в атмосферный воздух.

Значения максимального коэффициента полезного действия миниэнергоустановки будет учтено в комплексной методике оценки эффективности сооружения миниэлектростанций наряду с минимумом приведенных затрат, максимумом надежности работы и минимумом выбросов загрязнений в окружающую среду.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены количественные показатели вредных выбросов в атмосферу за год, приходящиеся на один мегаватт мощности миниэлектростанции. Так, выбросы оксида углерода и углекислого газа миниэлектростанциями, сжигающими фрезерный торф и древесную щепу, соответственно на порядок и в шесть раз превышают указанные выбросы от электростанций энергосистемы, работающими на природном газе и мазуте. Выбросы золы от работы одного мегаватта мощности миниэлектростанций в 1,6 раза превышают соответствующие выбросы от мощных электростанций энергосистемы.

Масса выбрасываемых в атмосферный воздух углекислого газа и оксида углерода при сжигании твердого топлива на миниэлектростанциях во много раз превосходит массу сжигаемого топлива. Масса, отнесенная на один мегаватт установленной мощности выбрасываемого в атмосферный воздух оксида углерода при сжигании на миниэлектростанциях мощностью 3,7 МВт твердого топлива на два порядка превышает такое же значение характерное для электростанции мощностью 540 МВт энергосистемы.

Суммарная удельная, приходящаяся на 1 МВт установленной мощности, масса загрязняющих веществ от миниэлектростанций примерно в 5,9 раз большая, а без учета выбросов оксида углерода и углекислого газа в 1,26 раза меньшая, чем от крупных электростанций энергосистемы.

Наиболее полно негативное влияние работы миниэлектростанций на окружающую среду может быть оценено значением причиняемого денежного ущерба, учитывающего не только массу выбрасываемых вместе с дымовыми газами вредных веществ, но и их относительную агрессивность, характер рассеяния примесей в атмосферу и типа загрязняемой территории (населенная или ненаселенная местность).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Леоновец, С. В. Пружанская мини-ТЭЦ. Современные европейские технологии в использовании местных видов топлива / С. В. Леоновец // Энергетическая стратегия. – 2010. – № 1 (13). – с. 18–21.
2. Стриха, И. И. Экологические аспекты энергетики. Атмосферный воздух / И. И. Стриха, Н. Б. Карницкий. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 374 с.

УДК 621.039.534.24

АНАЛИЗ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С РЕАКТОРОМ ТИПА ВВЭР.  
СИСТЕМА ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛОТЫ  
ANALYSIS OF SAFETY SYSTEMS OF NPPS WWER.  
PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM

Дюдяев И. А., Ромашов С. И., Медуница В. А.,  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
г. Севастополь, Россия.  
I. Dyudyaev, S. Romashov, V. Medunitsa,  
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia.

*Аннотация.* На основе анализа основных эксплуатационных аварий, произошедших на АЭС мира, были проанализированы системы безопасности распространённого типа реактора ВВЭР-1000 и предложена новая пассивная система отвода теплоты от бассейна выдержки, повышающая надёжность установки.

*Abstract.* The safety systems of the common type of WWER-1000 reactor have been analyzed on the basis of analysis of the main operational accidents that occurred at nuclear power plants of the world, and a new passive system of heat removal from the decay pool, which improves the reliability of the unit, has been proposed.

*Ключевые слова:* системы безопасности, АЭС, ВВЭР, система пассивного отвода теплоты, бассейн выдержки, тепловыделяющие сборки, термосифон, теплоноситель.

*Key words:* safety systems, NPP, WWER, passive heat removal system, spent fuel pool, fuel assemblies, thermosiphon, coolant.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее опасных запроектных аварий (ЗПА) на АЭС является полное длительное обесточивание станции с потерей аварийных источников электроснабжения. Так, например, внешнее обесточивание площадки станции с потерей всех аварийных источников электроснабжения на АЭС «Фукусима-1» из-за воздействия цунами, вызванного землетрясением 11 марта 2011 г., привело к нарушению отвода остаточных тепловыделений ядерного топлива в активных зонах реакторов, а также отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в приреакторных бассейнах выдержки (БВ). Перегрев, испарение и связанная с этим потеря теплоносителя в активных зонах и воды, охлаждающей ОЯТ в БВ, привели к перегреву и повреждению ядерного топлива, а в активных зонах – к его плавлению. Пароциркониевая реакция, происходящая на поверхности циркониевых оболочек ТВЭЛ при высокой температуре, стала причиной образования и накопления водорода с последующим его воспламенением и взрывом.

На эксплуатируемых сегодня АЭС с ВВЭР-1000, а также в эволюционных проектах РУ с ВВЭР, технические средства для предотвращения повреждения ОЯТ в БВ в условиях полного длительного обесточивания не предусмотрены. Поэтому целью проекта является создание системы пассивного отвода остаточных тепловыделений (СПОТ) ОЯТ в БВ и внедрение ее на действующих энергоблоках АЭС, а также в проектах перспективных РУ.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Энергонезависимая система, основанная на принципе естественной циркуляции теплоносителя в замкнутом двухфазном контуре, предназначенная для отвода остаточных энерговыделений от приреакторного бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива (СПОТ БВ).

Система представляет собой замкнутый двухфазный контур естественной циркуляции, состоящий из испарительного, конденсационного и транспортного участков. При этом испаритель размещен в объеме, от которого требуется отвести теплоту, конденсатор – за пределами ГО (рис. 1). В качестве теплоносителя используется дистиллированная вода. Движение теплоносителя обеспечивается разностью гидростатических давлений в испарительной (6) и конденсационной (10) полупетлях.

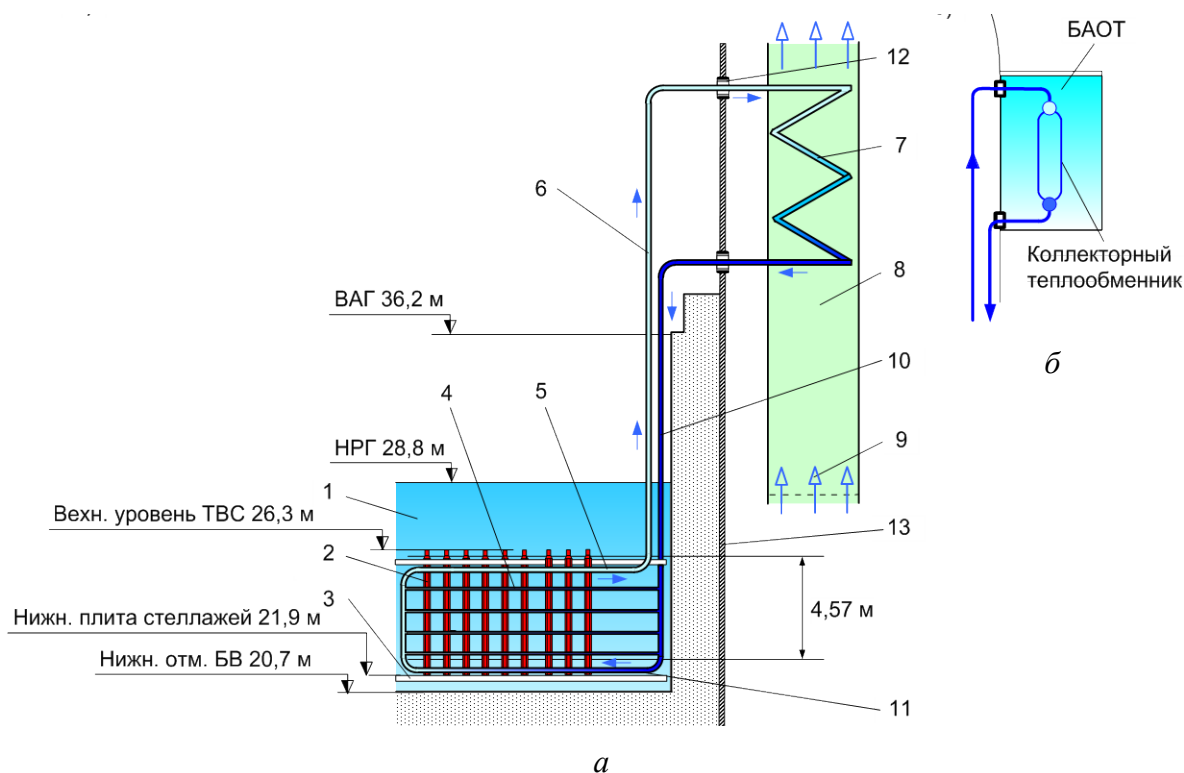


Рис. 1. Схема автономной СПОТ БВ: *а* – на основе кольцевого ДТС; *б* – вариант конденсатора СПОТ с БАОТ; 1 – бассейн выдержки ОЯТ; 2 – тепловыделяющие сборки ОЯТ; 3 – стеллажи; 4 – испаритель кольцевого ДТС; 5 – сборный паровой коллектор; 6 – паровой трубопровод; 7 – конденсатор кольцевого ДТС; 8 – воздушный канал; 9 – поток охлаждающего атмосферного воздуха; 10 – конденсатный трубопровод; 11 – раздающий коллектор; 12 – гермопроходка; 13 – гермооболочка



Наличие замкнутого циркуляционного контура предотвращает возможность байпасирования гермообъема в случае появления неплотности (течи) контура СПОТ либо в пределах ГО, либо за пределами ГО.

Остаточные тепловыделения от ОЯТ отводятся водой бассейна при естественной конвекции. Теплота от воды БВ передается наружной поверхности испарителей двухфазного термосифона (ДТС) 4, а от нее – промежуточному теплоносителю ДТС. За счет внешнего подвода теплоты промежуточный теплоноситель ДТС испаряется, пар через сборный коллектор 5 поступает в паровой трубопровод 6, который через гермопроходки 12 выводится за пределы гермооболочки 13 реакторного отделения и соединяется с конденсатором ДТС 7. Конденсатор 7 охлаждается потоком атмосферного воздуха 9, при этом пар в конденсаторе конденсируется и по конденсатному трубопроводу 10 и раздающему коллектору 11 за счет гравитационных сил возвращается в испаритель 4.

Все элементы испарителя кольцевого ДТС выполнены из пластин и располагаются в зазоре между боковой стенкой БВ и шестигранными чехлами стеллажей. Испарители СПОТ практически не отбирают полезного объема отсеков бассейна, а значит, не снижают количество размещаемых в нем ОТВС.

Теплоотводящая способность СПОТ БВ должна быть подобрана таким образом, чтобы при максимальной загрузке ОЯТ, включая аварийную выгрузку активной зоны после предшествующего останова РУ в момент, близкий к концу кампании, не допустить кипения воды в бассейне (при температуре окружающего воздуха до +40 °С). В этом случае, независимо от продолжительности обесточивания, ОТВС в БВ останутся под уровнем воды, что обеспечит их надежное охлаждение и предотвратит повреждение ТВЭЛ. Практически это означает, что, с учетом неопределенностей расчетов и неравномерности энерговыделений по объему БВ, температура воды в БВ в объеме над стеллажами не должна превысить величину +90 °С.

В качестве промежуточного теплоносителя ДТС может использоваться вода или жидкости с пониженной температурой замерзания. Использование последних позволило бы исключить замерзание промежуточного теплоносителя СПОТ в условиях низких температур окружающего воздуха. В то же время низкокипящие жидкости обладают рядом недостатков, например, пожароопасность или токсичность паров.

Наряду с атмосферным воздухом в качестве конечного поглотителя СПОТ может использоваться вода (рис. 1, б). При этом конечный поглотитель размещается в баке аварийного отвода теплоты (БАОТ). Это снимает вопрос о замерзании промежуточного теплоносителя. В то же время, СПОТ БВ будет эффективно работать лишь до тех пор, пока вода в БАОТ существенно не нагреется (практически – не выше, чем до +70 °С, если исходить из требования, что температура воды в БВ не должна превысить +90 °С). Поэтому вариант с воздушным теплообменником-конденсатором для СПОТ БВ представляется более приемлемым.

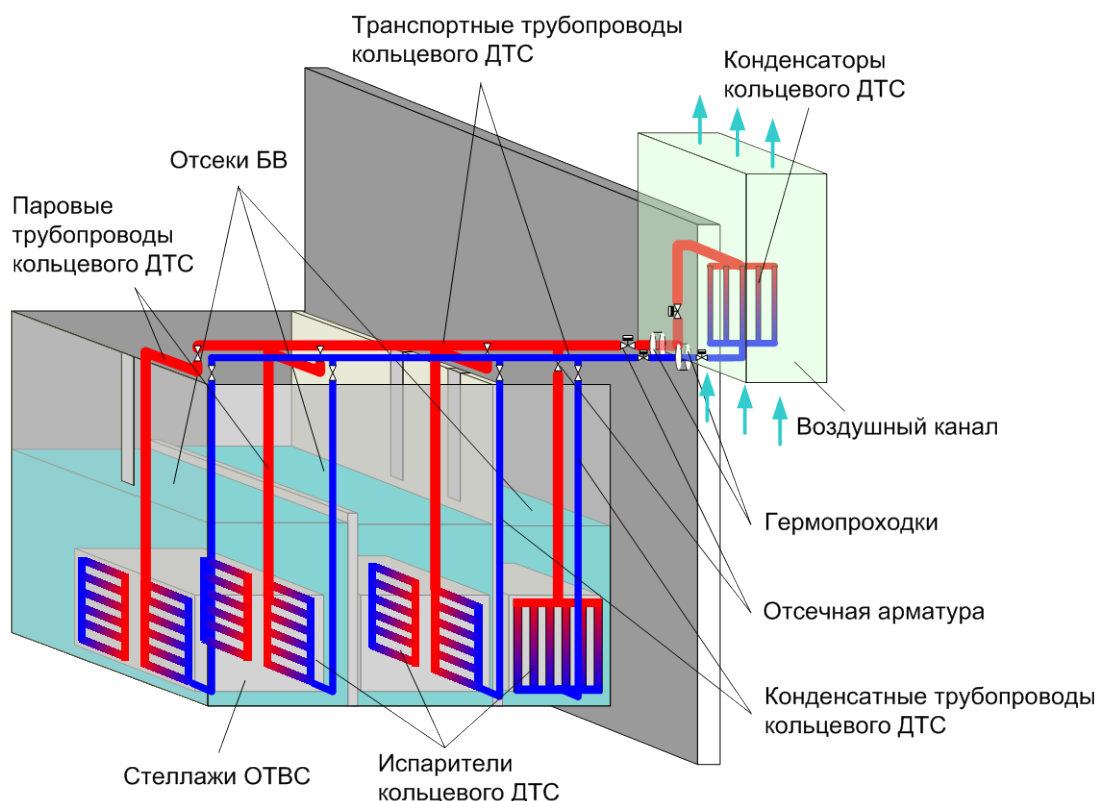


Рис. 2. Расположение автономных секций СПОТ в БВ ОЯТ (показаны не все секции)

Перед заполнением промежуточным теплоносителем кольцевой термосифон вакуумируется для удаления неконденсируемых газов. Давление в циркуляционном контуре СПОТ БВ будет определяться давлением насыщения водяного пара при температуре менее  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и оставаться ниже атмосферного. При возможных течах контура СПОТ БВ исключается выход радионуклидов в атмосферу, а также попадание чистого конденсата в БВ с ОЯТ, что исключает возможность развития реактивных аварий. Система строится по многоканальному принципу, с резервированием основных элементов в пределах канала. При обнаружении течи (например, по факту ухудшения вакуума в контуре ДТС), в условиях нормальной эксплуатации персонал имеет возможность выявить и локализовать (отсечь от общего контура) поврежденную теплообменную секцию. Поскольку теплообменная поверхность выбирается избыточной по отношению к максимально возможной тепловой нагрузке на каждый отсек БВ, система при этом продолжает выполнять функцию теплоотвода в полном объеме.

Возможная схема расположения элементов СПОТ БВ в реакторном отделении АЭС с ВВЭР-1000/В-320 изображена на рис. 3 и 4. Для вывода транспортных трубопроводов через гермооболочку в существующих РУ с ВВЭР 1000/В-320 возможно использовать две из имеющихся шести гермопроходок Ду 1600 мм системы вентиляции реакторного отделения. На плане реакторного отделения место расположения указанных гермопроходок обозначено позицией «В». В новых проектах РУ с ВВЭР для вывода транспортных трубопроводов кольцевого ДТС необходимо предусмотреть дополнительные гермопроходки.

Ввиду недостаточно высокой эффективности трубчатых теплообменников, был рассмотрен вариант применения испарителя, набранного из плоских профилированных пластин.

