

# ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

2024  
09

INDUSTRIAL POWER ENGINEERING



# Кабеленесущие системы

**ОБО Беттерманн – российский производитель системных решений для электромонтажа**

- Высокотехнологичное производство в Липецке
- Комплексная техническая поддержка
- Федеральный логистический центр
- Широкая дистрибьюторская сеть по всей России



## Все для профессиональной организации кабельных трасс

- Кабельные лотки листового и лестничного типа
- Кабельные лотки для больших расстояний
- Профильные и монтажные рейки
- Системы крепления и монтажа



## Уникальные проектные решения

- Высококачественная российская сталь
- Высокие нагрузочные характеристики и стойкость к коррозии
- Соответствие российским нормам и стандартам
- Полный цикл производства



**OBO**  
BETTERMANN

Москва, ул. Кировоградская, 23А, БЦ ART GALLERY  
+7 (495) 231 19 58 | msk@obo.com.ru | oborussia.ru



# ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ежемесячный производственно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНЭНЕРГО РОССИИ, ПАО "ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕЭС",  
КОРПОРАЦИЯ "ЕДИНЫЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС", НТФ "ЭНЕРГОПРОГРЕСС",  
НП "НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС"

9

Сентябрь  
2024

Издается с августа 1944 года

Москва, НТФ "Энергопрогресс"

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

**Качанов А. Н., Чернышов В. А., Лукьянов Г. В.**

Компьютерное моделирование процесса перевода двойного замыкания на землю в однофазное в сетях 10 кВ с изолированной нейтралью . . . . .

2

**Гусев Е. В., Сергиенкова А. А., Соколовский А. И.** Повышение энергоресурсосбережения в технологии стеновой глинозольной керамики . . . . .

9

**Генбач А. А., Генбач Н. А., Андреева Е. А., Шелгинский А. Я.** Охлаждение энергоустановок с применением покрытий из минеральных сред . . . . .

15

**Рябов Г. А., Фоломеев О. М.** Использование технологии циркулирующего кипящего слоя для получения метанола . . . . .

22

**Бухмиров В. В., Бушуев Е. Н., Светушков И. И., Родионова М. В., Долинин Д. А.** Экспериментальное исследование микроклимата котлотурбинного цеха Ивановской ТЭЦ-2 . . . . .

31

**Сивак А. С., Калганова С. Г., Тригорльий С. В., Кадыкова Ю. А., Сахаджи Г. В.** Моделирование нагрева высокоэнергетических радиопоглощающих композитов в СВЧ-камерах различного типа . . . . .

36

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

**Сафронова Н. Н.** Положения и принципы концепции индустриального вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС . . . . .

43





## ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

EDN: EMKWSR

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

### Компьютерное моделирование процесса перевода двойного замыкания на землю в однофазное в сетях 10 кВ с изолированной нейтралью

**Качанов А. Н.**, доктор техн. наук, **Чернышов В. А.**, канд. техн. наук,  
**Лукьянов Г. В.**, магистр

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева»

Рассмотрены результаты компьютерного моделирования процесса перевода разнесенного двойного замыкания на землю, развивающегося в воздушной электрической сети напряжением 10 кВ (ВЭС-10 кВ) с изолированной нейтралью, в однофазные замыкания на землю. Данное инженерно-техническое решение, реализуемое с использованием типового подстанционного электрооборудования, направлено на дальнейшее повышение надежности функционирования ВЭС-10 кВ и обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей. Приведенные в статье временные диаграммы линейных и емкостных токов, а также фазных напряжений, полученные с использованием программного обеспечения Matlab Simulink, адекватно отображают известные закономерности, проявляющиеся в реальных электрических сетях данного класса напряжения. Полученные результаты подтверждают потенциальную работоспособность предлагаемого технического решения и позволяют рекомендовать его предприятиям, проектирующим и эксплуатирующим системы противоаварийной автоматики.

**Ключевые слова:** воздушная электрическая сеть 10 кВ с изолированной нейтралью, двойное и однофазное замыкания на землю, изменение порядка чередования фаз, компьютерное моделирование в среде Matlab Simulink.

#### Предпосылка проведения исследований и обоснование их цели

Двойные замыкания на землю (ДЗНЗ), возникающие в воздушных электрических сетях напряжением 10 кВ (ВЭС-10 кВ) с изолированной нейтралью, являются одной из основных причин выхода из строя дорогостоящего электрооборудования и нарушения надежности электроснабжения потребителей. В настоящее время в связи с повышением требований, предъявляемых к надежности функционирования элементов ВЭС-10 кВ и бесперебойности электроснабжения, практика традиционного отключения воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) при ДЗНЗ не всегда может быть единственно верным решением. Необходимо проведение дополнительных научных исследований, направленных на разработку новых методов, способов и устройств, не допускающих возникновения в ВЭС-10 кВ ДЗНЗ, в том чис-

ле и с применением компьютерного моделирования.

Руководствуясь поставленной целью, в рамках реализации научно-исследовательской работы [1], направленной на дальнейшее повышение эффективности функционирования ВЭС-10 кВ, сотрудники кафедры электрооборудования и энергосбережения ОГУ им. И. С. Тургенева разработали способ перевода разнесенного ДЗНЗ в однофазное замыкание на землю (ОЗНЗ) [2, 3]. Работоспособность алгоритма предлагаемым способом была подтверждена результатами физического моделирования, реализованного с использованием сертифицированного учебно-лабораторного стенда «ГалСен» [4, 5]. При этом необходимо отметить, что на данном этапе исследований не учитывались критерии подобия имитационной физической модели и реальной ВЭС-10 кВ. Но проведение испытаний предлагаемого инженерно-технического решения в действую-

щих электроустановках не представляется возможным из-за дороговизны его реализации, а также наличия организационно-технических ограничений, регламентируемых действующей нормативной базой [6]. Поэтому было принято решение при проведении дальнейших исследований использовать возможности виртуального компьютерного моделирования.

### Описание моделируемого процесса

На рис. 1 приведена схема перевода разнесенного ДЗНЗ в ОЗНЗ в ВЭС-10 кВ с изолированной нейтралью, физические особенности которого были исследованы с применением компьютерного моделирования.

Схема содержит: силовой понижающий трансформатор 1 (фазы А, В и С), подключенный к питающей сети напряжением 35(110) кВ; коммутационные аппараты 2 – 6 автоматической защиты; шины 7 низковольтного напряжения 10 кВ; устройство 8 неселективного контроля изоляции; блок 9 автоматического управления; однофазные выключатели 10 – 12; датчики тока 13 – 17; низкоомный заземляющий резистор 18; дистанционно управляемые коммутационные аппараты 19 – 30; воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) 31 – 34 напряжением 10 кВ. На схеме также показаны: пути 35 и 36 кратковременного протекания тока искусственного ДЗНЗ; путь 37 кратковременного протекания тока ДЗНЗ; устойчивое повреждение изоляции фазы А (ОЗНЗ);

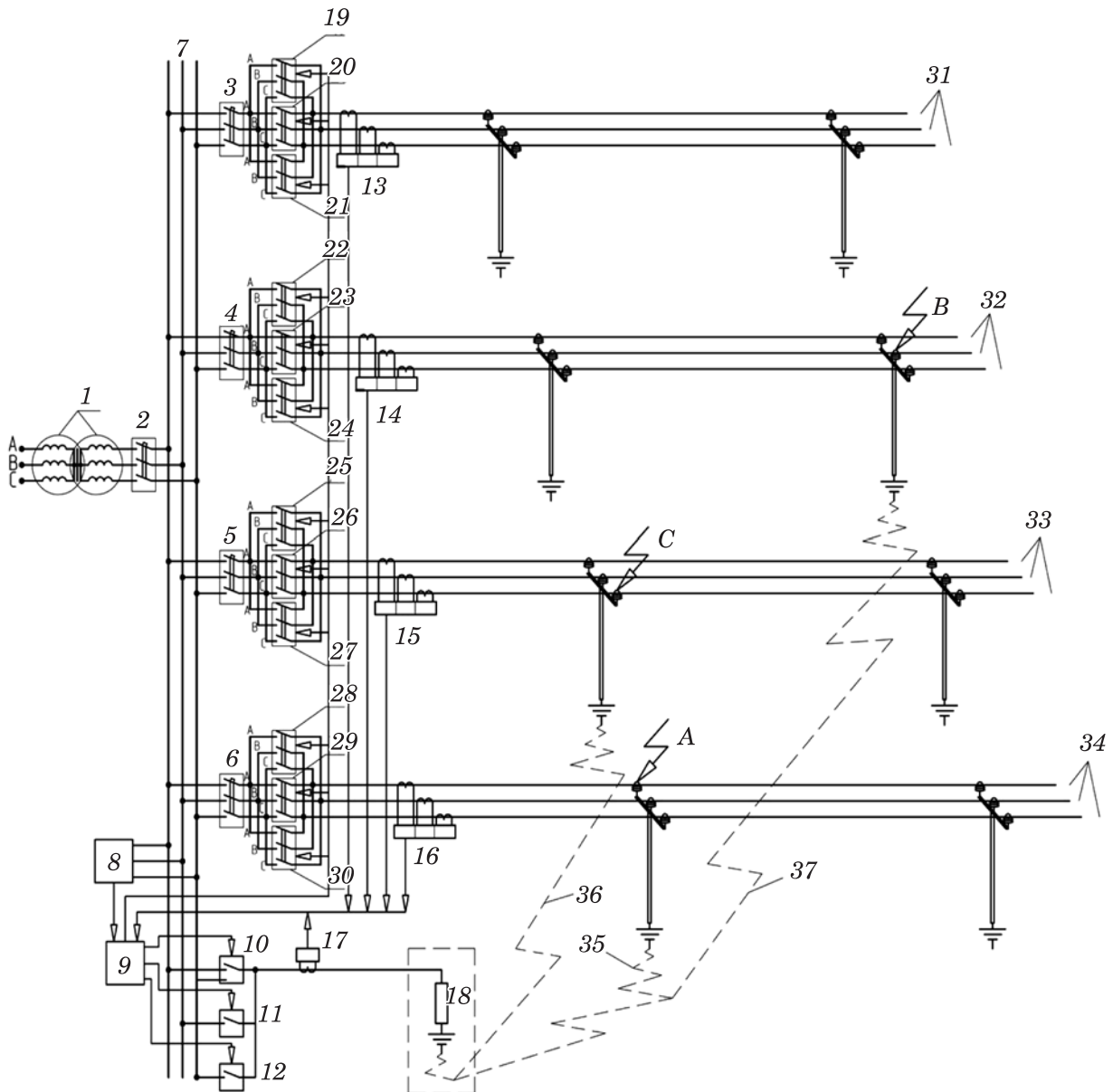


Рис. 1. Схема перевода разнесенного ДЗНЗ в ОЗНЗ в ВЭС-10 кВ с изолированной нейтралью

слабый развивающийся дефект изоляции фазы *C* и устойчивое повреждение изоляции фазы *B* (ДЗНЗ).