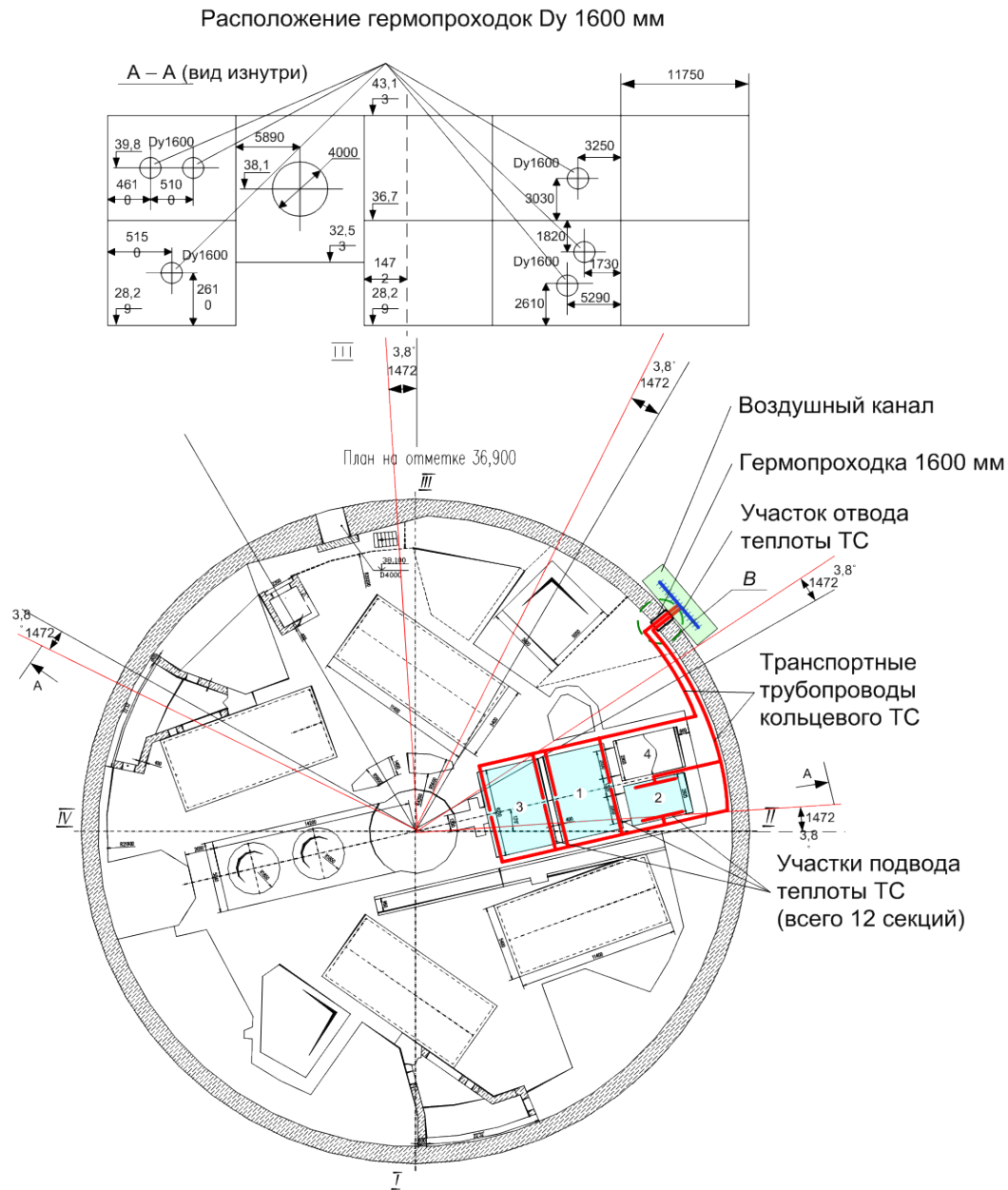


Рис. 3. Расположение элементов СПОТ БВ ОЯТ в реакторном отделении АЭС с ВВЭР-1000/В-320

В качестве материала для изготовления теплообменника, используется пара штампованных пластин размером 2500×180 мм и толщиной 1,0 мм, изготовленных из стали 08X18H10T или аналогичной. Пластины соединяются попарно при помощи контактной сварки, в результате по длине внутри полученной сборки образуются 3 параллельных испарительных канала приблизительно прямоугольной формы: два периферийных сечением 35×4 мм и центральный сечением 30×4 мм. Сверху и снизу пластины соединяются раздаточным и сборным коллекторами. Шаг между пластинами принят равным 10,0 мм. Та-

ким образом, формируется испарительная секция габаритами 2500×2500×200 мм, состоящая из 251 вертикальных параллельных пластин. Теплообменная секция размещается в зазоре между стенкой БВ и стеллажом хранения ОЯТ. Вода БВ перемещается сверху вниз в зазорах между пластинами. При указанных габаритах теплообменной секции, нет необходимости вносить изменения в конструкцию стеллажей хранения ОЯТ.

Еще одним преимуществом пластинчатого теплообменника-испарителя является более слабая чувствительность отводимой мощности к отклонению установившегося заполнения от оптимального.

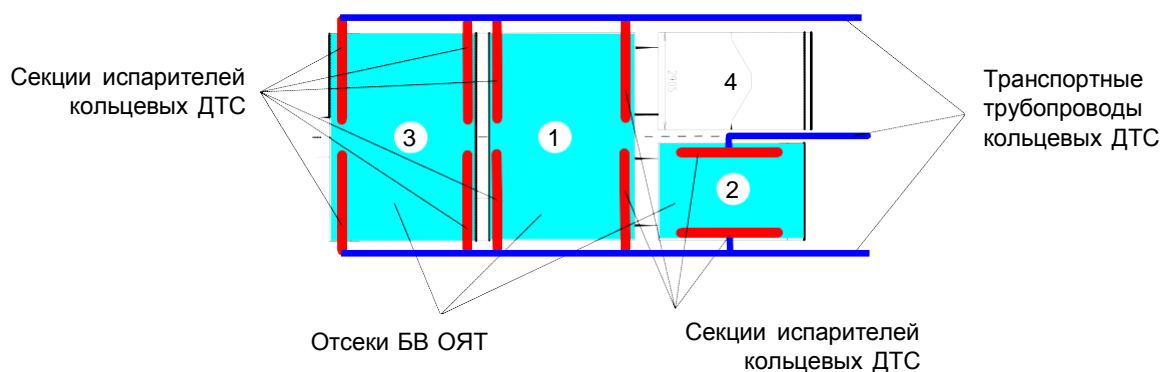


Рис. 4. Расположение испарителей термосифонной СПОТ БВ ОЯТ в отсеках БВ в реакторном отделении АЭС с ВВЭР-1000/В-320: 1–4 – отсеки БВ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внесены предложения по оптимизации компоновки СПОТ при проектировании. Показано, что, по своим характеристикам СПОТ БВ может быть использована не только как система безопасности при авариях, связанных с полным длительным обесточиванием энергоблока, но и как система нормальной эксплуатации.

Результаты расчета требуемых массогабаритных характеристик СПОТ БВ продемонстрировали принципиальную возможность их использования не только в перспективных проектах, но и при возможных модернизациях действующих энергоблоков с ВВЭР-1000.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Свириденко И. И. Система аварийного охлаждения ядерных энергоустановок на основе тепловых труб // Третья Всероссийская конференция по теплообменным процессам. 21–25 октября 2002. – М., МЭИ. – Т. 1. – С. 182–185.
2. ЕР37-2006.310.ОД (2). Запорожская АЭС. Энергоблок № 5. Отчет по анализу безопасности. Анализ запроектных аварий. База данных по ЯППУ для целей АЗПА. 2008.
3. Южно-Украинская АЭС. Энергоблок № 1. Анализ запроектных аварий. База данных по ЯППУ. 10/08-06.231.ОД.1. 2006.

УДК 621.644.07

БЛОК-СХЕМА НАДЕЖНОСТИ ЕДИНИЧНОГО УЧАСТКА СТАЛЬНОГО  
ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА  
BLOCK DIAGRAM OF THE RELIABILITY OF A SINGLE SECTION  
OF A STEEL UNDERGROUND PIPELINE

Струцкий Н. В., зам. начальника управления систем газоснабжения,  
ГПО «Белтопгаз», г. Минск, Беларусь  
Романюк В. Н., д-р техн. наук, профессор,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
N. Strutsky, Deputy Head of the Department of Gas Supply Systems,  
Beltopgaz SPA, Minsk, Belarus  
V. Romaniuk, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Представлены блок-схемы надежности стального подземного трубопровода в различных вариантах подземной прокладки. Данные блок-схемы применимы при расчетах надежности ряда инженерных коммуникаций: теплотрасс, нефте- и газопроводов, и т. д.

*Abstract.* The block diagrams of the reliability of a steel underground pipeline in various variants of underground laying are presented. These block diagrams are applicable in calculating the reliability of a number of engineering communications: heating mains, oil and gas pipelines, etc.

*Ключевые слова:* трубопровод, блок-схема надежности, изоляция, электрохимическая защита, балластировка.

*Key words:* pipeline, reliability block diagram, insulation, electrochemical protection, ballasting.

## ВВЕДЕНИЕ

На современном уровне развития, расчет надежности является обязательным этапом при проектировании и диагностировании (в процессе эксплуатации) любых технических систем. В основе надежностного расчета, в явном или неявном виде, всегда лежит модель рассчитываемого объекта.

К одним из наиболее распространенных технических систем в мире относятся стальные трубопроводные коммуникации в подземном исполнении (теплопроводы, магистральные и распределительные нефте- и газопроводы, и пр.). Соответственно, моделирование надежности таких технических систем и их составных частей представляет большой теоретический и практический интерес.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим типовой элемент трубопроводной системы – участок трубопровода, состоящий из некоторого ограниченного количества стандарт-

ных заводских труб с монтажными сварными соединениями. Условимся, что данный участок однороден по техническим характеристикам, условиям эксплуатации и имеет определенные параметры надежности.

Являясь элементом для построения сложных пространственных структур (сетей), такой единичный трубопровод, в рамках системного подхода, в свою очередь также может рассматриваться как система. Более того, его вполне корректно отнести к сложным техническим системам (СТС), то есть, системам, поведение которых сложно моделировать из-за сложных зависимостей между их частями или из-за сложных взаимодействий между данной системой и окружающей средой [1].

Так, стальные подземные трубопроводы должны быть защищены от коррозии. Как правило, это комплексная защита: антикоррозийное изоляционное покрытие отделяет поверхность трубы от агрессивной внешней среды, а электрохимическая защита (ЭХЗ) максимально подавляет коррозионный процесс в местах, где электрический контакт между трубой и грунтом все же возник.

Как вариант, подземные трубопроводы (например, теплопроводы) могут изолироваться от внешней среды с помощью прокладки в каналах (лотках). Также теплопроводы, во избежание потерь тепла, обеспечиваются тепловой изоляцией.

На обводненных участках и участках подводных переходов трубопроводы, в которых транспортируемая среда легче воды (газ, нефть), могут оборудоваться пригрузами (утяжелителями), для закрепления в проектном положении.

В местах пересечения с транспортными и некоторыми смежными коммуникациями на трубопроводах устанавливаются защитные футляры.

Таким образом, стальной трубопровод включает в себя ряд элементов, каждый из которых исполняет самостоятельную функцию, и имеет свои, специфические физические свойства и конструкцию. Проанализируем характер влияния перечисленных элементов на общую надежность трубопровода, а также целесообразность их выделения и включения в надежностную модель.

Поскольку при строительстве должна обеспечиваться равнопрочность металла сварного соединения и основного металла трубы, на данном уровне рассмотрения допустимо объединить их в один элемент.

Коррозионный фактор несет основную опасность для стального подземного сооружения. Соответственно, состояние и работа элементов антикоррозийной защиты стального трубопровода оказывают определяющее влияние на его надежность. Таким образом, данные элементы должны присутствовать в модели в обязательном порядке.

Затопление или занос канала (лотка) грунтом значительно ухудшает коррозионную ситуацию, что также должно учитываться. В свою очередь, состояние теплоизоляции (выполняемой, как правило, из гидрофильных материалов) на коррозионные процессы влияния не оказывает.

Функциональный отказ балластировки повлечет за собой изменение пространственного положения трубопровода и возникновение напряженно-деформированного состояния, поэтому данный элемент (при наличии) должен включаться в модель надежности.

Футляры на трубопроводах в большей степени предназначены для защиты пересекаемых транспортных и инженерных коммуникаций от вредного или даже опасного (например, в случае выхода горючего газа) воздействия транспортируемой среды. Вместе с тем, участки переходов под железнодорожными путями, магистральными автомобильными трассами могут подвергаться повышенным механическим нагрузкам. В таком случае футляр будет необходим для придания конструкции дополнительной прочности, и также должен учитываться при моделировании.

Сгруппируем элементы трубопровода по степени влияния на общую надежность и функциональному назначению. Тогда модель трубопровода будет включать один основной элемент – трубу, и два возможных блока вспомогательных элементов для защиты от коррозии и механических напряжений:

Основной элемент – труба.

Вспомогательный блок I:

- антикоррозийная изоляция (гидроизоляция);
- электрохимзащита (ЭХЗ);
- канал (лоток).

Вспомогательный блок II:

- футляр;
- балластировка.

Следует отметить, что такой элемент как канал обеспечивает защиту трубопровода одновременно от коррозионного и механического воздействия внешней среды, поэтому может быть включен в оба вспомогательных блока элементов с одинаковым основанием.

Наиболее распространенным способом визуального представления надежностной модели технической системы является построение блок-схемы надежности (reliability block diagram, RBD).

Блок-схемы относятся к статическим моделям надежности, в рамках которых состояния системы определяются наборами работоспособных и неработоспособных элементов в определенный момент времени. Те элементы, отказ которых вызывает отказ системы, имеют на схеме последовательное соединение, элементы, отказ которых приводит лишь к увеличению вероятности отказа, соединяются параллельно. При параллельном соединении элементов отказ системы происходит лишь при совмещении отказов частей системы [2].

Различные варианты блок-схем для стального подземного трубопровода показаны на рис.



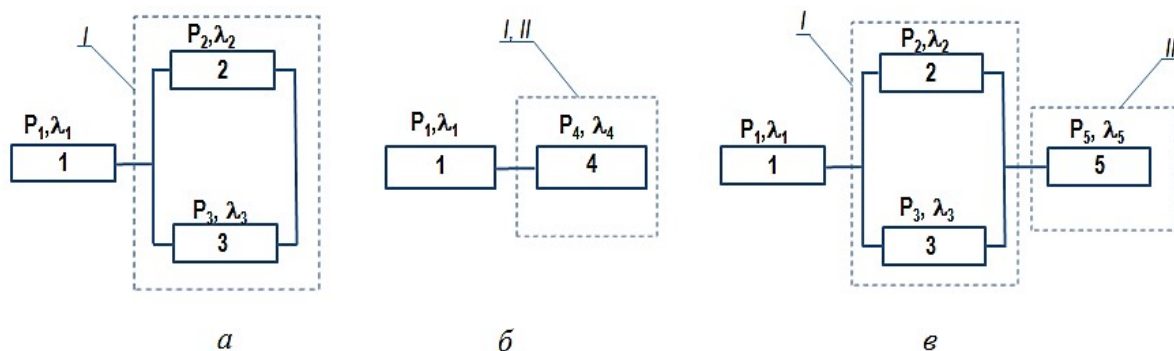


Рис. Блок-схемы стального подземного трубопровода:  
 I – труба; 2 – изоляция; 3 – ЭХЗ; 4 – канал; 5 – балластировка

Как видно, для стального подземного трубопровода, учитывая набор и характер связей составляющих элементов, как правило, будет характерна последовательно-параллельная структура.

Полученные блок-схемы принципиально наиболее близки к варианту, предложенному А. М. Зиневичем в работе [3] для моделирования надежности магистральных газопроводов. Вместе с тем, подход указанного автора, предполагающий включение в модель трубопровода в качестве его элементов траншеи и грунта достаточно спорен – они все же являются частью эксплуатационной среды.

Представляется, что предлагаемые блок-схемы единичного трубопровода в настоящем виде более соответствуют реальной структуре моделируемого объекта, а также позволяют учесть конструктивные особенности трубопроводных коммуникаций различного назначения.

Так, например, вариант *а* на рис. отражает структуру единичного участка стального нефте- и газопровода, теплопровода бесканальной прокладки; вариант *б* – теплопровода канальной прокладки; вариант *в* – нефте- и газопровода с балластировкой.

Подобные статические модели позволяют рассчитать общую надежность системы по надежности составляющих ее элементов обычным способом, используя показатели вероятности безотказной работы  $P$  либо интенсивности отказов  $\lambda$ .

Безусловно, несмотря на очевидность метода блок-схем для понимания и применения, он имеет свои ограничения. Так, например, даже одновременный отказ антикоррозийной изоляции и средств ЭХЗ в действительности не означает немедленного и безусловного отказа стального трубопровода. Как правило, коррозионный процесс не начинается сразу в момент повреждения изоляции, ему предшествует инкубационный период, зависящий от ряда факторов. В некоторых случаях продолжительность инкубационного периода может превысить срок эксплуатации объекта (или коррозионный процесс будет иметь пренебрежимо малую скорость), тогда отказ не наступит.

Вместе с тем, очевидно, что в общем случае отказ средств защиты значительно снизит надежность стального трубопровода. Таким образом,



вероятностная задача расчета параметров надежности трубопровода не может быть исчерпывающе решена только в рамках статической модели.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, представленные блок-схемы надежности единичного стального подземного трубопровода в различных вариантах прокладки в дальнейшем могут быть использованы при проведении оценки надежности таких трубопроводных коммуникаций как теплопроводы, нефте- и газопроводы на стадии проектирования, и в процессе эксплуатации (на этапе технического диагностирования).

Вместе с тем, учитывая реальную сложность такого технического объекта, как стальной подземный трубопровод, для полной и адекватной оценки его надежности целесообразно использовать многоуровневое моделирование с применением статического и динамического методов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков В. Я. Сложные технические системы // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – № 3 (20) – С. 86–92.
2. Справочник по надежности, под ред. Якименко Л. – Т. 3. – М.: Мир, 1970. – 376 с.
3. Зиневич А. М. Научно-техническое обеспечение надежности сооружения линейной части магистральных трубопроводов. – М.: Информнефтегазстрой, 1984. – 132 с.

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО  
СТАЛЬНОГО ПОДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДА  
ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ  
ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE  
DISTRIBUTION STEEL UNDERGROUND GAS PIPELINE ACCORDING  
TO STATISTICAL DATA

Абразовский А. А., к-т. техн.наук, доцент, проректор  
по профессиональному обучению,

ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ», г. Минск,

Савастиенок А. Я., к-т. техн.наук, доцент, заведующий кафедрой;

Гориченко С. Ф., зам. начальника производственно-технического  
управления, УП «МИНГАЗ», г. Минск

A. Abrazovsky, Candidate of technical Sciences, Associate Professor, vice-  
rector for Vocational Training, GIPK «GAZ-INSTITUT», Minsk,

A. Savastienok., Candidate of technical Sciences, Associate Professor, head of  
the department; S. Gorichenko, deputy. Head of Production and Technical De-  
partment, UE «MINGAZ», Minsk

*Аннотация.* Для оценки технического состояния газопроводов предлагается использовать распределение Вейбула и предложен способ определения интенсивности отказов на основании данных эксплуатации газопровода.

*Abstract.* To assess the technical condition of gas pipelines, it is proposed to use the Weibull distribution and a method is proposed for determining the failure rate based on gas pipeline operation data.

*Ключевые слова:* оценка технического состояния, распределительный газопровод, вероятностный метод.

*Key words:* assessment of technical condition, gas distribution pipeline, probabilistic method.

## ВВЕДЕНИЕ

Программой комплексной модернизации производств газовой сферы на 2021–2025 годы предусмотрено техническое обследование 40 662 км газопроводов и техническое диагностирование 7 334 км газопроводов, поэтому тема оценки технического состояния газопроводов является актуальной.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В соответствии с Правилами [1, п. 188], комплекс работ по обеспечению безопасной эксплуатации объектов газораспределительной системы включает в себя контроль технического состояния газопроводов, при кото-

ром на основании технического обследования проводят оценку технического состояния газопровода. Если по результатам оценки технического состояния газопровод признается недостаточно надежным, он подлежит техническому диагностированию с целью установления назначенного ресурса и определения срока вывода газопровода из эксплуатации. ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ» предлагает два основных метода оценки состояния газопровода: метод оценки по статистическим данным и метод определения остаточного ресурса газопровода по коррозионному утонению стенок и изменению механических характеристик металла труб газопровода (на основании показаний твердомера).

Метод оценки технического состояния газопровода по статистическим данным состоит в следующем. Надежность объекта на стадии эксплуатации можно иллюстрировать графиком типичной зависимости интенсивности отказов объекта от времени эксплуатации, представленном на рис.

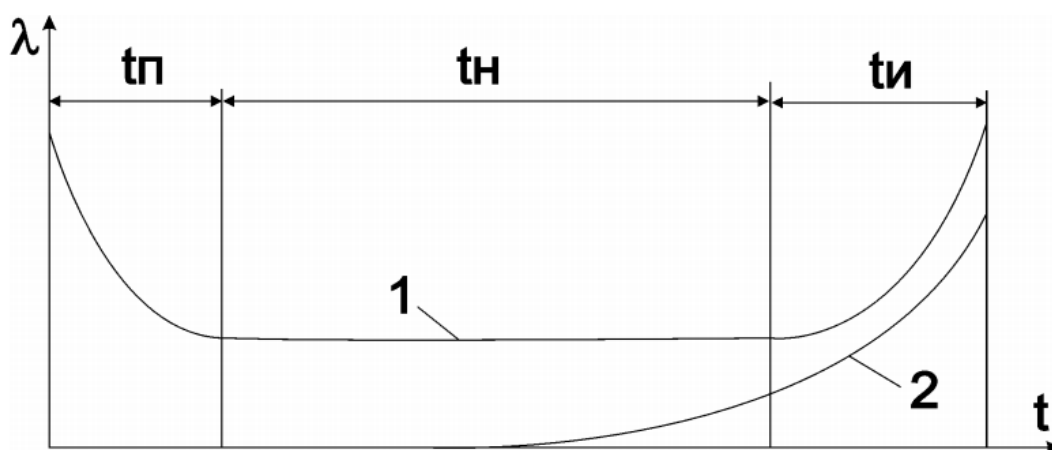


Рис. Зависимость интенсивности отказов объекта от времени эксплуатации:  
 1 – интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ; 2 – кривая старения;  $t_p$  – период приработки;  
 $t_n$  – нормальная работа;  $t_i$  – период износа

В период износа функция надежности в соответствии с распределением Вейбулла [2] имеет вид:

$$P(t) = e^{-\lambda t^\alpha}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – параметр формы кривой распределения.

Интенсивность отказов в период износа определяется формулой:

$$\lambda(t) = \lambda \alpha t^{\alpha-1}. \quad (2)$$

Время, за которое газопровод достигнет плановой надежности (время продления ресурса), в период износа определяется по формуле:

$$t = \left( -\ln(P_{nn}) / \lambda \right)^{1/\alpha}. \quad (3)$$

Параметр формы  $\alpha$  принимается исходя из условий эксплуатации: для межпоселковых газопроводов  $\alpha = 1,1$ ; для газопроводов в черте населенных пунктов  $\alpha = 1,2$ ; для газопроводов в грунтах с высокой коррозионной активностью  $\alpha = 1,2$ ; для газопроводов в грунтах с высокой коррозионной активностью и при наличии опасного влияния блуждающих токов  $\alpha = 1,3$ .

Интенсивность отказов характеризует скорость возникновения отказов объекта в различные моменты времени его работы:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_p \Delta t}, \quad (4)$$

где  $\Delta n(t)$  – число отказавших элементов за промежуток времени  $\Delta t$ ;

$N_p$  – число работоспособных элементов на момент  $t$ .

В качестве элемента принята определенная длина газопровода с учетом отношения наружного диаметра к толщине стенки трубы.

Для оцениваемого газопровода (выделенного участка) газопровода определяется общий параметр потока отказов по формуле:

$$\lambda_i = k_{mp} \lambda_i^{mp} + k_1 \lambda_i^{\kappa 1} + k_2 \lambda_i^{\kappa 2} + k_3 \lambda_i^{\kappa 3}, \quad (5)$$

где  $k_i$  – количество повреждений одного типа.

Параметр потока отказов учитывает удельные значения, указанные в таблице, по следующим отказам (повреждениям):  $\lambda_i^{mp}$  – утечки газа;  $\lambda_i^{\kappa 1}$  – контакты «труба-земля» без коррозии;  $\lambda_i^{\kappa 2}$  – контакты «труба-земля» с коррозией до 30 % толщины стенки трубы;  $\lambda_i^{\kappa 3}$  – контакты «труба-земля» с коррозией более 30 % толщины стенки трубы.

Таблица

Значения удельных параметров потока отказов

Труба	$\lambda_i^{mp}$	$\lambda_i^{\kappa 1}$	$\lambda_i^{\kappa 2}$	$\lambda_i^{\kappa 3}$
133·3,5	0,00100	0,00010	0,00020	0,00050
133·4	0,00088	0,00009	0,00018	0,00044
133·4,5	0,00078	0,00008	0,00016	0,00039

В качестве критериев фактического технического состояния газопровода приняты надежность газопровода через 5 лет эксплуатации и (или) прогнозируемый срок службы.

Если по результатам оценки технического состояния газопровода срок службы газопровода, рассчитанный из условия начала периода износа, более пяти лет, или надежность газопровода через 5 лет эксплуатации выше плановой (0,98), это значит, что дальнейшая безопасная эксплуатация га-

зопровода допустима, нет оснований для проведения технического диагностирования газопроводов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлен метод оценки технического состояния распределительного стального подземного газопровода по статистическим данным. Наряду с детерминированными методами, данный метод, использующий теорию вероятностей и математической статистики, позволит увеличить достоверность оценки, исключить нерациональное использование средств на капитальный ремонт, а с другой стороны, позволит предупредить аварии и инциденты на газопроводах, вызванные старением и износом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Правила по обеспечению промышленной безопасности в области газоснабжения: утв. постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 05.12.2022 № 66.
2. Основы теории надежности и технической диагностики / А. В. Федотов, Н. Г. Скабкин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 64 с.
3. Савастийенок А. Я., Гориченко С. Ф. – Вероятностный метод диагностирования распределительных газопроводов // Промышленная безопасность и охрана труда. Практикум. – 2021. – № 11. – С. 45–48.

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПОДОГРЕВА  
ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ТЭЦ ЗА СЧЕТ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНЫХ  
ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ  
WASTE HEAT FLOWS UTILIZATION FOR CHP FEED WATER  
REGENERATIVE HEATING SYSTEM MODERNIZATION

Янчук В. В., магистр техн. наук; Романюк В. Н., д-р техн. наук, профессор,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
V. Yanchuk, Master of Sciences; V. Ramaniuk, Doctor of Technical  
Sciences, Professor,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* В текущем состоянии в энергосистеме Беларуси актуальным сохраняется повышение эффективности использования природного газа, который является основным первичным энергоресурсом. В данном исследовании предложено развитие системы регенеративного подогрева питательной воды путем нагрева подпиточной воды перед ее подачей в цикл за счет низкопотенциальных сбросных потоков с применением абсорбционного теплового насоса с паровым приводом. Для станций с установленными на ней турбинами ПТ-60 в результате модернизации получено повышение электрического КПД в пределах на 0,9 %.

*Abstract.* In the current state in Belarussian energy system, it remains relevant to improve the efficiency of natural gas utilization as it is the main primary energy source. This research proposes modernization of a regenerative feedwater heating system by heating make-up water before it is added to the cycle water using low-grade waste heat flows using a steam-driven absorption heat pump. For plants with PT-60 turbines installed, the modernization results in electrical efficiency increase up to 0,9 %.

*Ключевые слова:* низкотемпературные тепловые потоки, тепловая электростанция, регенерация, тепловой насос, абсорбционный тепловой насос.

*Key words:* low temperature heat flows, combined heat and power plant, regeneration, heat pump, absorption heat pumps.

## ВВЕДЕНИЕ

Основным источником первичного энергоресурса в Беларуси как в энергетическом, так и в промышленном секторе является природный газ. С 2020 по 2021 год его доля снизилась с 96 % до 84 % [1], что связано с пуском в эксплуатацию Белорусской АЭС. В последующем, доля природного газа в приходной части энергобаланса энергосистемы будет уменьшаться и при выводе двух блоков Белорусской АЭС на полную мощность составит 57 %, т. е. природный газ по-прежнему останется

основным энергоносителем [2]. Следовательно, сохраняется актуальность повышения эффективности использования топлива на электростанциях, работающих на природном газе.

Основное количество электроэнергии в Объединенной энергетической системе Беларуси вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС), в частности, на паротурбинных теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) и конденсационных электростанциях (КЭС). При сохранении начальных и конечных параметров, повысить эффективность паротурбинных блоков можно за счет утилизации низкотемпературных сбросных тепловых потоков. Прежде всего – теплоты охлаждения циркуляционной воды, в классическом варианте рассеиваемой в градирнях.

В статье рассмотрен вариант подогрева подпиточной воды за счет утилизации низкопотенциальной теплоты охлаждения циркуляционной воды с применением абсорбционного теплового насоса (АБТН) с паровым приводом.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Наиболее распространенным типом турбоагрегата в энергосистеме является ПТ-60 и его версии (ПТ-65, ПТ-70 и ПТ-80), следовательно, в первую очередь следует определить эффективность решения применительно к данному типу турбоагрегатов, установленных на ТЭС с паровым потреблением и значительными невозвратами конденсата производственного отбора (Гродненская ТЭЦ-2, Мозырская ТЭЦ и Новополоцкая ТЭЦ).

Суть предлагаемого решения состоит в подогреве подпиточной воды после ХВО в АБТН до ее смешения с цикловой водой за счет теплоты охлаждения циркуляционной воды, которая в классическом варианте рассеивается в атмосферу. Конечная температура нагреваемого потока зависит от параметров греющего потока. В роли греющего потока возможно использовать пар из регенеративных отборов (ПНД-3, ПНД-4) либо из отбора на деаэрактор.

Для оценки эффективности предложенного решения получены значения электрического КПД  $\eta_{эл}$  и энергетического КПД  $\eta_{эн}$ , которые соответственно определяются:

$$\eta_{эл} = \frac{W_{ээ}}{Q_{топл} - Q_{то} - Q_{по}}, \quad (1)$$

$$\eta_{эн} = \frac{N_{ээ} + Q_{то} + Q_{по}}{Q_{топл}}, \quad (2)$$

где  $W_{ээ}$  – электрическая выработка турбоустановки, ГДж/ч;

$Q_{то}$  – тепловая нагрузка теплофикационного отбора, ГДж/ч;

$Q_{по}$  – тепловая нагрузка производственного отбора, ГДж/ч;

$Q_{\text{топл}}$  – мощность потока топлива, ГДж/ч.

Для работы в расчетном режиме с расходом пара в П-отбор 140 т/ч, нагрузкой теплофикационного отбора 52,3 Гкал/ч, что соответствует расходу пара в Т-отбор 100 т/ч, пропуском пара в конденсатор 12 т/ч и сохранением минимального пропуска в конденсатор, получены зависимости принятых критериев эффективности от доли возврата конденсата в цикл (рис.).

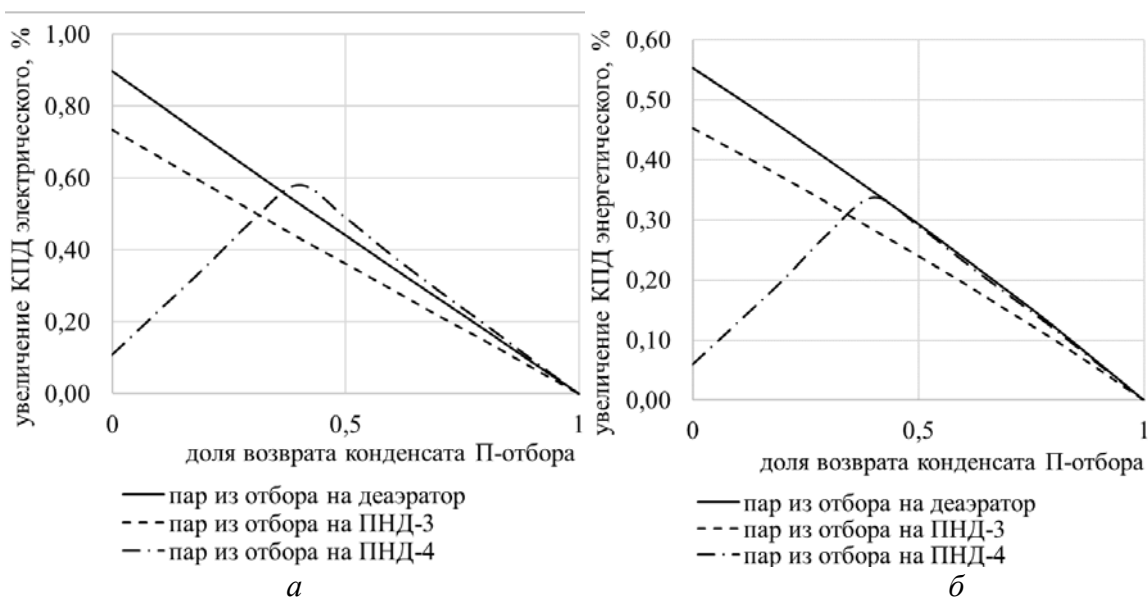


Рис. Изменение показателей работы турбоустановки: *а* – рост электрического КПД; *б* – рост энергетического КПД

Из рис. следует, что наибольший эффект от модернизации будет получен при использовании в качестве привода АБТН пара из отбора на деаэрактор, что объясняется более высокой конечной температурой нагреваемого потока за счет более высоких параметров греющего потока. При этом электрический КПД турбоустановки увеличивается на 0,90 % и энергетический КПД – на 0,55 %.