Принцип работы данного инженерно-технического решения достаточно прост и заключается в том, что при возникновении в ВЭС-10 кВ развивающегося ДЗНЗ, разнесенного по разным ВЛЭП, оно оперативно переводится в несколько ОЗНЗ. Этот перевод осуществляется за счет автоматической смены порядка прямого чередования фаз, питающих ВЛЭП с развивающимся ДЗНЗ, при которой ее проводник с поврежденной изоляцией будет подключаться к той же фазе шин низковольтного напряжения, что и проводник ВЛЭП, имеющей устойчивое ОЗНЗ. Необходимо отметить, что способ разработан для непротяженных ВЭС-10 кВ, ВЛЭП которых имеют небольшую присоединенную нагрузку, отнесенную к первой и ко второй категориям по надёжности электроснабжения. Ожидаемыми результатами данного решения являются: ослабление динамики развития дефекта изоляции фазы *C*, обеспечивающееся выводом ее из-под действующего в ВЭС-10 кВ повышенного в  $\sqrt{3}$  раз фазного напряжения, а также недопущением протекания через нее тока развивающегося ДЗНЗ; повышение коммутационного ресурса групповых аппаратов 3–6 автоматической защиты, обусловленное сокращением количества их срабатываний за счет недопущения перехода развивающихся ДЗНЗ в устойчивые ДЗНЗ; ослабление электропоражающего воздействия потенциально опасной зоны действия шагового напряжения, обеспечивающееся исключением влияния на процесс ее формирования тока развивающегося ДЗНЗ; устранение технических потерь электроэнергии, вызванных тепловым действием тока при развивающемся ДЗНЗ; обеспечение возможности одновременного функционирования ВЛЭП 32–34 с поврежденной изоляцией после кратковременного отключения и последующего включения в работу ВЛЭП 32 и 33 с соответствующим измененным порядком прямого чередования фаз. Более подробное описание принципа работы данного способа изложено в источниках [2, 3].

### Описание компьютерной модели

Выбор среды динамического моделирования SimPowerSystems (MatLab Simulink) объясняется тем, что она обеспечивает полный функционал, необходимый для построения виртуальных моделей электрических сетей.

При создании модели ВЭС-10 кВ (см. рис. 2) авторы использовали следующие стандартные блоки библиотеки Simulink: блок «Three-Phase Sours», имитирующий энергосистему 10 кВ, на схеме он обозначен как «Источник 10 кВ»; блок «Three-Phase Transformer», моделирующий работу силового трансформатора, на схеме обозначенный как «Трансформатор»; блоки «Three-Phase Breaker», имитирующие работу трехфазных выключателей, обозначенные на схеме как «Выключатель 1» – «Выключатель 4», а также «Выключатель нагрузки 1» и «Выключатель нагрузки 2»; блоки «Three-Phase Fault», имитирующие однофазное (фаза А ВЛЭП 1) и двойное (фаза В ВЛЭП 2) замыкания на землю, на схеме они обозначены как «ОЗНЗ (20 км)» и «ДЗНЗ (20 км)»; блоки «Three-Phase Series RLC Load», имитирующие нагрузку системы, на схеме они обозначены как «Нагрузка 1» и «Нагрузка 2». Для создания модели воздушной линии электропередачи 10 кВ был использован блок «Subsystem», который включает в себя блоки «Three-Phase Series RLC Branch», представляющие собой последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности линии, а также параллельное соединение емкостей имитируемой ВЛЭП 10 кВ. Блок «ТТ» позволяет снимать значения ёмкостных токов в системе. Модель воздушной линии электропередачи «ВЛЭП 1 (25 км)» представлена на рис. 2, модель «ВЛЭП 2 (25 км)» представляется аналогичным образом. Важно отметить, что учет реактивных составляющих сопротивлений при моделировании ВЛЭП 1 и ВЛЭП 2 позволяет графически отображать на временных диаграммах характер протекания переходного процесса в момент увеличения фазного напряжения до линейного. Это дает возможность количественно оценивать негативное воздействие данного перенапряжения на изоляцию ВЭС-10 кВ. Также необходимо отметить, что блоки «Three-Phase Fault» имитируют бездуговое повреждение изоляции для фаз А и В. Правомочность такого допущения обусловлена тем, что моделируемый процесс рассматривается для ВЭС-10 кВ малой протяжённости с малыми токами ОЗНЗ, не способными вызывать возникновение электрической дуги. С учетом вышеизложенного в работе была реализована конечная модель ВЭС-10 кВ с изолированной нейтралью, приведенная на рис. 3. Эта модель позволила имитировать процессы возникновения ОЗНЗ (на ВЛЭП 1), ДЗНЗ (на ВЛЭП 2) и перевода развивающегося ДЗНЗ в ОЗНЗ, разнесенные по ВЛЭП 1 и ВЛЭП 2.