Пар из отбора на ПНД-4 следует использовать для привода АБТН только на станциях, где процент возврата конденсата в цикл более 40 %, так как расхода пара в данный отбор недостаточно для нагрева большого количества подпиточной воды.

Электрическая мощность станции в результате такого решения снизится за счет снижения расхода пара в голову турбины, в пределах на 320 кВт, для варианта с полным невозвратом конденсата и приводом АБТН паром из отбора на деаэрактор, что также является положительным результатом, так как в текущем состоянии в энергосистеме имеется избыток установленных мощностей.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регенеративное использование сбросных низкотемпературных тепловых потоков на ТЭС позволяет повысить эффективность использования первичных энергоресурсов.

Для рассмотренного варианта с сохранением минимального пропуска пара в конденсатор 12 т/ч и для описанного режима работы турбоустановки ПТ-60 увеличение электрического КПД в пределе составляет 0,90 %, при этом энергетический КПД увеличивается на 0,55 %. Электрическая мощность турбоустановки снижается на 320 кВт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Our world in data / Electricity mix [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ourworldindata.org/electricity-mix#fossil-fuels-what-share-of-electricity-comes-from-fossil-fuels>. <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/energeticheskaya-statistika/anual-dannye>. – Дата доступа: 28.12.2022.
2. Хрусталеv Б. М. Расширение энергосберегающей базы в условиях централизованного теплоснабжения и доминирования энергоемких технологий / Б. М. Хрусталеv, В. Н. Романюк // Энергоэффективность. – 2017. – № 12. – С. 20–27.
3. Производство электрической энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energo.by/content/deyatelnost-obedineniya/proizvodstvo-elektricheskoy-energii/>. – Дата доступа: 01.02.2023.
4. Романюк, В. Н. Абсорбционные или парокомпрессионные тепловые насосы в схемах ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, С. В. Мальков // Энергия и менеджмент. – 2013. – № 4. – С. 18–21.
5. Янченко, И. В. Влияние абсорбционного теплового насоса на тепловую экономичность ТЭС и АЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / И. В. Янченко. – Новочеркасск, 2015. – 180 л.
6. Янчук В. В. Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 6. – С. 511–523.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ  
СИСТЕМ  
IMPROVING THE RELIABILITY OF GAS DISTRIBUTION SYSTEMS

Титов А. С., магистр техн. наук; Романюк В. Н., д-р техн. наук, профессор,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
A. Titov, Master of Sciences;  
V. Ramaniuk, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Рассмотрены способы повышения уровня надежности газораспределительных систем путем ее реконструкции, а также предложен вариант подхода к принятию решения о необходимости строительства кольцевых газопроводов.

*Abstract.* Methods for increasing the level of reliability of gas distribution systems through its reconstruction are considered, and a variant of the approach to making a decision on the need to build ring gas pipelines is also proposed.

*Ключевые слова:* газоснабжение, газораспределительная система, газопровод, надежность, реконструкция, кольцевой газопровод.

*Key words:* gas supply, gas distribution system, gas pipeline, reliability, reconstruction, ring gas pipeline.

## ВВЕДЕНИЕ

Главным требованием к функционированию газораспределительной системы является обеспечение ее надежности, безопасности и эффективности эксплуатации при снижении нагрузки на окружающую среду, начиная от источников газоснабжения до конечных потребителей газа.

Главной задачей повышения надежности является обеспечение бесперебойного газоснабжения всех категорий потребителей, уменьшение количества отказов, приводящих к изменению параметров газа, несоответствующих требованиям технической нормативной документации.

Повышение надежности газораспределительной системы – это огромная работа, обеспечиваемая комплексным подходом реализации целого ряда мероприятий. Однако остановимся на некоторых из них – строительство кольцевых газопроводов, параллельных участков газопроводов для увеличения пропускной способности основных участков.

Данные мероприятия следует рассматривать в контексте с программами по проведению капитальных ремонтов многоэтажных жилых домов, при реализации которых выполняется модернизация или реконструкция внутренних систем газоснабжения, что может повлечь необходимость выполнения работ по перекладке наружных газопроводов с целью обеспечения пропускной способности трубопроводов, а также сохранения постоянства давлений в дей-

ствующей ветви наружного газопровода. Это направление развития сохраняет свою актуальность и в случае проведения целенаправленного уплотнения существующей многоэтажной жилой застройки путем строительства новых зданий и сооружений. При этом необходимо:

- обеспечить расчетное потребление газа при сохранении существующего режима работы газораспределительной системы;
- обеспечить перераспределение расходов газа между потребителями.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Решение указанных задач обеспечивается посредством реконструкции газораспределительной системы. При этом появляется возможность ее усовершенствования, начиная с выбора проектных решений в зависимости от принятой методики расчета необходимой пропускной способности сети и заканчивая технологией ее модернизации с учетом требований нормативных документов.

Один из вариантов (для сохранения постоянства давлений в действующей ветви наружного газопровода с увеличенным расходом газа) – это прокладка параллельного участка газопровода (лупинга), параметры которого обеспечат постоянство прежнего гидравлического режима газораспределительной сети.

Конечно же, не следует рассматривать его как единственный верный. Существуют и иные варианты: прокладку новых газопроводов и лупингов можно заменить устройством вставок увеличенного диаметра в действующий распределительный газопровод. Однако их устройство требует отключения этих участков сети газоснабжения, что ведет к дополнительным затратам. Поэтому для каждого варианта модернизации газораспределительной системы необходимо найти наиболее эффективные и экономически обоснованные способы повышения пропускной способности газопровода.

Анализ, выбор и дальнейшую реализацию вариантов реконструкции газораспределительной системы необходимо производить по комплексному проекту реконструкции жилой застройки всего некоторого выделенного района, что позволит учесть при этом наибольшее количество факторов, влияющих на рост потребления газа и вероятность падения давления газа в конечных точках у потребителя ниже нормативного, необходимого для устойчивой работы газоиспользующего оборудования.

В рамках рассмотрения данного направления требуется выделить вопрос строительства кольцевых газопроводов и подходов к обоснованию необходимости их применения.

Как при строительстве лупингов или модернизации трубопроводов вставками большего диаметра, так и при строительстве кольцевых газопроводов в первую очередь руководствуются результатами гидравлического расчета газораспределительной сети с учетом как существующих, так и возможных перспективных потреблений газа с учетом коэффициентов одновременности [1]. Также немаловажную, а может даже и первостепенную роль при этом оказывают сведения о значениях избыточного давления перед газоиспользующим

оборудованием у потребителей, получаемые ежегодно в процессе эксплуатации путем замера их в характерных точках согласно требованиям [2], а также локальных технических нормативных документов газоснабжающих организаций в зимний период во время наиболее холодного времени года, когда имеют место пиковые максимальные нагрузки. Результаты этих измерений служат основанием для рассмотрения вопросов необходимости корректировки режимов работы ГРП (ШРП), а в случаях отсутствия этой возможности, зачастую, и основанием для проведения гидравлического расчета с целью обоснования необходимости кольцевания газопроводов для дальнейшего включения ее в программу проектирования и строительства.

Стоит рассмотреть данный вопрос в рамках обеспечения надежности газоснабжения с иного ракурса. Результаты анализа существующих сетей газораспределения выявляют большое количество именно тупиковых систем. В случае возникновения аварийных ситуаций, связанных с нарушением герметичности газопровода, это может повлечь за собой отключение большого количества потребителей газа, а также значительные потери газа. Не менее трудозатратным является дальнейший процесс восстановления газоснабжения путем подключения потребителей после остановки подачи газа.

С целью уменьшения затрат на аварийные отключения, повышения уровня надежности поставки газа потребителям, а также повышения безопасности при аварийных ситуациях предлагается подход к принятию решения о необходимости строительства кольцевых газопроводов дополнить вариантом, основанным на необходимости обеспечения вышеперечисленных факторов.

Рассмотрим данный вопрос, опираясь в первую очередь на статистические данные основных типоразмеров диаметров наружных подземных газопроводов среднего и низкого давлений, находящихся в эксплуатации.

Анализ статистических данных показывает, что наиболее распространенным типоразмером являются трубопроводы соответственно для среднего D32 мм и низкого давлений D32 и D57 мм. Это объясняется в первую очередь тем, что данный типоразмер диаметров труб использовался и используется для строительства газопровод-вводов. Частично данные типоразмеры труб используются при соответствующем гидравлическом расчете в тупиковых относительно незначительной протяженности участках распределительных сетей при прокладке уличных газопроводов.

Остановим свое внимание на иных больших типоразмерах труб, обладающих большей пропускной способностью, используемых для строительства распределительных газопроводов. И здесь однозначно можно выделить D63 мм для газопроводов среднего давления и D90 и D89 мм для низкого давления. Исходя из полученных сведений, предположим, что наиболее вероятным событием при строительстве кольцевого участка газораспределительной системы будет строительство газопровода, соединяющего данные типоразмеры труб. В ином случае планируемый к строительству газопровод будет по своему типоразмеру превышать принимаемые к расчету диаметры и, соответ-

ственно, обладать лучшими характеристиками, а в частности – большей пропускной способностью.

Для проведения расчетов воспользуемся классической формулой скорости движения газа в газопроводе [3]:

$$W = 0,01273 \cdot Q \cdot z \cdot T / (D^2 \cdot p), \quad (1)$$

где  $W$  – скорость движения газа в газопроводе, м/с;  
 $Q$  – расход газа через данное сечение, м<sup>3</sup>/ч;  
 $z$  – коэффициент сжимаемости;  
 $T$  – температура газа, К;  
 $D$  – внутренний диаметр трубопровода, мм;  
 $p$  – абсолютное давление газа, МПа.

Отсюда можно определить максимальную пропускную способность трубопровода  $Q_{\max}$ , которая будет соответствовать максимальной скорости потока газа. При этом будем исходить из позиции необходимости обеспечения максимальной пропускной способности для случаев пиковых режимов потребления или возникновения аварийной ситуации. Согласно приложения В [1] максимальная скорость потока газа составляет 25 м/с. С учетом этого максимальную пропускную способность трубопровода можно выразить:

$$Q_{\max} = 196,386 \cdot D^2 \cdot p / (z \cdot T). \quad (2)$$

Приняв для предварительных расчетов  $z = 1$  и  $T = 293 \text{ K}$ , вычисления можно производить по упрощенной формуле:

$$Q_{\max} = 0,67 \cdot D^2 \cdot p. \quad (3)$$

Результаты расчетов для указанных типоразмеров диаметров (с учетом сортамента полиэтиленовых труб: SDR17 для низкого и SDR11 для среднего давлений, а также наиболее распространенный тип стальной трубы D89x3,5 мм) при различных величинах рабочих давления газа, применяемых в системах газораспределения, а также их максимально допустимых значений сведем в табл. 1.

Таблица 1

Максимальная пропускная способность трубопроводов

Рабочее давление, МПа	Пропускная способность трубопровода, м <sup>3</sup> /ч, следующих типоразмеров диаметров, мм		
	63	90	89
0,003	214	438	469
0,15	445	912	1132
0,3	710	1456	1808

Далее необходимо определить количество потребителей газа, для которых рассмотренные типоразмеры диаметров труб смогут обеспе-

чить данное потребление газа. При этом будем учитывать вариант установки у потребителей не только газовой плиты ПГ4 (как в многоэтажном жилом фонде), но и одновременно с этим настенного отопительного газового котла наиболее распространенных моделей мощностью 24 кВт. Тем самым мы ухудшаем возможную аварийную ситуацию и предполагаем устройство закольцовки на участках с многоквартирной застройкой с поквартирной системой отопления или в частном секторе с индивидуальными жилыми домами.

Воспользуемся формулой расчетного часового расхода газа  $Q_d^h$ , м<sup>3</sup>/ч, определяемого по сумме номинальных расходов газа газовыми приборами с учетом коэффициента одновременности их действия [1]:

$$Q_d^h = \sum_{i=1}^m K_{sim} q_{nom} n_j, \quad (4)$$

где  $K_{sim}$  – коэффициент одновременности, значение которого следует принимать для жилых домов, как приведено в приложении В [1];

$q_{nom}$  – номинальный расход газа прибором или группой приборов, принимаемый по паспортным данным или техническим характеристикам приборов, м<sup>3</sup>/ч;

$n_j$  – количество однотипных приборов или их групп;

$m$  – количество типов приборов или их групп.

Число  $n$  – искомая нами величина, определяющая количество квартир или индивидуальных жилых домов, в которых установлено газоиспользующее оборудование.

В данном конкретном случае мы имеем  $m = 2$ : типы приборов котел и плита. Определимся с номинальными расходами данного газоиспользующего оборудования.

Для отопительных и водогрейных настенных котлов данный показатель зависит от их мощности, отапливаемой площади (а точнее объема), КПД котла. Производители различных марок котлов указывают различные величины номинального расхода. При усредненных теплопотерях, мощность потока которых можно оценить 80 Вт/м<sup>2</sup>, рассчитанных для температуры наружного воздуха – 24 °С, то при отапливаемой площади 200 м<sup>2</sup> и КПД котла 91 % максимальный расход газового котла составит 1,78 м<sup>3</sup>/ч.

Усредненный номинальный расход газа для четырехкомфорочных газовых плит составляет 0,995 м<sup>3</sup>/ч.

Согласно приложению «В» [1] коэффициент одновременности для отопительных котлов, независимо от их количества, рекомендуется применять равным 0,85. Для плит примем значение данного показателя усредненным путем интерполяции между его значениями, принимаемыми согласно упомянутого приложения «В» [1], равным 0,176.

Тогда количество квартир или индивидуальных жилых домов (а в итоге – количество потребителей) сможем определить по формуле:

$$n=Q_d^h/(K_{пл} q_{ном.пл} + K_k q_{ном.к}), \quad (5)$$

где  $Q_d^h$  – принимаем согласно табл. 1 полученных значений пропускной способности для соответствующих типоразмеров труб и давлений в них.

Результаты расчетов сведем в табл. 2.

Таблица 2

Количество потребителей, обеспечивающихся газом с учетом пропускной способности закольцовок соответствующих диаметров трубопроводов

Рабочее давление, МПа	Количество потребителей, ед., по соответствующим типоразмерам диаметров труб закольцовок, мм		
	63	90	89
0,003	–	259	278
0,15	263	–	–
0,3	420	–	–

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты можно принять в качестве обоснования при определении нижнего порога количества потребителей (квартир или индивидуальных жилых домов, оборудованных газоиспользующим оборудованием для нужд отопления и приготовления пищи) при выборе объектов газораспределительной системы (ГРП, ШРП), для которых решается вопрос о необходимости или ее отсутствии строительства закольцовок.

С учетом определенной объективной погрешностью расчетов, связанных с усредненными показателями и иными допущениями, на основании полученных данных предлагается нижнее пороговое число потребителей (для обоих типов давления в газораспределительной сети), которое можно принять равным 250 ед.

### ЛИТЕРАТУРА

1. СН 4.03.01-2019. Газораспределение и газопотребление. – Минск: Сройтехнорм, 2020. – 106 с.
2. Об утверждении Правил по обеспечению промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь: постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 02 февр. 2009 г., № 6 (редакция от 23.02.2018) // ЭТАЛОН-ONLINE / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. (Дата обращения: 17.12.2022). – Текст: электронный.
3. Справочник по проектированию магистральных газопроводов / А. К. Дерцакян, М. Н. Шпотаковский, Б. Г. Волков и др.; Под ред. А. К. Дерцакяна. – Ленинград: Недр. Ленингр. Отд-ние, 1977. – 519 с.

4. Реконструкция системы газоснабжения низкого давления / С. Н.Осипов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/rekonstruktsiya-sistemy-gazosnabzheniya-nizkogo-davleniya>. – Дата доступа: 17.12.2022.



УДК 621.48

ДВИГАТЕЛЬ СТИРЛИНГА – ПРОРЫВНОЕ РЕШЕНИЕ НАШЕГО  
ВРЕМЕНИ В ЭНЕРГЕТИКЕ  
STIRLING ENGINE – THE BREAKTHROUGH SOLUTION OF OUR TIME  
IN ENERGY THE FIRST STIRLING ENGINE

Петровская Т. А., Мильяненко А. А., Микшель М. С.,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
Т. Petrovskaya, A. Milyanenko, M. Mikshel  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Двигатель Стирлинга является одним из перспективных направлений в создании современных энергетических систем. Основные преимущества использования двигателя Стирлинга.

*Abstract.* The Stirling engine is one of the promising directions in the creation of modern energy systems. The main advantages of using the Stirling engine.

*Ключевые слова:* двигатель Стирлинга, типы двигателей Стирлинга.  
*Key words:* Stirling engine, Stirling engine types.

## ВВЕДЕНИЕ

Впервые двигатель Стирлинга был запатентован шотландским священником Робертом Стирлингом 27 сентября 1816 года (английский патент № 4081). [1]

Как известно, двигатель Стирлинга является тепловым двигателем с замкнутым регенеративным циклом, работа которого отличается высокими значениями среднего давления газа, свободным от масла рабочим пространством, отсутствием клапанного механизма, передачей тепла через стенки цилиндра или теплообменник. [3]

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На данный момент есть три основных типа двигателя Стирлинга:

**Альфа двигатель** – в данном двигателе есть два цилиндра (горячий и холодный), которые соединены трубкой, в центре которой стоит регенератор (рис. 1). [2]

**Бета двигатель** – в нем всего один цилиндр, на концах которого разная температура, но в нем два поршня, рабочий и вытеснитель. Газ перекачивается через регенератор, который может быть внешним или внутренним (рис. 2).

**Гамма двигатель** также состоит из двух цилиндров (полностью холодного и с перепадом температуры соответственно). В холодном рабочий поршень, а вытеснитель в цилиндре с разными температурой. Регенератор тоже может быть внешним и соединять все цилиндры или внутренним (рис. 2).

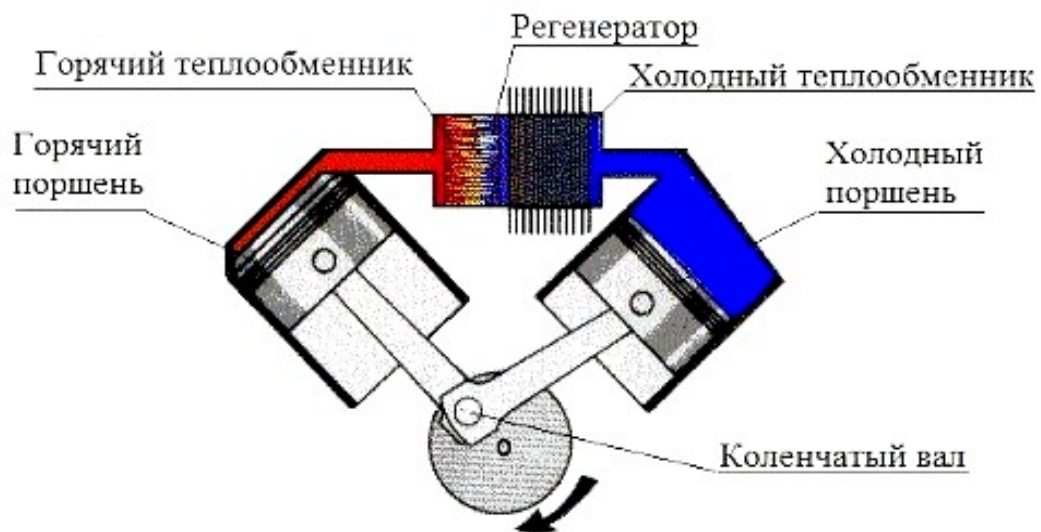


Рис. 1. Двигатель альфа типа

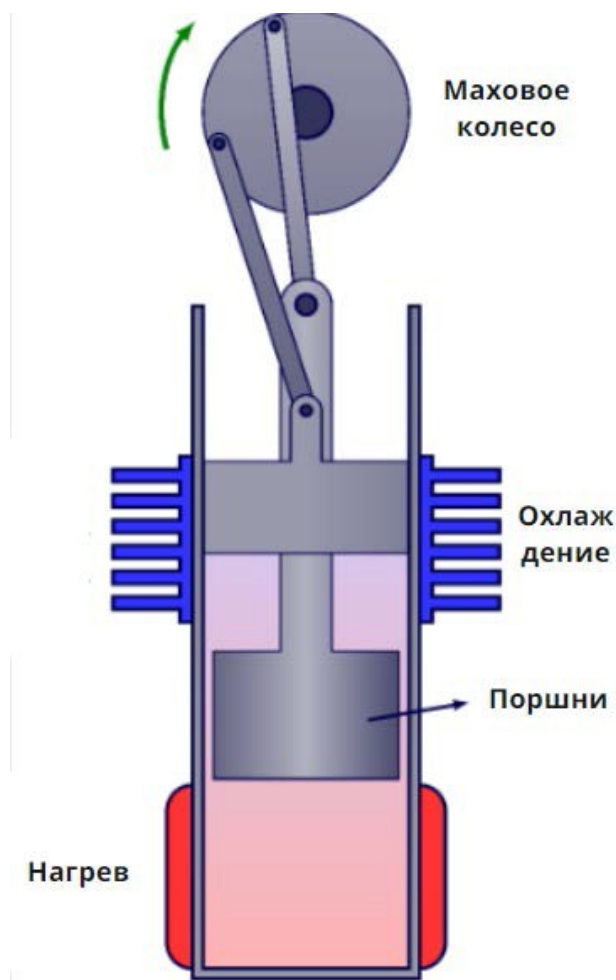


Рис. 2. Двигатель бета типа

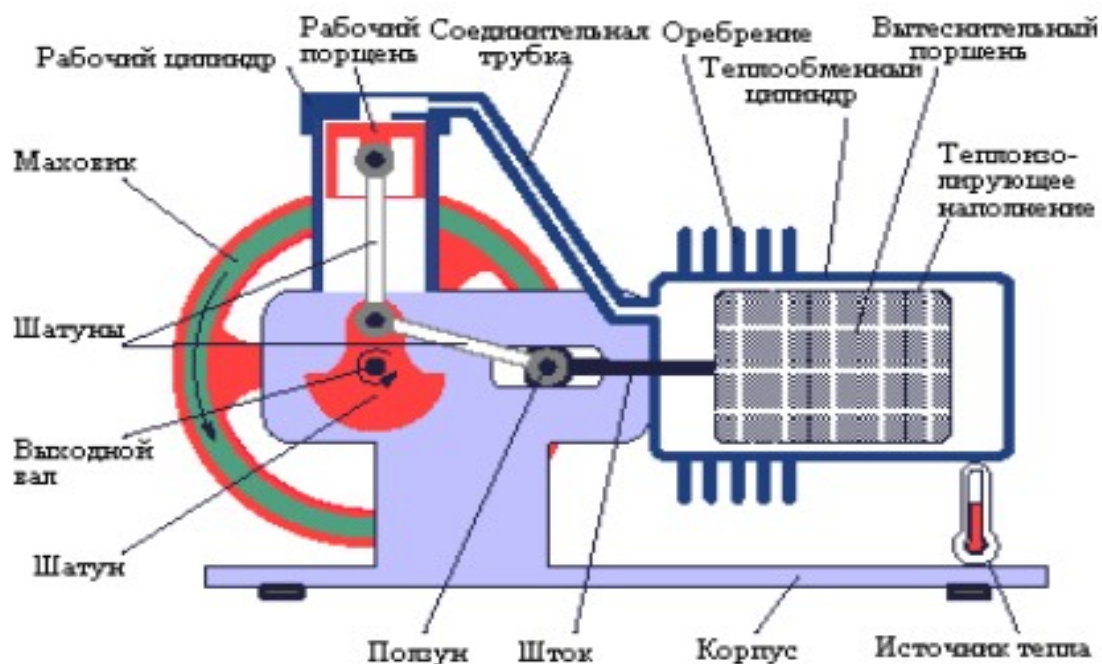


Рис. 3. Двигатель гамма типа

Также существует беспоршневые Стирлинги: роторный и термоакустический.

Применение двигателя Стирлинга:

Кораблестроение – в данной сфере использование двигателя Стирлинга прорабатывают уже больше сотни лет. Первым использовать их на кораблях предложил изобретатель Джон Эриксон, но его опыт оказался неудачным и про это направление забыли на 100 лет. Только после Второй Мировой войны опять начали вести исследования в данной отрасли, создавая двигатели Стирлинга для надводных и подводных судов.

Машиностроение – также с 1950-х годов исследуется возможность установки двигателя Стирлинга на автомобили, такими исследованиями занимались такие крупные фирмы, как «Ford», «BMW» и «General Motors». Они достигли определенных успехов и даже создавали прототипы с двигателями Стирлинга, которые по уровню шума, вибраций и загрязнения превосходили двигатели внутреннего сгорания того времени.

Энергетика – самым перспективным в наше время направлением является создание двигателей Стирлинга для выработки электричества:

- строительство небольших когенерационных энергетических установок с двигателями Стирлинга на разных видах топлива для выработки небольшого количества электроэнергии в труднодоступных местах и для использования в бытовых условиях. [3];

- солнце, как источник тепловой энергии для двигателя Стирлинга. Это более выгодно и перспективно по сравнению с солнечными панелями;

- ядерные реакторы с двигателями Стирлинга разрабатываются в США для питания электричеством будущих лунных баз, орбитальных

станций и на долгоживущих пилотируемых и беспилотных космических аппаратах. В NASA уже созданы прототипы данных установок [4];

– на АЭС и ТЭС при переходе пара в воду в конденсаторе выделяется огромное количество тепла, которое никак не используется, но двигатель Стирлинга может устранить эту проблему и значительно увеличить КПД станции. Если установить двигатель Стирлинга в конденсатор или между им и турбиной, то он будет преобразовывать тепло выделяющееся при конденсации пара и вырабатывать дополнительную энергию. В данный момент главной проблемой для развития данного направления является громоздкость и слабое развитие двигателей Стирлинга. Но если начать финансировать данную сферу развития энергетики, то можно будет увеличить мощность и КПД большей части современных АЭС и ТЭС.

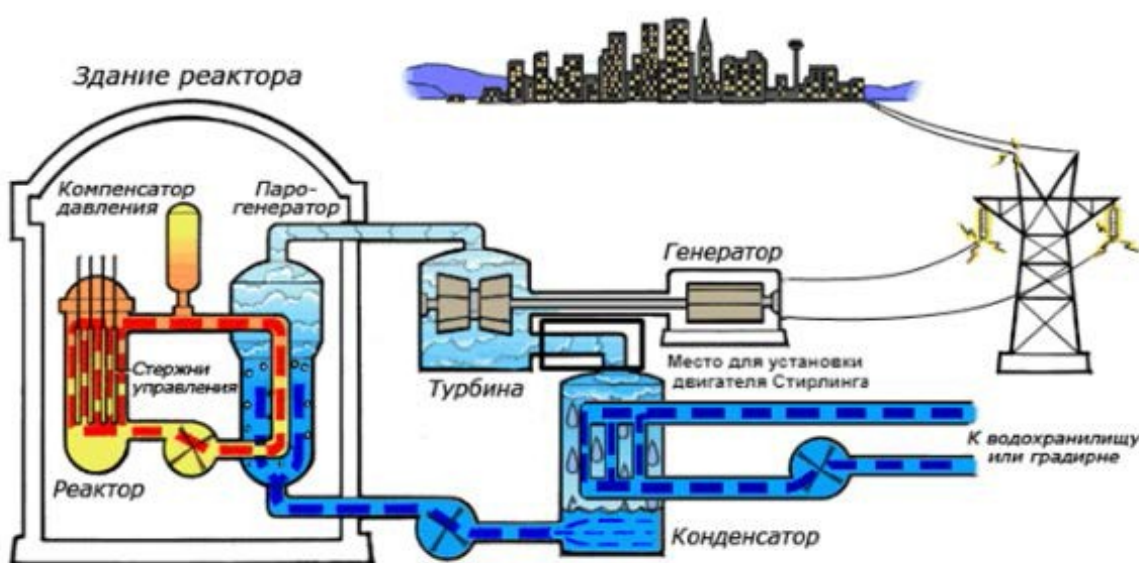


Рис. 4. Пример использования двигателя Стирлинга

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двигатель Стирлинга был изобретен больше 200 лет назад, но до сих пор вызывает интерес у ученых и изобретателей по всему миру. Многие большие компании уже пытаются создать новые энергетические установки с двигателем Стирлинга, пытаются приспособить его для корабле- и машиностроения.

Проанализировав строение, типы двигателя Стирлинга, изучив их достоинства и недостатки, исследовали наиболее успешные места применения двигателей Стирлинга в энергетике и в других отраслях промышленности. Провели ряд исследований по эффективности использования двигателя Стирлинга в энергетике и быту. Мы убедились, что не стоит останавливаться на достигнутом, а необходимо продолжить исследование в данном направлении.

Если человечество дальше будет развиваться в этом направлении, то со временем мы сможем перейти на более доступную и менее вредящую экологии энергию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Двигатель внешнего сгорания Стирлинга своими руками [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rt82.ru/security-objects/dvigatel-vneshnego-sgoraniya-stirlinga-svoimi-rukami-delaem-dvigatel/>. – Дата доступа: 08.05.2023.

2. Двигатель Стирлинга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C\\_%D0%A1%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C_%D0%A1%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B0). – Дата доступа: 08.05.2023.

3. Двигатель Стирлинга: принципы работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://dzen.ru/a/YP\\_r\\_h1hxxsq5te](https://dzen.ru/a/YP_r_h1hxxsq5te). – Дата доступа: 08.05.2023

4. Двигатели Стирлинга – технологический прорыв в автономной энергетике XXI века [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sovmash.com/node/98#:~:text=%D0%92%20%D0%BD%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D1%89%D0%B5%D0%B5%20%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%8F%20%D0%B7%D0%B0%20%D1%80%D1%83%D0%B1%D0%B5%D0%B6%D0%BE%D0%BC,%D0%B2%20%D0%B4%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%B8%D1%85%20%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8F%D1%85%20%D0%B2%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B8>. – Дата доступа: 08.05.2023

ФАКТОРЫ, ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИЕ ОБРАЗОВАНИЕ  
НОРМИРОВАННЫХ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ  
УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА  
FACTORS THAT INTENSIFY THE FORMATION OF RATED  
POLLUTANTS DURING THE COMBUSTION OF HYDROCARBON FUEL

Ярмольчик Ю. П., к-т техн. наук, доцент,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
Yu. Yarmolchick, Candidate of technical Sciences, Associate Professor,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Сжигание углеводородного топлива в камерах сгорания теплогенерирующих установок является одним из основных источников выбросов загрязняющих веществ. В статье рассмотрены факторы, интенсифицирующие образование нормированных загрязняющих веществ, приведены глобальные химические реакции, различные типы механизмов и кинетические схемы.

*Abstract.* The combustion of hydrocarbon fuels in the combustion chambers of heat generating plants is one of the main sources of pollutant emissions. The article considers the factors that intensify the formation of normalized pollutants, presents global chemical reactions, various types of mechanisms and kinetic schemes.

*Ключевые слова:* выбросы, оксиды азота, химические реакции.  
*Key words:* emissions, nitrogen oxides, chemical reactions.

## ВВЕДЕНИЕ

С вступлением в действие в Республике Беларусь с 1 октября 2017 г. экологических норм и правил ЭкоНиП 17.01.06-001-2017 «Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности» [1], остро стал вопрос ограничения вредных выбросов не только в действующих котельных, нормы выбросов которых установлены несколько выше, чем для вновь строящихся, и снижение существующих показателей может быть разрешено устройством на выходе из котлов конденсационных теплоутилизаторов и совершенствованием процессов тепломассопереноса в топках котлов [2], но и для вновь проектируемых котельных установок, нормы выбросов для которых значительно ужесточаются.

В связи с этим для производителей котлов ставится задача оптимального конструирования вновь изготавливаемых установок, а для проектных организаций – качественный выбор предлагаемого на рынке оборудования. Сложность решения поставленной задачи обусловлена прежде всего тем, что производители горелочных устройств однозначно определяют эмисси-

онный класс своих изделий, исходя из замеренных значений при сжигании соответствующих видов топлива в прямоточных топках значительно превышающих размеры свободного факела, имеющих крайне малое аэродинамическое сопротивление и практически полное отсутствие реверсивных потоков [3]. Котлы, имеющие подобные камеры сгорания, обычно именуемые одноходовыми или пролетными, вследствие необходимости дооснащения той или иной системой утилизации теплоты дымовых газов для повышения общего КПД установки [4], используются достаточно редко и главным образом, как энергетические. На рынке отопительных и промышленных котлов в настоящее время предлагаются в основном котлы с двухходовыми реверсивными и трехходовыми проходными камерами сгорания. Дополнительную сложность в однозначном определении уровня выбросов в соответствии с [1] привносит расхождение в принятых условиях и единицах измерения концентрации загрязняющих веществ в ЕС [3] – основном производителе горелочных устройств, а также неполное соответствие химического состава и, как следствие, состава дымовых газов стандартных типов топлива в ЕС и ЕАС. Предлагаемые упрощенные методы пересчета, например, в [5; 6], могут привести к расчетным неточностям и, как следствие, к ошибкам выбора оптимального проектируемого оборудования. Для более точных расчетов необходимо применить комбинированную методику с учетом описанных факторов.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Прежде, чем рассматривать особенности влияния эмиссионного класса горелок на образование вредных выбросов, необходимо определиться собственно с составом дымовых газов и какие загрязняющие вещества следует определить, как объект исследования. Согласно [1] при сжигании газообразного топлива нормируются: углерода оксид (CO), азота оксиды – в пересчете на азота диоксид (NO<sub>x</sub>), диоксид серы (SO<sub>2</sub>); а при сжигании жидкого топлива, – те же вещества плюс твердые частицы.

Рассмотрим факторы, интенсифицирующие образование каждого из нормированных загрязняющих веществ.