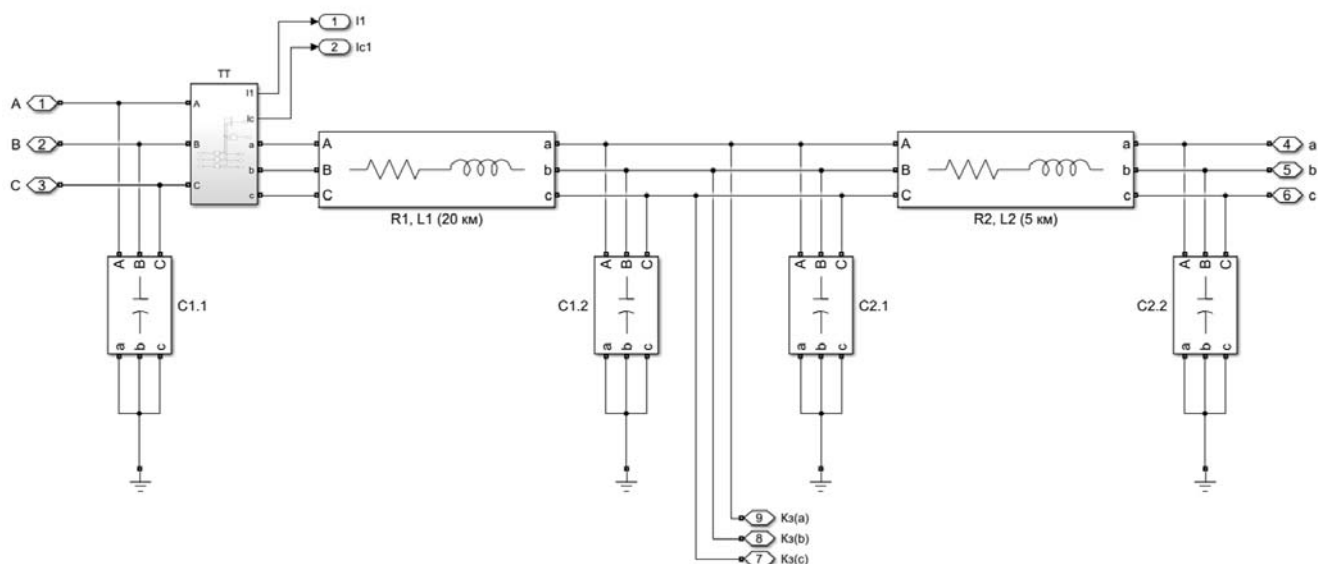


Рис. 2. Модель ВЛЭП 1 (ВЛЭП 2) 10 кВ в MatLab Simulink

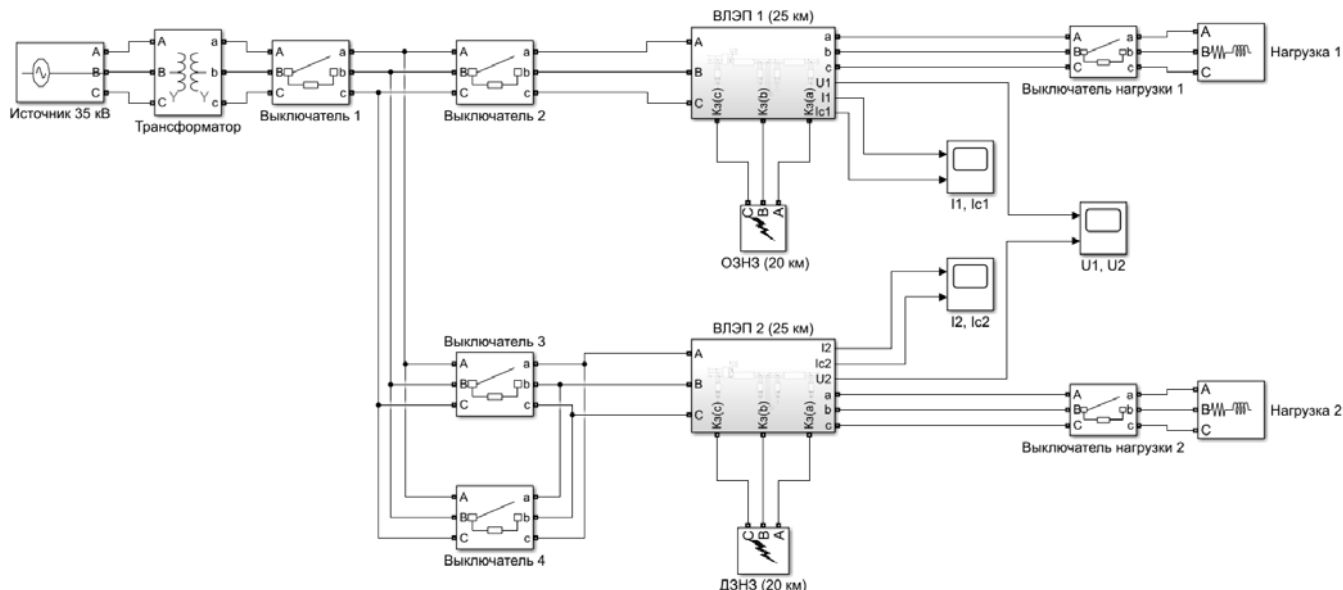


Рис. 3. Модель ВЭС-10 кВ в MatLab Simulink

### Результаты компьютерного моделирования и их обсуждение

В результате компьютерного моделирования для ВЛЭП 1 были получены временные диаграммы фазных напряжений (рис. 4, а), линейных токов (рис. 4, б) и емкостных токов (рис. 4, в и г). Для ВЛЭП 2 были аналогично получены временные диаграммы фазных напряжений (рис. 5, а), линейных (рис. 5, б) и емкостных токов (рис. 5, в и г).

На временных диаграммах, приведенных на рис. 4 и 5, выделены следующие интерва-

лы, характеризующие режимы работы ВЭС-10 кВ с изолированной нейтралью:

от 0 до 0,1 с — нормальный режим работы ВЭС-10 кВ;

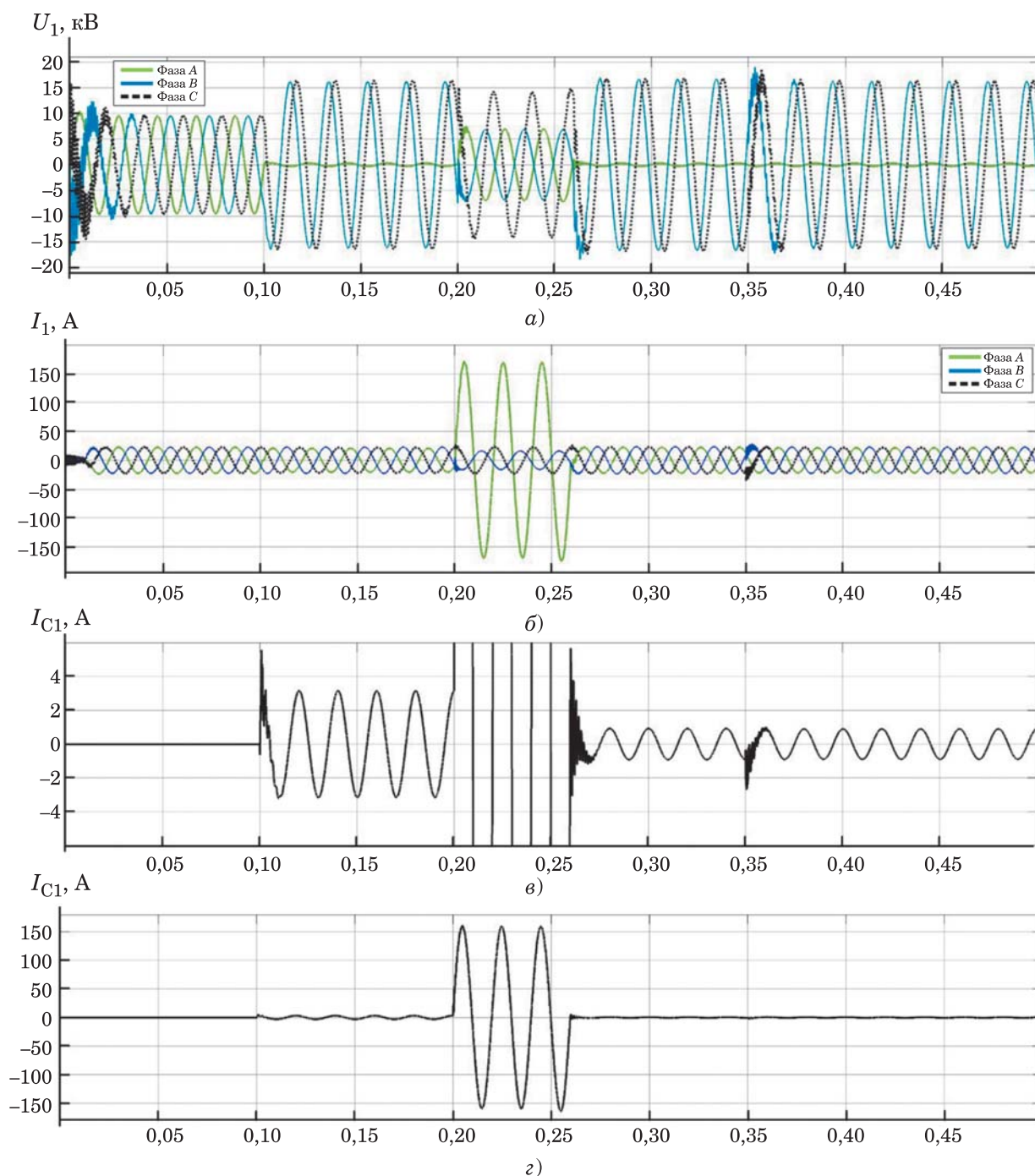
от 0,1 с до 0,2 с — замыкание на землю фазы А ВЛЭП 1 – ОЗНЗ;

от 0,2 с до 0,25 с — замыкание на землю фазы В ВЛЭП 2 – ДЗНЗ;

от 0,25 с до 0,35 с — смена порядка чередования фаз (отключение блока «Выключатель 3» и включение блока «Выключатель 4»);

от 0,35 с до 0,5 с — устранение режима ДЗНЗ и дальнейшая работа ВЭС-10 кВ в режиме ОЗНЗ.





**Рис. 4. Временные диаграммы для ВЛЭП 1:**

*а* — фазных напряжений; *б* — линейных токов; *в* и *г* — емкостного тока

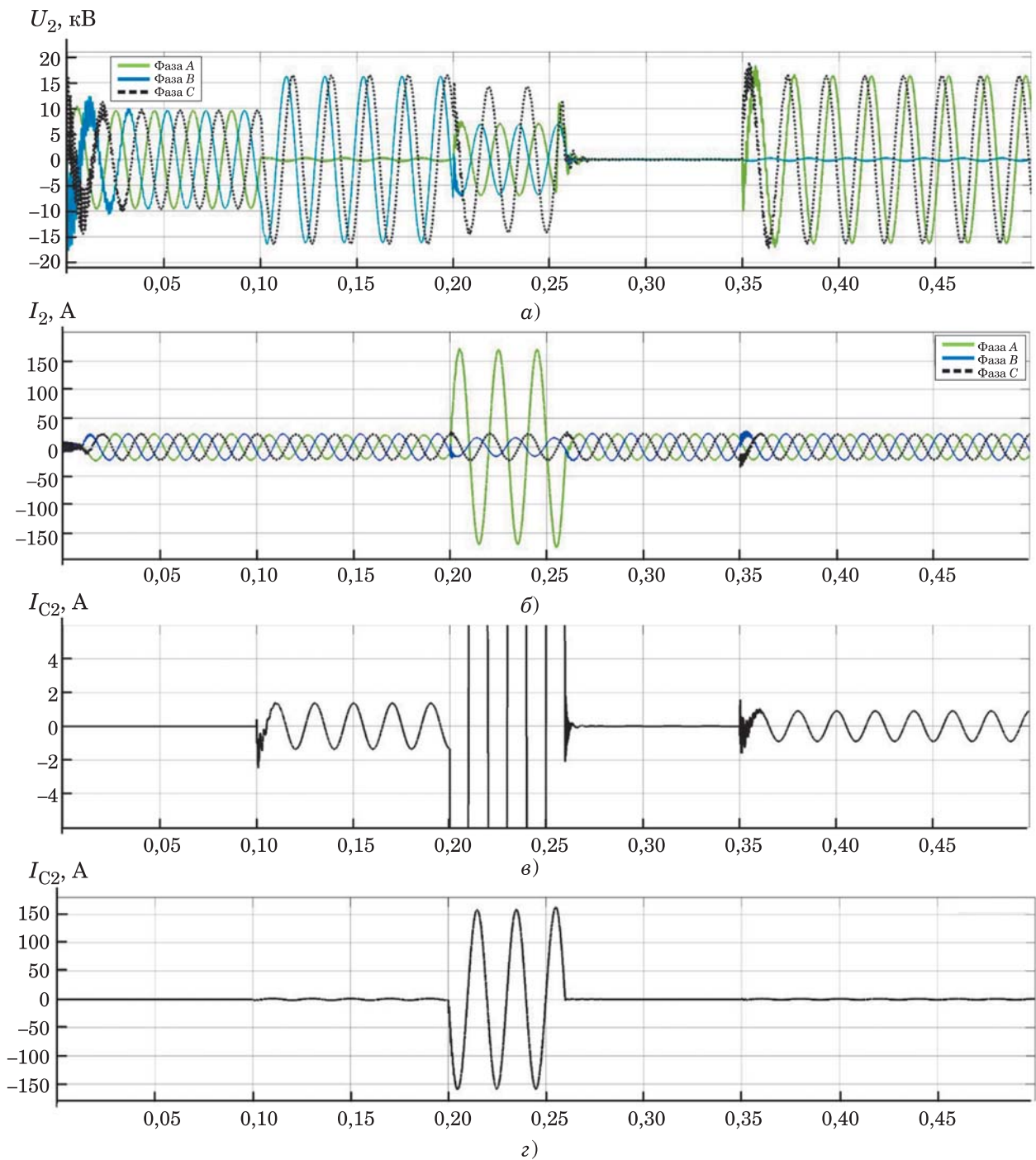
При моделировании процесса изменения порядка прямого чередования фаз питающего напряжения для ВЛЭП 2, при котором ее проводник с поврежденной изоляцией будет подключен к той же фазе (фазе А) источника питания, как и проводник с поврежденной изоляцией ВЛЭП 1, было установлено, что:

значения линейных токов, протекающих при ДЗНЗ в фазах ВЛЭП 1 и ВЛЭП 2, имеющих дефекты изоляции, а также емкостных то-

ков, протекающих в них при ОЗНЗ, демонстрируют ожидаемое снижение;

значения напряжений между землей и «здоровыми» фазами В и С ВЛЭП 1 и ВЛЭП 2 демонстрируют ожидаемое увеличение в  $\sqrt{3}$  раз, при этом их максимальные амплитуды не достигают потенциально опасного значения, приводящего к выходу из строя изоляции ВЭС-10 кВ.