Оксид углерода, именуемый также угарным газом, образуется, прежде всего и почти исключительно, вследствие недожога органического топлива за счет неполного окисления углеводородных молекул [7]. Для снижения его количества в дымовых газах увеличивают расход воздуха, поступающего на горение. Именно со снижением образования этого газа связано такое понятие, как коэффициент избытка воздуха. Однако стремление многих наладчиков газогорелочных устройств избавиться полностью от CO путем увеличения объема подаваемого на горение воздуха, приводит к завышению коэффициента избытка воздуха и, как следствие, к снижению технического КПД теплогенерирующего агрегата и в некоторой степени увеличение выброса другого нормируемого загрязняющего вещества – оксидов азота. Заметим также, что, согласно экспериментальным исследова-

ниям [8], процесс превращения углеводородного топлива в конечные продукты сгорания  $H_2O$  и  $CO_2$  разделяют на две стадии: первая – окисление углеводородов до  $CO$  – скорость процессов в высокотемпературной среде (выше  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ) очень высока; вторая – медленная: окисление  $CO$  до  $CO_2$ . Исходя из этого, качественное окисление  $CO$  зависит не только от температуры, но в значительной степени и от времени нахождения в высокотемпературной зоне. Это заключение крайне важно при сравнении процессов, протекающих в реверсивных и проходных камерах сгорания. В условиях реверсивных потоков дымовых газов не только увеличивается средний пробег молекул внутри топки, но и несколько замедляется их скорость за счет приграничных турбулентных взаимопроникновений разнонаправленных периферийных течений – потока горячей топливовоздушной смеси и обратного потока продуктов сгорания [9]. В результате это приводит к значительно более длительному (практически в 2 раза) периоду времени для окисления  $CO$  непосредственно в топке в сравнении с проходными камерами сгорания. При наладочных работах, заключающихся в фиксации определенных соотношений топливо-воздух в регулируемом диапазоне мощности, представленном как производителем котла, так и производителем горелки для каждого типа устройств, такой механизм, как следствие, позволяет существенно снизить избыток воздуха, необходимый для окисления  $CO$  до нормированных значений. При этом коэффициент избытка воздуха будет слабо зависеть от изменения мощности теплогенерирующего агрегата. В проходных же топках, где время, выделяемое для окисления  $CO$  практически пропорционально скорости потока, коэффициент избытка воздуха будет расти с увеличением мощности для данного размера топки. Однако, с другой стороны, современные котлы, в отличие от ранее производимых, имеют, так называемые, «длинные топки» и окисление  $CO$  до нормированных значений происходит уже при количестве  $O_2$  в уходящих газах  $\sim 3\text{--}3,5\%$ , что соответствует вполне приемлемому коэффициенту избытка воздуха до 1,2. Обратим также внимание, что в табл. Е10 [1] для котельных установок номинальной мощностью более 0,1 МВт, введенных в эксплуатацию с 1 января 2019 г., нормы выброса оксида углерода вообще не нормируются – вплоть до мощности установки 25 МВт.

Оксиды азота и, прежде всего, монооксид азота при сжигании топлив, содержащих мало связанного азота, образуются в основном в зоне высоких температур  $\sim 1850\text{ }^\circ\text{C}$  по, так называемому, «механизму Зельдовича» [10]:



который впоследствии [11] был добавлен реакцией:



В совокупности указанные реакции принято называть «расширенным механизмом Зельдовича». Однако, было замечено, что экспериментально



измеренные концентрации  $\text{NO}_x$  в уходящих газах превышают рассчитанные по механизму Зельдовича. Объяснение дополнительного механизма образования оксидов азота связано с наличием в начальной зоне горения радикала  $\text{CN}$ , который реагирует с молекулярным азотом [12]:



Эти реакции называют по имени первооткрывателя «механизмом Фенимора» или, в связи с их протеканием практически исключительно в начальной зоне горения, – «быстрым механизмом». В настоящее время принято считать, что  $\text{NO}$  образовывается из  $\text{NCN}$  в ряде последующих реакций с участием различных радикалов [13].

Т. к. реакции по «быстрому механизму» происходят в начальной зоне горения, то для определения их вклада в общее значение концентрации  $\text{NO}_x$  в уходящих газах, наиболее простым и близким к реальности представляется способ частичного исключения влияния теплового механизма с последующими замерами актуальных значений  $\text{NO}_x$ . Организация горения бедных смесей практически полностью исключает тепловой механизм, особенно при сжигании природного газа. Поэтому, используя этот метод, можно определить концентрацию монооксида азота, образованного по «быстрому механизму», и он широко применяется в газотурбинных установках [14]. Для его реализации в камеру сгорания подается предварительно подготовленная бедная (со значительным превышением коэффициента избытка воздуха) топливо-воздушная смесь. При этом, вследствие избытка балластного газа, температура продуктов сгорания не достигает значений, требуемых для реакций механизма Зельдовича. Однако для снижения общей концентрации оксидов азота именно часть, образованная по «быстрому механизму», является наименее подверженной влиянию применяемых внешних устройств, организующих миксирующие охлаждающие потоки и/или разделение факела, вследствие их протекания исключительно в начальной зоне горения. Кроме вышеописанных механизмов Зельдовича и Фенимора, существенный вклад в общую концентрацию  $\text{NO}_x$  в дымовых газах может вносить низкотемпературный механизм [15], связанный с разложением азотсодержащих компонентов топлива. Но виды топлива, стандартно используемые с дутьевыми горелками, – природный газ и легкое жидкое топливо, обычно в своем составе имеют очень малое количество азота и этот механизм представляется важным при пиролизе и прямом сжигании твердых топлив и вторичных топлив химических предприятий. В любом случае, конструкция горелочных устройств не может сколь либо заметно снизить образование оксидов азота, полученных в результате действия быстрого и низкотемпературного механизмов. Для данных механизмов представляется наиболее эффективным способ снижения  $\text{NO}_x$  в выхлопных газах – их очистка. Для этого наибольшее распространение получили: селективное каталитическое [16] и селективное некаталитическое [17] восстановление, для реализации которых требуется дополнитель-

ное сложное оборудование и значительные капитальные затраты. Таким образом, для обеспечения нормированных значений  $\text{NO}_x$  в дымовых газах отопительных и промышленных котлов при работе с дутьевыми горелками, прежде всего необходимо рассмотреть факторы, влияющие на интенсивность протекания реакций по механизму Зельдовича, поскольку это – единственный механизм, на который можно влиять оптимизируя внутренние потоки в камере сгорания, а также вследствие того, что реакции, протекающие по этому пути вносят наиболее существенный вклад в образование оксидов азота в высокотемпературной зоне. Для этого разделим эту задачу на две: определение эффективных факторов конструкции горелочных устройств, с одной стороны, и конструкции камер сгорания – с другой, а затем объединим их для определения качественной оценки взаимовлияющих процессов и характеристик. Первая часть этой задачи будет рассмотрено в данной статье.

Современные газовые горелочные устройства по генерации вредных выбросов делятся на три эмиссионных класса [3; 18]:

- 1-ый класс –  $\text{CO} \leq 120$  мг/ кВт·ч,  $\text{NO}_x \leq 170$  мг/ кВт·ч;
- 2-ой класс –  $\text{CO} \leq 80$  мг/ кВт·ч,  $\text{NO}_x \leq 120$  мг/ кВт·ч;
- 3-ий класс –  $\text{CO} \leq 60$  мг/ кВт·ч,  $\text{NO}_x \leq 80$  мг/ кВт·ч.

В настоящее время апробированными методами снижения вредных выбросов при сжигании углеводородного топлива являются:

- минимизация коэффициента избытка воздуха с обеспечением полного сгорания топлива;
- внедрение охлаждающих потоков в зону горения (рециркуляция части дымовых газов; впрыск пара, воды и проч.);
- двухступенчатое сжигание топлива (создание первичного и вторичного факела);
- распределение топлива на периферию факела (создание группы периферийных факелов с наименьшим объемом пламенных ядер);
- снижение температуры подогрева воздуха, поступающего на горение.

Последний метод является режимно-технологическим и не может быть реализован исключительно за счет конструкции горелки.

Современными производителями горелочных устройств, вследствие наименьших затрат, в основном в их конструкциях применяются различные смесительные устройства, создающие рециркуляцию дымовых газов в зону горения с минимизацией коэффициента избытка воздуха, и эффективным смешением топлива и окислителя. Распределение топлива на периферию факела значительно улучшает эффект «размытого» температурного поля, что значительно снижает выбросы оксидов азота.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены факторы, интенсифицирующие образование нормированных загрязняющих веществ при сжигании углеводородного топлива.

Проанализированы механизмы образования загрязняющих веществ при сжигании природного газа. Показано, что наиболее существенно на образование  $NO$  в топках котлов влияет тепловой механизм Зельдовича. Определены наиболее эффективные методы и инженерные решения при конструировании горелок низкого эмиссионного класса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Экологические нормы и правила ЭкоНиП 17.01.06-001-2017. Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности. Официальное издание. – Минск: Минприроды, 2017. – 139 с.
2. Гламаздин П. М., Гламаздин Д. П., Ярмольчик Ю. П. Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016;59(3):249-259. – Режим доступа: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-249-259>. – Дата доступа: 30.04.2023.
3. E DIN EN 676:2017-02 (D/E) Erscheinungsdatum: 2017-01-13 Gebläsebrenner für gasförmige Brennstoffe; Deutsche und Englische Fassung FprEN 676:2016
4. Зубарев Д. Н. Коэффициент полезного действия // Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – Т. 2. – С. 484–485. – 704 с.
5. Руководство по формулам для расчета данных в теплотехнике. – Режим доступа: [https://www.weishaupt.ru/service/complex/pdf/1841\\_RU\\_Januar\\_2015.pdf](https://www.weishaupt.ru/service/complex/pdf/1841_RU_Januar_2015.pdf). – Дата доступа: 30.04.2023.
6. The SAACKE mission: most available power at lowest possible emissions. – Режим доступа: [https://www.saacke.com/fileadmin/Media/Documents/pdfs/EN/Addresses\\_and\\_useful\\_things/Faustformeln\\_Pocket-Formula-Guide\\_english.pdf](https://www.saacke.com/fileadmin/Media/Documents/pdfs/EN/Addresses_and_useful_things/Faustformeln_Pocket-Formula-Guide_english.pdf). – Дата доступа: 30.04.2023.
7. Некрасов Б. В. Основы общей химии. – Т. I. – Изд. 3-е, испр. и доп. – Изд-во «Химия», 1973 г. – С. 495–497; 511–513.
8. Корольченко А. Я. Процессы горения. – М.: «Пожнаука», 2007. – 266 с.
9. Есьман, Р. И. Анализ процессов горения в турбулентных смешивающихся осевых и тангенциальных потоках / Р. И. Есьман, Ю. П. Ярмольчик // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика: научно-технический и производственный журнал. – 2009. – N 2. – С. 47–52.
10. Зельдович Я. Б., Садовников П. Я., Франк-Каменецкий Д. А. Окисление азота при горении. – М.-Л.: Издательство АН СССР, 1947. – 148 с.

11. Fenimore C. P., Jones G. W. Nitric Oxide Decomposition at 2200–2400 K // *The Journal of Physical Chemistry*. – American Chemical Society, 1957. – Vol. 61, № 5. – P. 654–657.
12. Fenimore C. P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames // *Symposium (International) on Combustion*. – Elsevier, 1971. – Vol. 13, № 1. – P. 373– 80.
13. Lamoureux N., Desgroux P., El Bakali A., Pauwels J. F. Experimental and numerical study of the role of NCN in prompt-NO formation in low-pressure CH<sub>4</sub>–O<sub>2</sub>–N<sub>2</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>–O<sub>2</sub>–N<sub>2</sub> flames // *Combustion and Flame*. – Elsevier, 2010. – Vol. 157, № 10. – P. 1929–1941.
14. Lehto, Steve. Chrysler's turbine car: the rise and fall of Detroit's coolest creation. – Chicago, IL: Chicago Review press, 2010. – 228 p.
15. Glarborg E.A, Fuel nitrogen conversion, NY: Elsevier, 2003, P. 91.
16. Котлер В. Р. Селективное каталитическое восстановление. – Режим доступа: <http://osi.ecopower.ru/ru/2010-10-18-10-35-22/item/83-1131>. – Дата доступа: 30.04.2023.
17. Котлер В. Р. Селективное некаталитическое восстановление. – Режим доступа: <http://osi.ecopower.ru/ru/2010-10-18-10-35-22/item/85-1132>. – Дата доступа: 30.04.2023.
18. Regulation (EU) 2016/426 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2016 on appliances burning gaseous fuels and repealing Directive 2009/142/EC

АЭС-ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ДАЛЬНЕГО  
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ  
NUCLEAR POWER PLANTS-POTENTIAL SOURCES OF LONG-RANGE  
HEAT SUPPLY

Тарасевич Л. А., к-т техн. наук, доцент; Нагорнюк М. Ю.,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
L. Tarasevich, Candidate of technical Sciences, Associate Professor;  
M. Naharniuk,  
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* В данной статье рассматривается эффективность АЭС как источник теплоснабжения.

*Abstract.* This article discusses the efficiency of nuclear power plants as a source of heat supply.

*Ключевые слова:* АЭС, теплоснабжение, теплопотребитель, тепловая энергия.

*Key words:* NPP, heat supply, heat consumer, thermal energy.

## ВВЕДЕНИЕ

Так как большинство конденсационных электростанций были переведены в режим работы ТЭЦ. Можно предположить, что атомные электростанции в будущем будут также использоваться как мощные источники теплоснабжения, что предполагает значительную экономию финансовых ресурсов.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для прогресса энергетики участие АЭС для централизованного теплоснабжения в населенных пунктах является актуальным.

Обычно, при сооружении АЭС предполагается отпуск тепла только для промышленной зоны и прилегающего населенного пункта. Но в теории, если увеличить мощность теплофикационных установок, то можно присоединить дополнительных потребителей теплоты.

При использовании АЭС, как источника теплоснабжения, рассматриваются следующие условия: осуществимость совместной работы действующих ТЭЦ и крупных котельных, схем подключения АЭС и котельных, выбор схемы отпуска теплоты потребителю и т. д.

Эффективность станции, используемой для теплоснабжения, характеризуется расстоянием потребителей от станции и условиями передачи теплоты. В данной системе теплоснабжения, основной источник находится на большом расстоянии от потребителей, а пиковый – в районе теплопотребления. В таком случае, подключение потребителей идет к тепловым сетям.

В результате исследований было выявлено, что максимальное экономически выгодное расстояние передачи теплоты от АЭС до пиковой котельной, находящейся в районе теплопотребления, зависит от ряда причин, но в большей мере – от системы транспорта теплоты, вида топлива, тип турбин. Также по результатам было установлено, что независимо от типа АЭС (двухконтурной либо одноконтурной) для теплоснабжения потребителей рационально и экономически рентабельно в диапазоне 50–100 км.

Проблем с отпуском тепловой энергии для двухконтурной АЭС практически не существует.

Однако, использование одноконтурных АЭС требует определенных условий:

Приобретение промышленного оборудования большей тепловой производительностью, в том числе водо-водяных теплообменников, что повлечет за собой дополнительные затраты.

Анализируя работу одноконтурных и двухконтурных АЭС, необходимо решить задачу по сохранению электрической мощности и повышению тепловой мощности. Это достигается следующими путями:

– использование дополнительного пара реактора (для одноконтурной АЭС) или парогенератора (для двухконтурной АЭС) для повышения температуры воды в бойлерах промежуточного контура или бойлерах теплосети;

– повышение количества пропускаемого пара через цилиндры высокого давления турбин за счет запасов по пропускной способности парораспределения и проточной части с одновременной организацией отбора пара за ЦВД для подогрева сетевой воды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая вышеизложенное, эффективность привлечения АЭС для теплоснабжения зависит от различных факторов, которые необходимо учитывать при разработке технико-экономических обоснований реконструкции станции.

Передача большего количества теплоты от АЭС допускается от реактора или парогенератора при условии наличия промежуточного контура или с помощью комбинированного цикла выработки электроэнергии и отпуска теплоты от турбоустановок атомных станций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ковылянский Я. А., Свичар А. Е. Централизованное теплоснабжение с использованием ядерных источников. – Теплоэнергетика, 1981.
2. Воронина Л. М. Атомные электрические станции. – М., 1979.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРИ  
ПЕРЕСЧЕТЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ  
DETERMINATION OF THE CORRECTION FACTOR FOR  
RECALCULATION OF EMISSIONS OF RATED POLLUTANTS

Айдарова З. Б., Рыжова Т. В., к-т техн. наук; Ярмольчик М. А.,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
Z. Aidarova, T. Ryzhova, Candidate of technical Sciences; M. Yarmolchik  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Приведена методика расчета выбросов оксидов азота в зависимости от условий измерения. Получены коэффициенты пересчета значений выбросов загрязняющих веществ из принятых единиц в ЕС (мг/ кВт·ч) в единицы, указанные по экологическим правилам ЕАС (мг/м<sup>3</sup>) с учетом соответственно нормируемого коэффициента избытка воздуха.