**Рис. 5. Временные диаграммы для ВЛЭП 2:**

*а* — фазных напряжений; *б* — линейных токов; *в* и *г* — емкостного тока

### Выводы

1. Предлагаемый авторами вариант недопущения возникновения ДЗНЗ в ВЭС-10 кВ с изолированной нейтралью адресован научному электроэнергетическому сообществу, проектировщикам и производителям систем противоаварийной автоматики, а также инженерно-техническим работникам, эксплуатирующим ВЛЭП 10 кВ.

2. Результаты компьютерного моделирования подтверждают теоретическую состоятельность предлагаемого инженерно-технического решения. Однако окончательные выводы о целесообразности его внедрения в действующие ВЭС-10 кВ с изолированной нейтралью можно будет сделать только после проведения опытно-промышленных испытаний.

### Список литературы

1. **Инициативная НИР. Оптимизация процессов проектирования и функционирования электротехнических комплексов и систем электроснабжения потребителей.** — Утверждена приказом ректора ФГБОУ ВО «ОГУ им. И. С. Тургенева» № 1409 от 01.12.2022.
2. **Пат. № 2809 770, МПК H02H 9/08 «Способ перевода разнесенного двойного замыкания на землю в однофазное в сетях с изолированной нейтралью»** / А. Н. Качанов, В. А. Чернышов, Г. В. Лукьянов, А. С. Даровых; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОГУ им. И. С. Тургенева». — № 2022133610; заявл. 20.12.2022; опубл. 18.12.2023, Бюл. № 35. — 7 с.: ил.
3. **Чернышов, В. А. Способ перевода разнесенного двойного замыкания на землю в однофазное в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6 – 10 кВ** / В. А. Чернышов, Г. В. Лукьянов, Т. Г. Королева // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, № 1 (363), ОГУ им. И. С. Тургенева, 2024. — С. 200 – 205.
4. **Карпеш, М. А. Электрические станции и подстанции. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭСиП.001 РБЭ (998.1)** / М. А. Карпеш, П. Н. Сенигов. — Челябинск: Инженерно-производственный центр «Учебная техника», 2012. — 155 с.
5. **Сенигов, П. Н. Режимы нейтрали и заземляющие устройства в электрических установках.** Руководство по выполнению базовых экспериментов. РНЗУЭУ.001 РБЭ (999) / П. Н. Сенигов. — Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2012. — 57 с.
6. **Правила устройства электроустановок: все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7.** — Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2010. — 464 с.
7. **MathWorks: официальный сайт.** — URL: <https://www.mathworks.com> (дата обращения 15.11.2022).
8. **Kachanov A. N., Chernyshov V. A., Lukyanov G. V. kikh kompleksov i sistem elektrosnabzheniya potrebitel'ei** (Initiative R&D. Optimization of design processes and operation of electrical complexes and power supply systems for consumers), Approved by the order of the Rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Odessa State University named after I. S. Turgenev» No. 1409, 01.12.2022.
9. **Kachanov A. N., Chernyshov V. A., Lukyanov G. V., Darovykh A. S. Patent No. 2809 770, MPK H02H 9 / 08 «Sposob perevoda raznesennogo dvojnogo zamykaniya na zemlyu v odnofaznoe v setyakh s izolirovannoi neutral'yu»** (Patent No. 2809 770, IPC H02H 9/08 «Method for converting a distributed double fault to earth into a single-phase fault in networks with an isolated neutral»), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Odessa State University named after I. S. Turgenev», No. 2022133610, claimed 20.12.2022, Publ. 18.12.2023, Bul. No. 35, 7 p.
10. **Chernyshov V. A., Lukyanov G. V., Koroleva T. G. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii** (Fundamental and applied problems of engineering and technology), No. 1 (363), OSU named after I. S. Turgenev, 2024, pp. 200 – 205.
11. **Karpesh M. A., Senigov P. N. Elektricheskie stantsii i podstantsii. Rukovodstvo po vypolneniyu bazovykh eksperimentov. ESiP001 RBE, 998.1** (Electric stations and substations. Guide to performing basic experiments. ESiP001 RBE, 998.1), Chelyabinsk, Engineering and production center «Educational equipment», 2012, 155 p.
12. **Senigov P. N. Rezhimy neutrali i zazemlyayushchie ustroystva v elektricheskikh ustanovkakh. Rukovodstvo po vypolneniyu bazovykh eksperimentov. RNZUEU.001 RBE, 999** (Neutral modes and grounding devices in electrical installations. Guide to performing basic experiments. RNZUEU.001 RBE, 999), Chelyabinsk, IPC «Educational technology», 2012, 57 p.
13. **Pravila ustroystva elektroustanovok** (Electrical installation rules), all current sections of PUE-6 and PUE-7, Novosibirsk, Siberian University press, 2010, 464 p.
14. **MathWorks**, [Electronic resource]. — URL: <https://www.mathworks.com> (accessed: 15.11.2022).

### References

1. **Iniitsiativnaya NIR. Optimizatsiya protsessov proektirovaniya i funktsionirovaniya elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem elektrosnabzheniya potrebitel'ei**

kan@ostu.ru

## Computer simulation of the process of converting a double ground fault into a single-phase fault in 10 kV networks with an isolated neutral

Kachanov A. N., Chernyshov V. A., Lukyanov G. V.

The article discusses the results of computer modeling of the process of converting a spaced double ground fault developing in an overhead electrical network with a voltage of 10 kV (VES-10 kV) with an isolated neutral into single-phase ground faults. This engineering and technical solution, implemented using standard substation electrical equipment, is aimed at further increasing the reliability of the operation of the 10 kV wind farm and ensuring uninterrupted power supply to consumers. The time diagrams of linear and capacitive currents, as well as phase voltages, presented in the article, obtained using the Matlab Simulink software, adequately reflect the known patterns that appear in real electrical networks of a given voltage class. In turn, the results obtained confirm the potential performance of the proposed technical solution and allow us to recommend it to enterprises designing and operating emergency automation systems.

**Keywords:** overhead electrical network with a voltage of 10 kV with an isolated neutral, phase sequence reversal, computer simulation in Matlab Simulink.

EDN: HZCNGE

Специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки);  
2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника

## Повышение энергоресурсосбережения в технологии стеновой глинозольной керамики

Гусев Е. В., канд. техн. наук, Сергиенкова А. А., соискатель,  
Сокольский А. И., доктор техн. наук  
ФГБОУ ВО «ИГЭУ», Иваново

Показаны возможности повышения энергоресурсосбережения в технологии стеновой керамики при использовании отвальной золы теплоэлектростанции в качестве вторичного источника сырья и тепловой энергии. Представлены кинетические закономерности тепло-массообмена при сушке и обжиге глинозольного материала различного состава, на основании которых выявлена возможность повышения энергетической эффективности тепловой обработки.

**Ключевые слова:** глинозольная керамика, интенсивность, теплообмен, прессформование, теплоотдача, теплопроводность, сушка, обжиг.

Производство стеновых керамических изделий является одной из материалоемких и энергозатратных отраслей производства строительных материалов, поэтому рациональное использование сырья, топлива и энергосбережения на технологических стадиях (особенно сушки и обжига) становится решающим фактором их успешного развития [1 – 3]. В настоящее время большинство предприятий керамической промышленности испытывают трудности с сырьевыми материалами из-за выработки большей части качественного глинистого сырья и удорожания сырьевых и энергетических ресурсов. Ресурсо- и энергосберегающий подход к технологии стеновых керамических изделий должен основываться на вовлечении более доступного и дешевого (техногенного и некондиционного) сырья с учетом его эффективного влияния на технологические стадии производства, особенно на процессы термической обработки (сушка, обжиг).

Одним из перспективных направлений в повышении эффективности производства стеновых керамических изделий является использование в качестве основного отощающего сырья техногенных отходов в виде отвальных зол теплоэлектростанций, имеющих существенный запас во многих регионах России, а также некондиционного глинистого сырья.

В настоящее время исследования показали, что основными предпосылками использования зол ТЭС в керамическом производстве являются: схожесть химического состава с глинистым

сырьем, возможность получения дополнительного источника тепла из-за наличия несгоревшего твердого топлива и готовой продукции с улучшенными эксплуатационно-техническими свойствами [2 – 5].

Важнейшими факторами применения глины и зол в технологии стеновых глинозольных изделий являются их химико-минералогический и гранулометрический составы, связующая способность исходных веществ, наличие выгорающих веществ, легкоплавкость и степень потребления и выделения тепловой энергии в основных технологических процессах термообработки.

Производство стеновых глинозольных изделий по сравнению с традиционными керамическими материалами имеет свои особенности, связанные с вовлечением дополнительного оборудования по переработке золы, глинозольной шихты, а также с подбором способа и режима формования и рациональных режимных условий сушки и обжига. Наиболее эффективным способом производства стеновых глинозольных материалов по оценке специалистов является технология полужесткого (жесткого) прессформования, позволяющая обеспечить наибольшую связующую способность керамической массы [3, 4].

Цель данной статьи — показать целесообразность и эффективность применения тонкодисперсной отвальной золы Ивановской ТЭС-2 и легкоплавкого умеренно-пластичного глинистого сырья Норского месторождения

Таблица 1

## Химический состав (%) компонентов глинозольной шихты

Компонент	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	П.П.П.
Зола	54,16	13,1	9,88	3,23	1,14	—	2,76	—	—	0,18	14,65
Глина	50,64	13,02	5,71	8,39	0,79	4,15	2,46	0,09	0,12		11,8

*Примечание:* П.П.П. (потери при прокаливании) ориентировочно показывают содержание топливных материалов в составных частях глинозольной шихты.

(табл. 1) в технологии полужесткого пластического формования глинозольной керамики при прессформовании изделий-сырцов формовочной влажностью 14 – 17 % на основе исследования тепловых и массообменных процессов термической обработки.

Наиболее энергозатратными стадиями в технологии стеновой глинозольной керамики является термическая обработка с использованием конвективного подвода тепла в сушилке и обжиговой печи. Для процесса конвективной сушки характерны внешний и внутренний взаимосвязанный теплообмен, отражающийся соотношением удельных тепловых потоков на испарение влаги, и одновременный нагрев влажного материала.

Исследование кинетических закономерностей процесса сушки глинозольных пластинчатых образцов с различным содержанием глины и золы осуществлялось в камерной сушилке при двухстороннем продольном обтекании материала нагретым воздухом в условиях изотермического обезвоживания и постоянных параметрах сушильного агента ( $t_c = 75 - 125$  °C,  $v_c = 1 - 5$  м/с,  $\varphi = 5$  %). Интенсивность внешнего теплообмена между теплоносителем и влажным глинозольным материалом различного состава в процессе конвективной сушки определяется плотностью теплового потока, который рассчитывается на базе экспериментальных влаготермических кривых сушки материала во времени ( $\bar{U} = f(\tau)$ ;  $\bar{t} = f(\tau)$ ) по основному уравнению кинетики сушки [6]:

$$q(\tau) = \alpha(t_c - t_{\text{пм}}) = r_{\text{исп}}\rho_0 R_0 \frac{d\bar{U}}{d\tau} + c_{\text{пр}}\rho_0 R_0 \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_c$  и  $t_{\text{пм}}$  — температура теплоносителя и поверхности материала, °C;  $r_{\text{исп}}$  — удельная теплота испарения, Дж/кг;  $c_{\text{пр}} = c_m + c_{\text{ж}}\bar{U}$  — приведенная удельная теплоемкость влажного ма-

териала, Дж/(кг·°C);  $\bar{U}$  — среднее влагосодержание материала, кг/кг;  $c_{\text{ж}}$  — удельная теплоемкость воды;  $c_m = (c_{0\Gamma}X_{\Gamma} + c_{03}X_3)/100$  — удельная теплоемкость сухого глинозольного материала при содержании глины  $X_{\Gamma}(\%)$  и золы  $X_3(\%)$ ;  $c_{0\Gamma}$  и  $c_{03}$  — удельная теплоемкость глины и золы;  $\rho_0 = 2160 - 15X_3$  — плотность сухого материала толщиной  $2R_0$ , кг/м<sup>3</sup>.

В результате расчета были установлены зависимости коэффициента теплоотдачи от влагосодержания глинозольного материала полужесткого пластического формования с учетом различного содержания компонентов шихты, представленные на рис. 1.

С целью определения коэффициента теплоотдачи для глинозольного материала можно использовать следующее критериальное уравнение [6]:

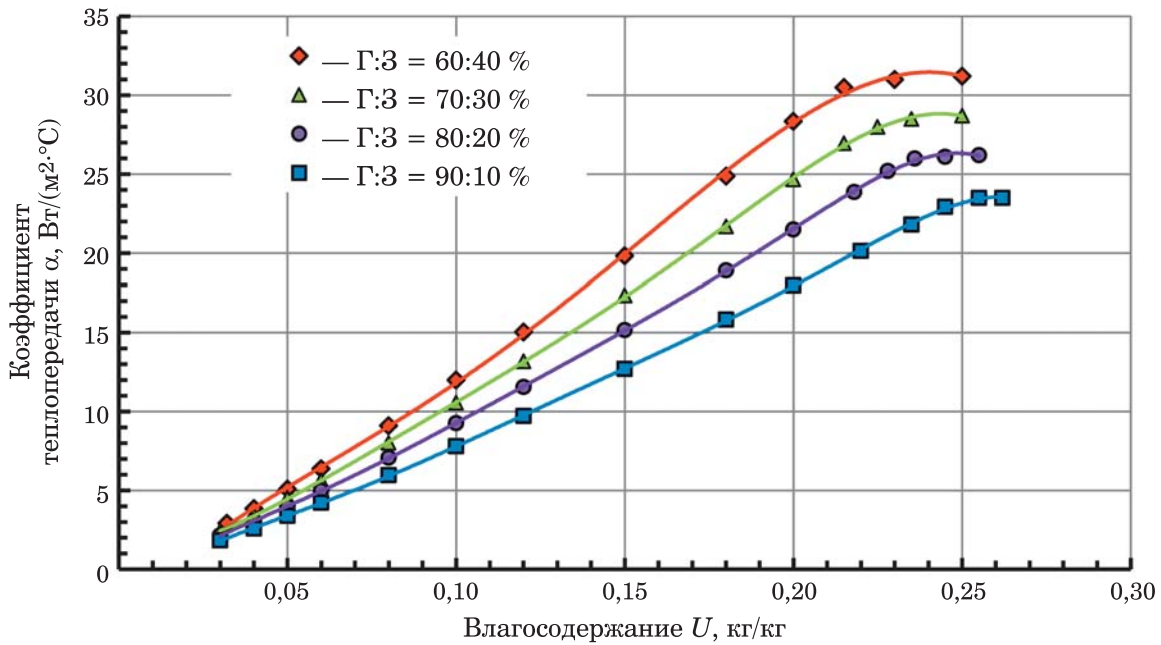
$$\text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda_c} = A \text{Re}^{0,5} \left( \frac{T_c}{T_m} \right)^2 \left( \frac{\bar{U}}{\bar{U}_{\text{кр}}} \right)^{m=0,0013X_3+1,19}, \quad (2)$$

где  $A = 0,45 + 0,0062X_3$  — параметр, зависящий от содержания золы ( $X_3$ , %) в глинозольном материале;  $\frac{\bar{U}}{\bar{U}_{\text{кр}}}$  — соотношение текущего

и критического влагосодержаний материала в периоде падающей скорости сушки;  $\text{Re} = (v_c l) / \nu_c$  — критерий Рейнольдса ( $\text{Re} = 2300 \div 12000$ );  $v_c$  — скорость сушильного агента, м/с;  $l$  — длина пластины вдоль движения теплоносителя, м;  $\lambda_c$  и  $\nu_c$  — теплопроводность и кинематическая вязкость воздуха.

Полученные данные позволяют говорить о возможности повышения интенсивности теплообмена за счет увеличения содержания золы в высушиваемом глинозольном изделии, температуры и скорости теплоносителя при соблюдении качественных показателей мате-





**Рис. 1. Зависимости коэффициента теплоотдачи от влагосодержания глинозольных образцов различного состава при параметров сушильного агента:**  
 $t_c = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v_c = 1 \text{ м/с}$ ;  $\varphi = 5 \text{ \%}$

риала. При этом повышение интенсивности сушки с увеличением содержания золы от 10 до 50 % составит  $[(q_{50} - q_{10})/q_{10}] \cdot 100 \text{ \%} = 45 \text{ \%}$ .

Интенсивность удаления влаги из высушиваемого материала определяется не только внешними условиями тепловой обработки, но и формами связи влаги с материалом и механизмами внутридиффузионного перемещения по выражению:

$$j(\tau) = \frac{W}{F_{\text{исп}} \tau} = \frac{\alpha}{r_{\text{исп}}} (t_c - t_{\text{пм}}) = a_m \rho_0 \nabla U, \quad (3)$$

где  $W$  — количество удаленной влаги из материала, кг;  $F_{\text{исп}}$  — поверхность испарения,  $\text{м}^2$ ;  $a_m$  — коэффициент массопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\nabla U = \frac{dU}{dR}$  — градиент влагосодержания по толщине материала.

Интенсивность внутреннего обезвоживания, механизмы переноса влаги, формы связи влаги с материалом при его сушке можно оценить по значению и характеру изменения эффективного коэффициента массопроводности в зависимости от влагосодержания высушиваемых изделий-сырцов [6, 7].