*Abstract.* A method for calculating emissions of nitrogen oxides depending on the measurement conditions is given. Conversion factors for pollutant emissions from accepted units in the EU (mg/kWh) to units specified in accordance with the EAC environmental rules (mg/m<sup>3</sup>) are obtained, taking into account the correspondingly normalized excess air coefficient.

*Ключевые слова:* выбросы, оксиды азота, коэффициент пересчета.

*Key words:* emissions, nitrogen oxides, conversion factor.

## ВВЕДЕНИЕ

Отметим, что производители горелок по стандарту EN DIN [1] определяют количественные значения концентрации загрязняющих веществ на выходе из камеры сгорания в мг/ кВт·ч для сухих газов при влажности воздуха, поступающего на горение  $d = 10$  г/кг [2]. Эти единицы (мг/ кВт·ч) выбраны потому, что при их использовании количество загрязняющих веществ относится к единице выработанной тепловой энергии и, в таком случае, не имеет значения при стехиометрическом или нестехиометрическом горении производятся измерения, т. е. количество O<sub>2</sub> в дымовых газах учитывать не требуется. На первый взгляд подобный подход кажется верным. Действительно, с увеличением избытка воздуха увеличивается объем выбросов, но при этом уменьшается средняя температура уходящих газов. Теплоемкость же CO<sub>2</sub> [3] и H<sub>2</sub>O [4] – основных компонентов дымовых газов – в диапазоне температур устойчивого горения изменяется незначительно, и количество теплоты, определенное как произведение средней температуры и объема, остается близким к неизменному при разных значениях коэффициента избытка воздуха. В Республике Беларусь и в странах СНГ показатели выбросов определяются в мг/м<sup>3</sup>. Такие единицы непосредственно зависят от объема выбросов. В результате возникает задача одно-

значного пересчета указанных единиц. Для этого требуется задаться дополнительным значением – либо коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ , либо объемной концентрацией кислорода  $K_{V_{O_2}}$  в дымовых газах. Т. к. качественное сжигание топливовоздушной смеси современными дутьевыми горелками с наименьшими тепловыми потерями с уходящими газами возможно при  $\alpha \sim 1,15 \dots 1,20$ , что соответствует концентрации кислорода  $K_{V_{O_2}} \sim 2,8 \dots 3,5 \%$ , то производители горелок установили удобное правило пересчета для среднего целого фиксированного значения  $K_{V_{O_2}} = 3 \%$  [5]. Но для полной однозначности требуется также иметь коэффициент прямого пересчета  $\text{мг/кВт}\cdot\text{ч}$  в  $\text{мг/м}^3$ . Для этого обычно указывается обратный коэффициент  $f$ , значение которого по разным источникам варьируется, например,  $f = 1,001$  [5] или  $f = 1,164$  [6] для природного газа класса E (H) и  $f = 1,018$  для природного газа класса L (LL) [5] при  $K_{V_{O_2}} = 3 \%$  или  $f = 0,857$  при  $K_{V_{O_2}} = 0 \%$  [7]. Условия нахождения коэффициента пересчета при этом не оговариваются. Более того, эмпирически удобное, но нелегитимное для прямых расчетов установление  $K_{V_{O_2}} = 3 \%$  в информационно-справочных каталогах производителей горелок [5] приводит к получению не совсем точных расчетных значений коэффициентов пересчета. Это связано, прежде всего, с тем, что в Европейских странах очень часто используются смешанные горючие газы различного происхождения.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для природных газов теоретически необходимый объем воздуха на горение можно рассчитать по сокращенной формуле:

$$V_e^T = \frac{1}{V_{O_2}^0} \left[ \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right], \quad (1)$$

где  $V_{O_2}^0 = 20,946$  – объемная концентрация кислорода в атмосферном воздухе [8];

$C_m H_n$  – углеводороды, входящие в состав газа;

$m$  и  $n$  – индексы углеводорода соответственно по углероду и водороду;

$O_2$  – объемная концентрация кислорода в горючем газе.

Для технологических и искусственных горючих газов, где присутствуют  $CO$ ,  $H_2$  и  $H_2S$ :

$$V_e^T = \frac{1}{V_{O_2}^0} \left[ 0,5(CO + H_2) + 1,5H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right]. \quad (2)$$

Производители дутьевых горелок определяют концентрацию вредных выбросов при остаточном кислороде  $K_{V_{O_2}} = 3 \%$ , что соответствует



$\alpha = 1,167$ . Но вопрос для поставленной задачи заключается не в том, чтобы определить коэффициент пересчета для данного конкретного значения кислорода в дымовых газах, а в том, чтобы определить лимитирующие показатели выбросов для того или иного эмиссионного класса горелок. Хотя показания в мг/ кВт·ч действительно практически не зависят от количества кислорода в дымовых газах, но, т. к. с ростом избытка воздуха будет увеличиваться и объем отходящих газов, коэффициент пересчета в мг/м<sup>3</sup> будет также увеличиваться. Если нам понадобится определить коэффициент пересчета при остаточном содержании кислорода в дымовых газах  $K_{V_{O_2}} = X\%$ , то расчет надо отнести к объему воздуха на горение увеличенному на коэффициент избытка воздуха:

$$V_{\text{в-при-O}_2=X\%}^R = V_{\text{в}}^T \cdot \frac{V_{O_2}}{V_{O_2} - K_{V_{O_2}}} = \alpha \cdot V_{\text{в}}^T. \quad (3)$$

После нахождения этой величины, казалось бы, можно вычислить коэффициент пересчета тепловых единиц в объемные. Однако в применяемых стандартных газоанализаторах, чтобы влага дымовых газов (а в ней растворен NO<sub>2</sub>, что придает ей некоторую степень агрессивности) из взятой пробы не попала на чувствительный элемент, ее конденсируют и сливают. В результате показания газоанализатора относятся к сухим дымовым газам. Вследствие этого, необходимо рассчитать объем сухих продуктов сгорания. Для этого удобнее найти сначала количество влаги в дымовых газах:

$$V_{H_2O}^{O_2=X\%} = 0,01 \left( \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,1 \frac{\rho_{\text{в}}^0}{\rho_{H_2O}^0} RH \times V_{\text{в-при-O}_2=X\%}^R \right), \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{в}}^0 = 1,293 \text{ кг} / \text{м}^3$  – плотность сухого воздуха при нормальных условиях;

$\rho_{H_2O}^0 = 0,840 \text{ кг} / \text{м}^3$  – плотность водяного пара при нормальных условиях;

$RH$  – относительная влажность воздуха, г/кг;

0,01 – коэффициент пересчет содержания ингредиентов % → доли;

0,01×0,1 = 0,001 – коэффициент пересчета кг → г.

Т. к. мы определили удельный теоретический объем воздуха на горение, то для нахождения удельного объема дымовых газов прибавим 1 м<sup>3</sup> (т. е. объем горючего газа). Тогда объем сухих продуктов сгорания:

$$V_{\text{с.г.-при-O}_2=X\%}^R = \left( V_{\text{в-при-O}_2=X\%}^R + 1 \right) - V_{H_2O}^{O_2=X\%}. \quad (5)$$

Для расчета принимаем условия относительной влажности воздуха в соответствии с принятыми в [5]:  $RH = 10 \text{ г/кг}$ . В результате для пересчета мг/ кВт·ч в мг/м<sup>3</sup> находим обратный коэффициент:

$$f = \frac{3,6}{\frac{Q_p^H}{V_{с.г. при O_2=X \%}^R}}, \quad (6)$$

где 3,6 – коэффициент пересчета кВт·ч→МДж.

Применяя такой метод пересчета можно получить значения выбросов загрязняющих веществ в мг/м<sup>3</sup>, если лимитирующие значения указаны в мг/ кВт·ч, но специально оговорено при каком значении остаточного кислорода или коэффициенте избытка воздуха. Действительно, при подтверждении сертификата эмиссионного класса для конкретного типа горелочных устройств квалификационные испытания проводятся при избытке воздуха для полного сгорания топлива. Для качественной горелки этот избыток и будет составлять ~3 % кислорода в дымовых газах. А т. к. мг/ кВт·ч относится к выделенному теплу, то и значения концентраций в этих единицах практически не будут зависеть от содержания кислорода. Поэтому не требуется никакого пересчета на стехиометрические параметры и производители горелок обоснованно утверждают те значения кислорода, которые были замерены при квалификационных испытаниях.

В результате можно определить предельные значения вредных выбросов в мг/м<sup>3</sup> для того или иного типа горелок, получивших Европейскую классификацию в мг/ кВт·ч для конкретного состава горючего газа, подставляя в формулы (3–6) значение  $K_{V_{O_2}} = 3 \%$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены факторы, определяющие расчетные значения нормированных загрязняющих веществ при сжигании углеводородного топлива. Проанализированы коэффициенты пересчета загрязняющих веществ при сжигании природного газа. Предложен оптимальный метод определения предельных значений вредных выбросов в мг/м<sup>3</sup> при указанных значениях производителями горелочных устройств по Европейской классификации в мг/ кВт·ч.

## ЛИТЕРАТУРА

1. E DIN EN 676:2017-02 (D/E) Erscheinungsdatum: 2017-01-13 Gebläsebrenner für gasförmige Brennstoffe; Deutsche und Englische Fassung FprEN 676:2016
2. Der Arbeitsausschuss NA 041-01-63 AA "Gasbrenner mit Gebläse (SpA CEN/TC 131)"
3. Вукалович М. П., Алтунин В. В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. – М.: Атомиздат, 1965. – 456 с.
4. Александров А. А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики : справочник / А. А. Александров, К. А. Орлов, В. Ф. Очков. – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – 224 с.

5. Руководство по формулам для расчета данных в теплотехнике. – Режим доступа: [https://www.weishaupt.ru/service/complex/pdf/1841\\_RU\\_Januar\\_2015.pdf](https://www.weishaupt.ru/service/complex/pdf/1841_RU_Januar_2015.pdf). – Дата доступа: 30.04.2023.

6. BREEAM International 2013 manual. – Режим доступа: [http://www.breeam.com/BREEAMInt2013SchemeDocument/content/12\\_pollution/pol\\_02.htm](http://www.breeam.com/BREEAMInt2013SchemeDocument/content/12_pollution/pol_02.htm). – Дата доступа: 30.04.2023.

7. "Air Composition". The Engineering ToolBox. – Режим доступа: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d\\_212.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d_212.html). – Дата доступа: 30.04.2023.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ ПОДОГРЕВА СЕТЕВОЙ ВОДЫ  
ДЛЯ ТЭЦ  
IMPROVEMENT OF NETWORK WATER HEATING SCHEMES FOR TPP

Тарасевич Л. А., к-т техн. наук, доцент; Сытая М. Д.,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
L. Tarasevich, Candidate of technical Sciences, Associate Professor; M. Sytay,  
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* В статье рассматриваются наиболее эффективные схемы подключения сетевых подогревателей и производится их сравнение по эффективности.

*Abstract.* The article discusses the most efficient schemes for connecting network heaters and compares them in terms of efficiency.

*Ключевые слова:* сетевой подогреватель, схема, температурный график, повышение эффективности.

*Key words:* network heater, scheme, temperature graph, efficiency increase.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение расчетных температур сетевой воды в системах теплоснабжения от ТЭЦ за счет размещения аппаратов пиковой мощности на территории ТЭЦ не является экономически целесообразным, так как применение данного способа ведет к использованию специальных схем присоединения потребителей (с баками-аккумуляторами, смесительными насосами, специальной автоматикой и т. д.). Это приводит к увеличению стоимости постройки тепловых пунктов. По такому же принципу обосновывается и нецелесообразность повышения температурного графика в тепловых сетях от пиковых котельных, которые сооружаются вблизи тепловых пунктов.

Исходя из этого появилась необходимость в поиске других путей решения данной проблемы.

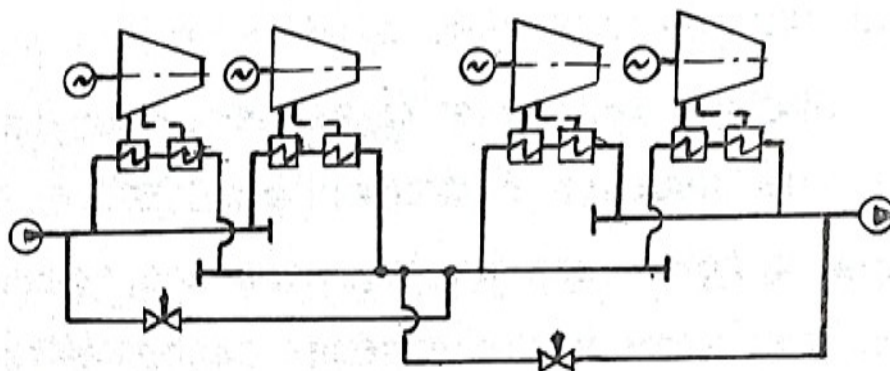
## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Повышение расчетных температур в тепловых сетях от ТЭЦ до пиковых котельных определяется следующими факторами: снижение располагаемой мощности турбин ТЭЦ, уменьшение выработки электроэнергии, экономия капиталовложений.

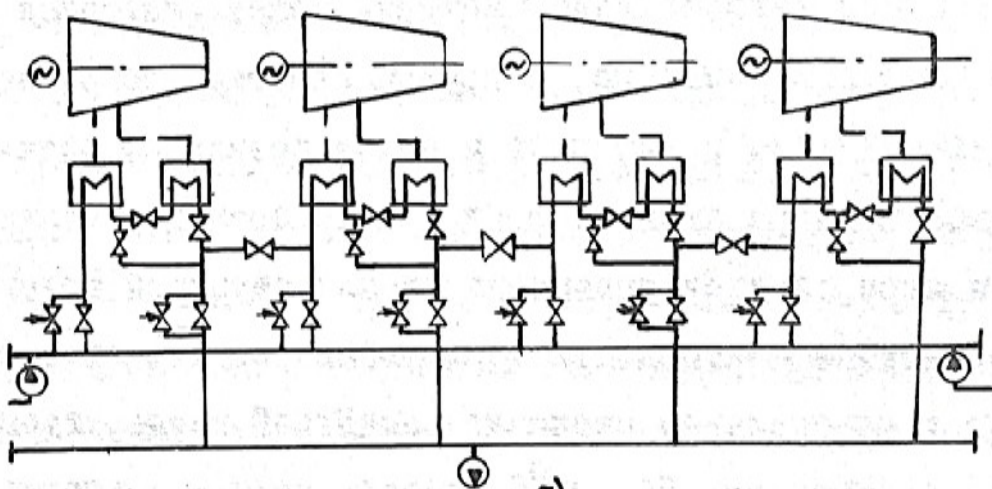
Повышение температурного графика для закрытых систем теплоснабжения (рассматриваем теплофикационные турбины типа Т) приводит к уменьшению расхода сетевой воды, вплоть до снижения ниже номинального значения. А при сокращении расхода сетевой воды в два раза и более возможно использовать последовательную схему подключения сетевых подогревателей турбин ТЭЦ. Увеличивая число ступеней подогрева сете-

вой воды, КПД цикла растет. При оптимальном значении расчетной температуры (180–190 °С) расход воды в тепловых сетях уменьшается в 1,5–2 раза, следовательно из выше сказанного при параллельной схеме подключения расход воды через сетевые подогреватели ниже номинального, а при последовательной – выше максимального.

В современное время применяется параллельная схема включения сетевых подогревателей турбин по нагреваемой воде, а также разработаны смешанная и универсальная схемы.



*a*



*б*

Рис. схема включения сетевых подогревателей:  
*a* – смешанное включение; *б* – универсальная схема

Из рис. видно, что в схеме *a* сетевые подогреватели подключены последовательно-параллельно, предусматривая оптимальные расходы воды через сетевые подогреватели каждой турбины. Но нужно учитывать, что использование такой схемы не допустимо без использования дополнительной запорной арматуры между регулируемыми байпасами.

Рассматривая схему *б* можно сказать, что она спроектирована с учетом блочной компоновки оборудования. Позволяет использовать макси-

мальное количество возможных способов включения: параллельное, последовательно-параллельное, последовательное, двух- и одноступенчатые подогрев при любых схемах включения сетевых подогревателей, в следствии чего называем эту схему универсальной. Она позволяет осуществлять наиболее эффективное подключение сетевых подогревателей в зависимости от расхода воды.

Важно сказать, что подогрев сетевой воды по схеме *a* по эффективности можно приравнять к схеме *б* при условии последовательно-параллельного включения.