Для определения коэффициента массопроводности  $a_m$  внутри тела в процессе сушки в изотермических условиях был использован кинетический метод на основе определения локальных влагосодержаний по толщине мате-

риала с использованием следующего выражения [6, 8]:

$$a_m = \left( \frac{R^2}{Ki_m \bar{U}} \right) \frac{dU}{d\tau} = \left( \frac{R}{\Gamma_{\text{п}} \text{tg}\varphi} \right) \frac{dU}{d\tau}, \quad (4)$$

где  $Ki_m = \Gamma_{\text{п}} \frac{R}{U} \text{tg}\varphi$  — массообменный критерий

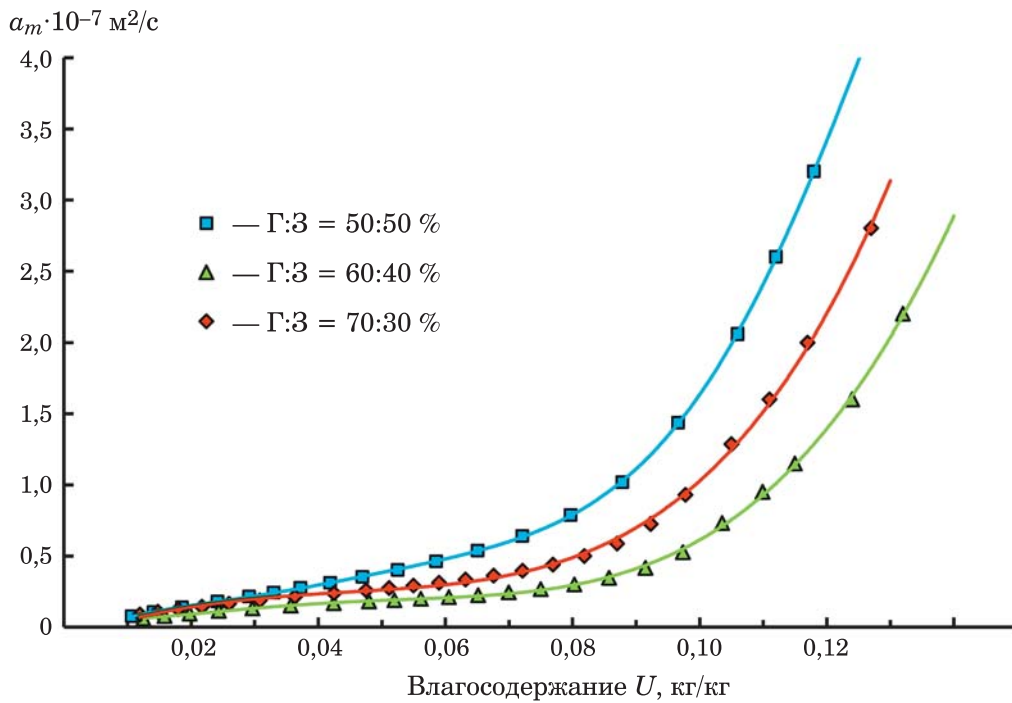
Кирпичева ( $0 < Ki_m < 2$ );  $\Gamma_{\text{п}} = 3$  — постоянный числовой коэффициент для пластины;  $R = 0,5h$  — характерный размер (половина толщины пластины), м;  $\text{tg}\varphi = \frac{dU}{dR}$  — тангенс угла наклона

прямой, построенной из кривых сушки для различных толщин  $h$  при текущих времени  $\tau$  и влагосодержании  $U$ .

Результаты кинетических расчетов по массопроводной способности глинозольного материала-сырца приведены на рис. 2.

Предельнобезопасная интенсивность сушки (ПБИС) образцов-сырцов глинозольной керамики оценивается по максимальному значению массообменного критерия Кирпичева и определяет степень интенсивности обезвоживания [6]. Для различных составом сформованных глинозольных изделий имеем:  $\Gamma:З = 70:30 \text{ \%}$  —  $Ki_m^{\text{max}} = 0,34$ ;  $\Gamma:З = 60:40 \text{ \%}$  —  $Ki_m^{\text{max}} = 0,36$ ;  $\Gamma:З = 50:50 \text{ \%}$  —  $Ki_m^{\text{max}} = 0,43$ .

Исходя из представленных данных, характер изменения коэффициентов массопроводности в зависимости от влагосодержания мате-



**Рис. 2.** Кинетические закономерности массопроводности при сушке глинозольных изделий полужесткого прессформования

риала характеризует повышение интенсивности обезвоживания с увеличением содержания золы и позволяет предположить о диффузионно-осмотическом механизме переноса влаги в порах высушиваемого материала, т.е. о лимитирующем переносе влаги к поверхности материалы с большей частью в виде жидкой фазы с уменьшением ее диффузионного сопротивления [6, 7].

Полученные кинетические закономерности по массопроводной способности глинозольных образцов различного состава согласуются с результатами других авторов, что позволяет условно отнести исследуемый материал к классу капиллярно-пористых тел (рис. 2) [6, 7].

Для определения эффективного коэффициента массопроводности для керамических капиллярно-пористых материалов рекомендуется следующее выражение [6]:

$$a_m = \frac{1 \cdot 10^{-5}}{3600(1 - 0,0032\rho_0 U) A_0} \left( \frac{T_c}{273} \right)^{20}, \quad (5)$$

где  $T_c$  — температура сушильного агента, °К;  $A_0 = 600 - 10X_3$  — поправочный коэффициент, учитывающий состав и структуру глинозольного материала.

Полученные закономерности внешнего и внутреннего тепломассопереноса при конвективной сушке глинозольных образцов сви-

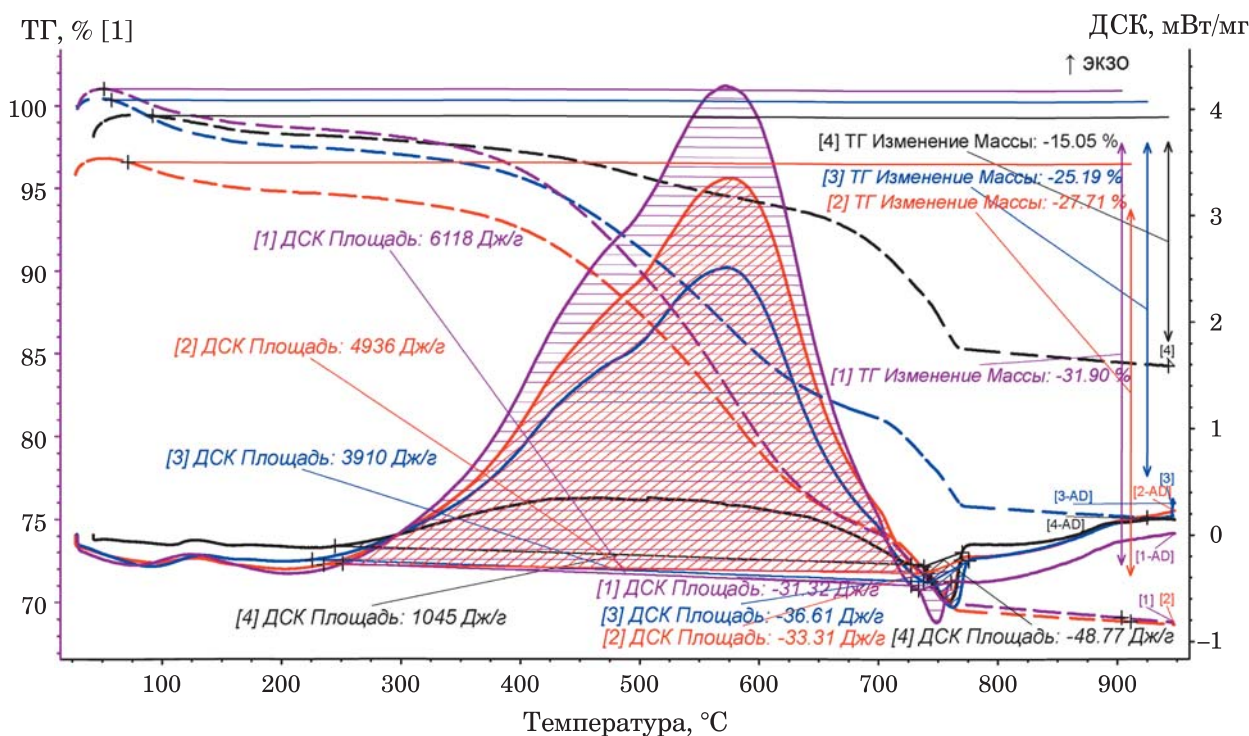
детельствуют о возможности интенсификации сушки за счет повышения содержания золы и параметров (температуры, скорости) сушильного агента.

При обжиге глинозольных материалов протекают физико-химические превращения, сопровождающиеся тепловыми эффектами различной природы и массообменом, характер которых определяется свойствами составляющих их компонентов (золы и глины) и способствует разработке рациональных режимов обжига изделий на их основе.

Разработка режимных параметров процесса обжига требует изучения фазовых и физико-химические преобразований, протекающих в процессе нагрева глинозольного материала. Экспериментальные исследования кинетики процесса термического нагрева глинозольного материала различного состава выполнены на установке синхронного термического анализа фирмы NETZSCH STA 449 F3 Jupiter.

Испытания проведены в окислительной среде в интервале температур 20 – 950 °С со скоростью нагрева среды 10 °С/мин.

Результаты термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) глинистого вещества и глинозольного материала различного состава представлены на рис. 3 и в табл. 2.



**Рис. 3. Термограмма и дериватограмма глинозольного материала различного состава:**  
 1 — Г:З = 50:50; 2 — Г:З = 60:40; 3 — Г:З = 70:30; 4 — Г:З = 100:0

Таблица 2

**Экспериментально-расчетные данные термического анализа**

Состав материала, %	Потери массы, %	Эндотермическая теплота, кДж/кг	Экзотермическая теплота, кДж/кг	Экзотермическая теплота в пересчете на условное топливо, %
Г:З = 100:0	15,05	48,8	1045	3,5
Г:З = 70:30	25,19	36,6	3910	13,3
Г:З = 60:40	27,71	33,3	4936	16,8
Г:З = 50:50	31,90	31,3	6118	20,9

Приведенные экспериментальные данные по термическому нагреву глинозольного материала показывают, что в зоне температур 250 – 720 °С интенсивность выделения теплоты от природной органики в глине и несгоревшего топлива в золе за период дегидратации и беспламенного горения остаточного твердого топлива возрастает в 4 – 6 раз с одновременным ростом потерь массы в 1,7 – 2,1 раза (табл. 2).

В процессе нагрева в интервале температур 700 – 950 °С усиливается действие карбонатных и железистых включений как от глины, так и от золы, что способствует появлению

окислительно-восстановительной среды в обжигаемом изделии и дополнительному расплаву с повышением прочностных свойств обожженных изделий.

Появление внутреннего теплового источника при обжиге глинозольного материала способствует снижению перепада температур между его внутренними и поверхностными слоями, неравномерности проявления деформационных изменений по объему, что приводит к повышению темпа нагрева, экономии энергетических ресурсов и качественных характеристик продукции.

## Выводы

1. Проведенные исследования показали существенную интенсификацию процессов сушки и обжига стеновой глинозольной керамики при увеличении содержания модифицированной золы и режимных параметров с улучшением физико-механических показателей в сравнении с традиционной керамикой за счет повышения массопроводных свойств и дополнительного внутреннего теплового источника.

2. Приведенные кинетические данные для стенового глинозольного материала различного состава, полученного по технологии полужесткого прессформования, дают основание для возможности повышения энергоресурсосбережения за счет применения отвальных зол ТЭС и интенсификации процессов сушки и обжига с улучшением качества продукции, т.е. позволяют рекомендовать совмещение процессов сушки и обжига в одном тепловом агрегате — противоточной туннельной печи-сушилки.

## Список литературы

1. Белов, В. В. Использование вторичных сырьевых ресурсов в производстве строительных материалов / В. В. Белов, В. Б. Петропавловская. — Тверь: ТГТУ, 2017. — 120 с.
2. Волженский, А. В. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов / А. В. Волженский, И. А. Иванов, Б. Н. Виноградов. — М.: Стройиздат, 1984. — 255 с.
3. Сайбулатов, С. Ж. Ресурсосберегающая технология керамического кирпича на основе зол ТЭС / С. Ж. Сайбулатов. — М.: Стройиздат, 1990. — 248 с.
4. Сайбулатов, С. Ж. Золо ТЭС в производстве строительной керамики / С. Ж. Сайбулатов, С. Т. Сулейменов, М. Кулбеков. — Алма-Ата: Казахстан, 1986. — 260 с.
5. Вакалова, Т. В. Теплоизоляционные керамические материалы с нанопористой структурой, изготовленные с использованием золо-содержащих отходов ТЭЦ / Т. В. Вакалова,

- Т. А. Хабас, И. Б. Ревва, И. А. Павлова // Сырьевые материалы. — 2014. — № 2. — С. 6 – 11.
6. Лыков, А. В. Тепломассообмен: справочник / А. В. Лыков. — М.: Энергия, 1971. — 560 с.
7. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. — М.: Химия, 1980. — 248 с.
8. Гусев, Е. В. Закономерности формирования массопроводных свойств керамических изделий на основе отходов промышленных котельных / Е. В. Гусев, А. И. Сокольский, А. А. Сергиенкова, Ю. А. Родякаева // Вестник ИГЭУ. — 2018. — Вып. 1. — С. 33 – 36.

## References

1. Belov V. V., Petropavlovskaya V. B. *Ispol'zovanie vtorichnykh syr'evykh resursov v proizvodstve stroitel'nykh materialov* (Use of secondary raw materials in the production of building materials), Tver, TSTU, 2017, 120 p.
2. Volzhensky A. V., Ivanov I. A., Vinogradov B. N. *Primenenie zol i toplivnykh shlakov v proizvodstve stroitel'nykh materialov* (Use of ashes and fuel slags in the production of building materials), Moscow, Stroyizdat, 1984, 255 p.
3. Saybulatov S. Zh. *Resursosberegayushchaya tekhnologiya keramicheskogo kirpicha na osnove zol TES* (Resource-saving technology of ceramic bricks based on TPP ashes), Moscow, Stroyizdat, 1990, 248 p.
4. Saibulatov S. Zh., Suleimenov S. T., Kulbekov M. *Zoly TES v proizvodstve stroitel'noi keramiki* (TPP ash in the production of building ceramics), Alma-Ata, Kazakhstan, 1986, 260 p.
5. Vakalova T. V., Khabas T. A., Revva I. B., Pavlova I. A. *Syr'evye materialy* (Raw materials), 2014, No. 2, pp. 6 – 11.
6. Lykov A. V. *Teplomassoobmen* (Heat and mass transfer), Moscow, Energy, 1971, 560 p.
7. Rudobashta S. P. *Massoperenos v sistemakh s tverdoi fazoi* (Mass transfer in systems with a solid phase), Moscow, Chemistry, 1980, 248 p.
8. Gusev E. V., Sokolsky A. I., Sergienkova A. A., Rodyakaeva Yu. A. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* (Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University), 2018, No. 1, pp. 33 – 36.

gusev\_pcm@mail.ru

## Increasing energy and resource conservation in the technology of wall clay-ash ceramics

Gusev E. V., Sergienkova A. A., Sokolsky A. I.

The possibilities of increasing energy and resource conservation in the technology of wall ceramics using waste ash from a thermal power plant as a secondary source of raw materials and thermal energy are shown. The kinetic patterns of heat and mass transfer during drying and firing of clay-ash material of various compositions are presented, on the basis of which the possibility of increasing the energy efficiency of heat treatment is revealed.

**Keywords:** clay-ash ceramics, intensity, heat and mass transfer, molding, heat transfer, mass conductivity, drying, firing.



EDN: NIRLVY

Специальность 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

## Охлаждение энергоустановок с применением покрытий из минеральных сред

Генбач А. А., доктор техн. наук, Генбач Н. А., Андреева Е. А.  
Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Казахстан

Шелгинский А. Я., доктор техн. наук  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

Исследованы пористые покрытия, полученные напылением природных материалов и предназначенные для охлаждения высокофорсированных и интенсивных промышленных энергоустановок. В качестве материалов использованы минеральные среды из крепких горных пород (гранит, кварцит, тешенит). Определены и исследованы области применения пористой системы охлаждения и представлен алгоритм её проектирования. Охлаждение поверхности энергоустановки осуществляется испарением теплоносителя из пористой структуры. В качестве покрытий использовались наноразмерные и микромасштабные поверхности. Термоинструментом для напыления покрытий служила ракетная горелка, имеющая высокотемпературную сверхзвуковую пульсирующую детонационную струю. Получены характеристики и параметры термоинструмента, работающего на керосино-кислородной смеси, с коэффициентом расхода окислителя на поверхности покрытия, меньшим единицы. Дожигание керосина проводилось на покрытии. Плотность тепловых потоков на покрытии составляла  $(5 \div 12)$  МВт/м<sup>2</sup> при оптимальной длине струи  $(4 \div 12) \cdot 10^{-2}$  м. Определено распределение плотности теплового потока в зависимости от радиуса пятна торможения. Регулирование теплообмена факела осуществлялось мощностью горелки, длиной и углом наклона струи к покрытию. Выявлена зависимость плотности тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия, растяжения и оплавления поверхности покрытия и подложки, от размера порошка и времени подачи теплоты. Сравнение пористых поверхностей с микро-наношкалой показало преимущества над другими системами, что позволяет при совместном действии управлять теплотехническими характеристиками промышленных энергоустановок.

**Ключевые слова:** природные материалы, покрытия, камера сгорания, термоинструмент.

Важной задачей промышленных энергоустановок, в частности ГТУ, является создание системы охлаждения деталей. К ним можно отнести камеры сгорания, сопла и лопатки ГТУ, тепловые приборы (инструменты) для напыления покрытий [1].

В системах охлаждения при высоких нагрузках возможно наступление кризисной ситуации с перегревом теплообменной стенки [2, 3]. Представляет интерес исследование пористых поверхностей с микро-наноразмерами [2, 4]. Такие поверхности становятся компактными и работают с высокими тепловыми нагрузками [1, 5].

Поэтому нами разработаны поверхности в виде сетчатых структур заводского изготовления с покрытиями из природных минеральных сред. Они имеют синергические преимущества за счет объединения этих двух поверхностей при технологии их изготовления

с дальнейшим увеличением отвода тепловых нагрузок и управлением нанесения покрытий [2, 6].

Актуальными являются повышение эффективности охлаждения турбин для повышения их КПД  $\eta$  и совершенствование циклов [7 – 9]. Рассматриваются водяные, водо-воздушные и паровые охладители. Авторами исследованы новые природные покрытия, которые в отличие от известных, в большей степени увеличивают КПД цикла теплоэнергетических установок [5, 10].

При исследованиях обычно строятся сложные двухмерные модели с численным моделированием кризиса кипения (образование «парового кармана») капиллярной петли в фитиле тепловых труб [11]. Исследуется теплообмен в пористых покрытиях, находящихся в термическом напряженном состоянии [12]. Однако не проводятся эксперименты для под-

тверждения подобных моделей. В данной работе построена модель и сформулированы условия действия термических напряжений для состояния с целью управления теплопередачей [2, 3, 5]. Сопряженная задача теплообмена и напряжений в пористых покрытиях является научной и технической задачей для дальнейшего исследования, несмотря на значительные достижения за последние два десятилетия.

Управление теплообменом в пористых покрытиях в условиях термических напряжений является актуальным [2, 6]. Модели учитывают модуль упругости, литологию породы, а связь теплообмена и напряжения для разного размера пор структуры является нелинейной [4 – 6]. Требуется исследовать механизм процессов, влияющих на связанные между собой теплообмен и напряжение в пористых покрытиях, разработать методику расчета при напылении естественных порошков.

Представляет интерес исследование теплообмена различных пористых покрытий (многослойных), а также специально сконструированных фитилей с целью увеличения их теплопередающих способностей [13 – 16].

Появляются исследования внутренних характеристик кипения в пористых покрытиях с помощью измерения термодатчиками и наблюдения с помощью высокоскоростной камеры (размеры пузырьков, частота вылета и плотность зародышей) [17, 18].

Однако во всех перечисленных работах не рассматриваются покрытия из минеральных сред, не учитывается комбинированное действие капиллярных и массовых сил [7 – 9, 11 – 18].

Авторами данной статьи определена область применения новой капиллярно-пористой системы и предложен алгоритм ее проектирования (рис. 1) [1 – 6, 10].

Подробно рассматриваются многообразные задачи для различных устройств тепловых (промышленных) энергоустановок: выбор теплоносителя, температурный уровень, учет вида циркуляции, выбор геометрии и материал аппаратов и интенсификаторов теплообмена, условия работы системы под давлением (разряжением), прочность покрытий, подвод и отвод, а также вид энергии, ориентация системы). На основе результатов данного исследования предложены высокофорсированная вихревая топочная камера, ороситель градири, пылегазоохладители, маслоохладители на тепловых трубах, которые применяются

(внедрены) в промышленной теплоэнергетике [1, 5].