После проведения ряда расчетов схемы *б* для оценки эффективности можем говорить о том, что ее внедрение позволяет работать системе теплоснабжения с пониженным расходом теплоносителя в сетях между ТЭЦ и пиковой котельной. Так же эти расчеты дали понять, что последовательное включение сетевых подогревателей более, чем двух турбин остается эффективным только при условии увеличения их пропускной способности по воде.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из всего выше сказанного, можно сделать вывод, что модернизация и улучшение систем теплоснабжения дает возможность с наибольшей эффективностью использовать установленное на ТЭЦ оборудование. Разработанная схема подогрева сетевой воды является универсальной и позволяет использовать все необходимые проекты включений сетевых подогревателей и способы подогрева.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Своик П. В. Оптимизация схем включения сетевых подогревателей современных теплофикационных установок. – М., 1984.
2. Пик М. М., Смирнов И. А., Ермаков Р. Л. Выбор температурного графика регулирования отпуска тепла в системах централизованного теплоснабжения. – Теплоэнергетика, 1974.

**Экономика  
и организация  
энергетики**

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ СРЕДСТВ В СООТВЕТСТВИИ С  
НАЦИОНАЛЬНЫМИ И МЕЖДУНАРОДНЫМИ СТАНДАРТАМИ:  
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА  
VALUATION OF FIXED ASSETS IN ACCORDANCE WITH NATIONAL  
AND INTERNATIONAL STANDARDS: COMPARATIVE  
CHARACTERISTICS

Петрусевиц В. И., Невдах С. В., ст. преподаватель,  
Полесский государственный университет, г. Пинск, Беларусь  
V. Petrusevich, S. Nevdakh, Senior Lecturer,  
Polesky State University, Pinsk, Belarus

*Аннотация.* В данной статье рассмотрена оценка основных средств в соответствии с национальными и международными стандартами финансовой отчетности, отмечены сходства и выявлены различия в определении стоимостей, в частности амортизируемой и ликвидационной стоимостей

*Abstract.* This article examines the valuation of fixed assets in accordance with national and international financial reporting standards, notes similarities and identifies differences in the definition of costs, in particular amortised and liquidation costs, gives a recommendation for calculating the amortised cost of fixed assets.

*Ключевые слова:* оценка, основные средства, международные стандарты финансовой отчетности, амортизируемая стоимость, ликвидационная стоимость.

*Key words:* valuation, fixed assets, international financial reporting standards, amortised cost, liquidation value.

## ВВЕДЕНИЕ

Национальные стандарты, законы и другие нормативно-правовые акты призваны регулировать ведение бухгалтерского учета в пределах одной страны, наиболее полно отражая специфику законодательства и экономической ситуации. Однако мы находимся на этапе глобализации, необходимости взаимодействия с иностранными организациями. В таком случае для полного понимания и налаживания контактов необходим универсальный язык общения. И международные стандарты финансовой отчетности являются таким универсальным языком. Благодаря им пользователь информации из любой точки мира может ознакомиться с финансовым положением организации, что способствует привлечению инвестиций в страну.



## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Категории, используемые для оценки основных средств крайне важны. Поэтому проведем анализ стоимостей, используемых в учете основных средств в соответствии с международными и национальными стандартами учета, чтобы определить, насколько национальные стандарты приблизились к международным стандартам финансовой отчетности (табл1).

Таблица

Сравнительная характеристика МСФО и НСБУ в части стоимостной оценки основных средств

Международные стандарты	Национальные стандарты	Характер отличия
Балансовая стоимость – сумма, в которой актив признается после вычета сумм накопленной амортизации и накопленных убытков от обесценения [3].	Остаточная стоимость – разница между первоначальной (переоцененной) стоимостью основного средства и накопленными по нему за весь период эксплуатации суммами амортизации и обесценения [2].	По существу, определения одинаковы, отличие только в формулировке.
Первоначальная стоимость – сумма, уплаченных денежных средств или их эквивалентов или справедливая стоимость другого возмещения, переданного с целью приобретения актива, на момент его приобретения или сооружения, или, когда это применимо, сумма, отнесенная на данный актив при его первоначальном признании в соответствии с конкретными требованиями других МСФО [3].	Первоначальная стоимость – стоимость, по которой актив принимается к бухгалтерскому учету в качестве основного средства [2].	Определения по МСФО больше раскрывает сущность первоначальной стоимости, имеет уточнения об эквивалентах денежных средств, о других затратах, относимых на стоимость основного средства. Определение по НСБУ не дает такой конкретики. По существу определения подобны друг другу, т. к. далее в инструкции № 26 раскрываются составляющие первоначальной стоимости основного средства.
Амортизируемая величина – первоначальная стоимость актива или другая сумма, принимаемая за первоначальную стоимость, за вычетом его ликвидационной стоимости [3].	Амортизируемая стоимость – стоимость, от которой рассчитываются амортизационные отчисления, является – первоначальная стоимость объектов с учетом ее последующих переоценок в соответствии с законодательством;	Отличие состоит в том, что в целях МСФО та сумма, которая будет получена от выбытия амортизируемого актива, т. е. ликвидационная стоимость, в расчете ежемесячной амортизации не учитывается.

Международные стандарты	Национальные стандарты	Характер отличия
	– недоамортизированная (остаточная) стоимость объектов с учетом ее последующих переоценок в соответствии с законодательством [1].	
Стоимость, специфичная для организации – приведенная стоимость денежных потоков, которые организация ожидает получить от продолжения использования актива и от его выбытия в конце срока полезного использования или выплатить при погашении обязательства [3].	Ценность использования основного средства – приведенная (дисконтированная) стоимость будущих денежных потоков от использования основного средства и его выбытия по окончании срока полезного использования [2].	Данные категории схожи, но в термин МСФО более широк для использования, т. к. учитывает не только основные средства, но и обязательства.
Справедливая стоимость – цена, которая была бы получена при продаже актива или уплачена при передаче обязательства в ходе обычной сделки между участниками рынка на дату оценки [3].	Текущая рыночная стоимость – сумма денежных средств, которая была бы получена в случае реализации основного средства в текущих рыночных условиях [2].	По существу определения одинаковы, отличаются только формулировкой.
Убыток от обесценения – сумма, на которую балансовая стоимость актива превышает его возмещаемую стоимость [3].	Сумма обесценения основного средства – сумма превышения остаточной стоимости основного средства над его возмещаемой стоимостью, при наличии документального подтверждения признаков обесценения основного средства и возможности достоверного определения суммы обесценения [2].	Определения схожи, но определение по НСБУ имеет важное уточнение, что обесценение основного средства должно быть подтверждено документально и величина обесценения достоверно определена.
Возмещаемая стоимость – большее из двух значений: справедливой стоимости актива за вычетом затрат на продажу или ценности его использования [3].	Возмещаемая стоимость – наибольшая из текущей рыночной стоимости основного средства за вычетом предполагаемых расходов, непосредственно связанных с его реализацией, и ценности использования основного средства [2].	Определения одинаковы, но используются синонимы соответствующих стандартов.

Международные стандарты	Национальные стандарты	Характер отличия
Ликвидационная стоимость – расчетная сумма, которую организация получила бы на текущий момент от выбытия актива после вычета расчетных затрат на выбытие, если бы состояние данного актива и срок его службы были такими, какие ожидаются по окончании срока его полезного использования [3].	Амортизационная ликвидационная стоимость – оценочная величина в текущих ценах, которую организация планирует получить от реализации объекта основных средств или нематериальных активов, за вычетом предполагаемых затрат, связанных с их реализацией, в конце устанавливаемого срока полезного использования указанного объекта [1].	Отличия в формулировке, по существу определения одинаковы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проанализировав оценки основных средств в национальных нормативно-правовых актах и международных стандартах финансовой отчетности можно отметить, что в целом они не имеют существенных различий. Так, например, балансовая стоимость в белорусской практике представлена остаточной стоимостью, справедливая стоимость соответствует текущей рыночной стоимостью, убыток от обесценения – сумме обесценения основного средства, первоначальная и возмещаемая стоимости идентичны, разница лишь в формулировке. Ценность использования в белорусской практике аналогична стоимости, специфичной для организации, которая представляет собой приведенную стоимость будущих денежных потоков от использования основного средства и его выбытия по окончании срока полезного использования.

Однако отличие состоит в определении амортизируемой стоимости. В МСФО есть четкое определение, что это первоначальная стоимость актива или другая сумма, принимаемая за первоначальную стоимость, за вычетом его ликвидационной стоимости. В свою очередь, ликвидационная стоимость представляет собой сумму средств, которую организация предполагает получить при выбытии актива по истечению срока полезного использования. Другими словами, организация амортизирует только ту часть стоимости объекта, которую не возместит себе при его выбытии. В то время как в соответствии с национальной практикой учета основных средств за амортизируемую принимается либо первоначальная, либо остаточная стоимость. Однако в таком случае организация амортизирует даже ту часть стоимости, которую компенсирует при списании основного средства, тем самым завышая себестоимость производимой продукции. Такой подход может быть оправдан в случае, если ликвидационная стоимость незначительна или равна нулю, что часто

бывает на практике. Однако если это не так, то стоит рассчитывать в соответствии с методикой, предлагаемой МСФО. Такой подход согласно Инструкции о порядке начисления амортизации основных средств и нематериальных активов № 37/18/6 (в ред. от 25 ноября 2022 г. № 16/53/97) организация не обязана, но вправе применять, что позволит снизить себестоимость и увеличить прибыль от реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Инструкции о порядке начисления амортизации основных средств и нематериальных активов [Текст]: постановление Мин. экономики Респ. Беларусь, Мин. финансов Респ. Беларусь, Мин. архитектуры и строительства Респ. Беларусь от 27 февр. 2009 г. № 37/18/6.

2. Об утверждении Инструкции по бухгалтерскому учету основных средств и признании утратившими силу некоторых постановлений и отдельных структурных элементов постановлений Министерства финансов Республики Беларусь по вопросам бухгалтерского учета [Текст]: постановление Мин. финансов Респ. Беларусь от 30 апр. 2012 г. № 26.

3. О введении в действие на территории Республики Беларусь Международных стандартов финансовой отчетности и их Разъяснений, принимаемых Фондом Международных стандартов финансовой отчетности [Текст]: постановление Сов. министров Респ. Беларусь и Нац. Банка Респ. Беларусь от 19 авг. 2016 г. № 657/20.

УДК 628.3

СОВРЕМЕННОЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ  
ТРАНСФОРМАЦИИ  
MODERN URBAN PLANNING UNDER THE CONDITIONS OF DIGITAL  
TRANSFORMATION

Данатаров С., к-т техн. наук; Атаева Г. Э., преподаватель,  
Туркменский государственный архитектурно-строительный институт,  
г. Ашхабад, Туркменистан  
S. Danatarov, Candidate of Technical Sciences; G. Atayeva, Lecture,  
Turkmen State Architecture and Construction Institute,  
Ashgabat, Turkmenistan

*Аннотация.* В статье рассматривается важность поэтапного и комплексного возведения и сдачи в эксплуатацию в Туркменистане ряда многофункциональных, современных зданий. Показывается выбор самых совершенных видов внутренних инженерных систем для обеспечения наибольшего комфорта в этих зданиях, надлежащей установки в этих системах современного сантехнического оборудования, управления этим оборудованием посредством цифровой системы, а также изучаются некоторые проблемы, возникающие в связи с этими процессами.

*Abstract.* The article discusses the importance of a phased and comprehensive construction and commissioning of a number of multifunctional, modern buildings in Turkmenistan. It shows the choice of the most advanced types of internal engineering systems to ensure the greatest comfort in these buildings, the proper installation of modern plumbing equipment in these systems, the control of this equipment through a digital system, and some problems arising in connection with these processes are also studied.

*Ключевые слова:* инновационные технологии, ресурсосбережение, цифровая система, инженерные системы, умный дом.

*Key words:* innovative technologies, resource saving, digital system, engineering systems, smart home.

## ВВЕДЕНИЕ

Облик нашей Отчизны, в особенности ее беломраморной столицы – города Ашхабада, становится все краше год от года благодаря последовательно строящимся и сдаваемым в эксплуатацию жилым домам, культурно-бытовым и общественным объектам и промышленным предприятиям производственного назначения. Примечательно, что основную долю новостроек составляют жилые массивы. Наглядным свидетельством обеспечения высокого уровня жизни и благополучия народа в нашей стране являются современные жилые комплексы «Чоганлы», «Парахат-7» и «Парахат-8», построенные параллельно в рамках 11-ой, 12-ой, 13-ой, 14-ой, 15-

ой и 16-ой очередей развития города Ашхабада. В жилом массиве «Чоганлы», расположенном в этрапе Багтыярлык города Ашхабада, были торжественно открыты и сданы в эксплуатацию объекты очередного этапа коттеджного комплекса имени Бердымухамеда Аннаева Министерства внутренних дел Туркменистана. Таким образом, со строительством и вводом в эксплуатацию новых очередей современных жилых домов архитектурно-строительный комплекс города Ашхабада пополнился новостройками. Застройка северной части города Ашхабада в настоящее время развивается быстрыми темпами.



Рис. 1. Варианты перевода сантехнического оборудования «умного» дома на цифровую систему

В ближайшем будущем, с созданием города Аркадаг Ахалского велаята, здесь появятся «умные» дома и «умный» город», основанные на внедрении цифровой системы (рис. 1) [1].

Этот крупномасштабный проект, осуществление которого началось в мае 2021 года в день празднования 140-летия основания города Ашхабада, ознаменовал собой первый за всю историю нашей страны важный шаг на пути к цифровым технологиям.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Деятельность по строительству, наряду с объектами жилищного, социального и производственного назначения, тепличных хозяйств для круглогодичного обеспечения населения различными видами продовольственной, плодовоовощной и бахчевой продукции, а также коневодческих комплексов для разведения и увеличением поголовья прославленных во всем мире ахалтекинских скакунов, являющихся нашей национальной гордостью, комплексов специальных сооружений для разведения и обучения, туркменских алабаев, являющихся признаком нашей национальной иден-



вания, продлению эксплуатационного срока и превышению ресурсосбережения зданий (рис. 3) [3].



Рис. 3. Автоматический метод отопления помещений для поддержания микроклимата

Резкая и значительная смена внешних факторов в течение короткого времени на территории Туркменистана на протяжении четырех времен года, каждого месяца, каждых суток и каждого часа, прохлады весной и осенью, зной летом, стужа, снег и осадки зимой, приводит к частым переключениям режима работы систем вентиляции и кондиционирования воздуха, электро- и газоснабжения, установок генерации тепла и холода в зданиях и существенной разнице энергопотребления в них, что в конечном счете, с одной стороны создает определенные неудобства в условиях жизни и работы людей, а с другой негативно сказывается на надежности и сроке эксплуатации самих систем [4].

Значение использования цифровой системы в передовом санитарно-техническом оборудовании современных зданий зависит от целевого назначения и типа самого сооружения (рис. 4).





Рис. 4. Водопроводный кран с сенсорным смесителем

Осуществление перевода передового санитарно-технического оборудования в зданиях на цифровую систему необходимо для качественного и бесперебойного снабжения потребителей тепловой энергией, горячей и холодной водой, газом, электроэнергией и освещением, надежного и экономически эффективной эксплуатации систем канализации, вентиляции и кондиционирования воздуха. В связи с этим возникает насущная необходимость обеспечения слаженной работы всех элементов санитарно-технической системы коммунального хозяйства, таких как системы отопления, подачи горячей и холодной воды, газа, электричества и освещения, канализация, вентиляции и кондиционирования воздуха, источников тепловой энергии, системы теплоснабжения, тепловых пунктов в зависимости от внешних и внутренних факторов, а также оперативного управления этими системами. Оперативное управление слаженной работой комплекса санитарно-технического оборудования может быть реализовано через цифровую систему.

В целях поддержания требуемых значений таких величин, как температура, давление, объем, скорость, составляющих термодинамические, гидравлические и аэродинамические параметры теплоносителей, подведенных в системах отопления, подачи горячей и холодной воды, теплогазоснабжения и вентиляции оснащаются автоматическими регуляторами. Такие же регуляторы применяются и к технологическому оборудованию промышленных предприятий в системах водоснабжения, теплогазоснабжения и вентиляции. Такой подход позволяет поддерживать нормальный режим функционирования системы и оборудования тепловых пунктов, использующих теплоносители с минимальным количеством обслуживающего персонала (рис. 5) [4].



Рис. 5. Диспетчерское управление системой теплоснабжения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система водоснабжения, теплогазоснабжения и вентиляции требует четкого определения нижеприведенных проблем:

- структура и проблемы централизованной или частной системы;
- характеристика и функционально связанные средства централизованной или частной системы;
- тип объекта, оснащенного системой автоматического управления;
- конструктивные типы и места установки контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИП и А);
- конструктивное устройство и эффект исполнительного механизма;
- меры по защите объектов и автоматизированных систем от аварий;
- рабочие величины автоматизированных систем.

При четком решении этих проблем можно добиться ресурсосбережения во всех вышеупомянутых системах зданий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гурбангулы Бердимухамедов К новым высотам прогресса. – Аш-хабад: Туркменская государственная издательская служба, 2018.
2. «Умный дом» 21 века. – М.: Издательские решение, 2012. – 110 с.
3. CD-ROM. Умный дом. Энциклопедия. – Л.:, 2008. – 322 с.
4. Дитрих Кастнер Система автоматизации зданий, 2010.