Однако для дальнейшей интенсификации теплообмена и расширения области отвода тепловых нагрузок требуется совершенствование разработанных структур капиллярно-пористых покрытий [2]. В качестве прибора (термоинструмента) применяется горелка ракетного типа [2], позволяющая производить напыление естественных минеральных сред для образования теплоотводящего капиллярно-пористого покрытия.

Главным образом рассматриваются напыление металлов и их сплавов, соединений металлоидного типа и оксидных покрытий [19]. В качестве установок применяются плазматроны с электрической дугой весьма большой мощности (более 40 кВт) и работающие при высоких температурах (более  $(3 \div 4) \cdot 10^3$  К и до  $10^5$  К).

В литературе весьма мало уделено внимания процессам нанесения напылением порошков из естественных минеральных сред горных пород, в том числе с помощью сверхзвуковых высокотемпературных детонационных факелов, которые нами исследуются [5].

### Термоинструмент для напыления покрытий

Термоинструмент выполнен в виде горелки, которая имеет высокотемпературную сверхзвуковую пульсирующую детонационную струю (факел) [2]. Требуется дальнейшее развитие процессов напыления порошков для систем охлаждения камер сгорания и сопел с целью повышения надежности работы теплонагруженных высокофорсированных элементов их конструкций. Термоинструмент выполнен совместно с автоматическим пусковым устройством.

Для проведения детонационного режима работы термоинструмента перспективным способом является конструктивное оформление сверхзвуковых сопел с укороченной диффузной частью. Этот прием нами используется для нанесения напылений порошков горелкой. Система напыления применима и для бензовоздушных и керосино-воздушных горелок, когда в 1,5 раза и более сокращается расход сжатого воздуха, а ресурс камер сгорания увеличивается до 600 ч.

В результате снижения расхода охладителя в десятки раз и отказа от насосов годовой эко-

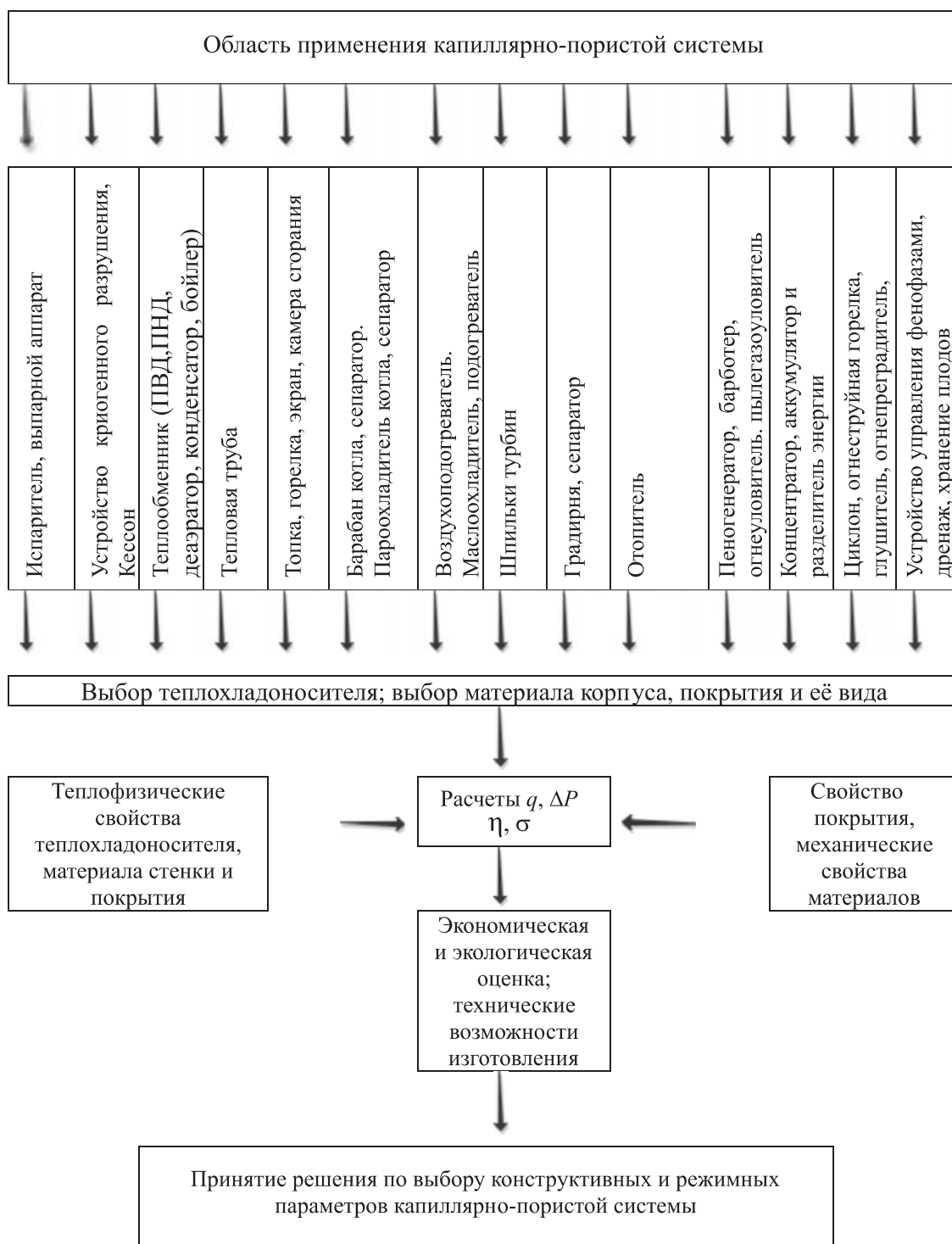


Рис. 1. Область применения и алгоритм проектирования системы

номический эффект на одну горелку составляет не менее 200 – 300 долл.

**Характеристики и параметры керосино-кислородных горелок (термоинструмента) для напыления покрытий**

Расход кислорода  $G_k$  для давления  $P_k = 1,2 \div 1,5$  МПа составляет  $(15 \div 18)$  м<sup>3</sup>/ч.

Расход керосина  $G_{кер}$  для давления  $P_k = 1,3 \div 1,5$  МПа составляет  $(10 \div 12)$  кг/ч.

Критический диаметр сопла  $d_{к.с} \cdot 10^{-3}$  м составляет  $(4 \div 5)$ .

Диаметр камеры сгорания  $d_{к.с} \cdot 10^3$  м, (14).

Параметры струи приведены в табл. 1.

В табл.1 приняты обозначения:  $\alpha$  — коэффициент расхода окислителя;  $P_k$  — давление в камере сгорания, МПа;  $T_a$  — адиабатная тем-

Таблица 1

**Газодинамические параметры струй  
на выходе из сопла горелки**

$\alpha$	$P_k = 1,5 \text{ МПа}$	
	$T_a, \text{ К}$	$W_a, \text{ м/с}$
0,7	2670	2420
0,8	2780	2410
0,9	2830	2400
1	2810	2320

пература в камере сгорания, К;  $W_a$  — адиабатная скорость истечения газа, м/с.

Плотности тепловых потоков  $q$  на поверхности покрытия определялись экспериментально и составили:  $(5 \div 12) \text{ МВт/м}^2$  для  $r=0$  и  $l=(4 \div 12) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $(2 \div 5) \text{ МВт/м}^2$  для  $r = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  и  $l=(4 \div 12) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ . Здесь  $r$  — радиус пятна торможения на покрытии (радиус растекания струи), м;  $l$  — расстояние от среза сопла (выходной части) горелки до покрытия, м.

Распределение  $q(r)$  [6]:

$$q(r) = q_{\max} \cdot \exp(-1000r^2), \text{ Вт/м}^2,$$

где  $q_{\max}$  — максимальное значение плотности теплового потока по оси газовой струи,  $\text{Вт/м}^2$ .

Для более мощной горелки с  $d_k = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и  $d_{k.c} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $G_k$  для  $P_k = 1,8 \text{ МПа}$  составляет  $(30 \div 55) \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $G_{\text{кер}}$  для  $P_k = (1,8 \div 2) \text{ МПа}$  составляет  $(14 \div 18), \text{ кг/ч}$ , т.е.  $q(r=0) = (6 \div 13) \text{ МВт/м}^2$ .

Указанные данные получены экспериментально.

Значение тепловых потоков  $q$  можно уменьшить на порядок при переходе на другой вид горелок: бензовоздушные или керосиновоздушные. Такие горелки применяются для нанесения напыления покрытий минеральной среды с меньшим значением крепости, чем у кварца и гранита.

Регулированию теплообмена факела углом струи к покрытию соответствует табл. 2.

Таблица 2

**Зависимость  $\alpha/\alpha_{90^\circ}$  от  $\beta$**

$\alpha/\alpha_{90^\circ}$	1	1,1	1	0,8	0,5	0,35	0,3	0,25
$\beta, \text{ град.}$	90	80 – 75	60	50	30	20	10	0

В табл. 2 принято:  $\beta$  — угол оси горелки к покрытию, град.;  $\alpha_{90^\circ} = 1000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ;  $T_{\text{ст}}^* = 3000 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{п}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P_z = 1 \text{ МПа}$ .

Для определения параметров напыляемых порошков из минеральных сред (тешенит, гранит, кварцит) решалась задача термоупругости с применением нестационарного уравнения теплопроводности для краевых условий второго рода и предельных тепловых нагрузок, вызывающих термические напряжения сжатия, растяжения, оплавления поверхности покрытия вплоть до его разрушения [3, 5].

Предельные области тепловых нагрузок для естественных минеральных сред (тешенит, гранит, кварцит), не имеющих оплавления поверхности за счет сверхзвуковых скоростей потока с частицами, указаны в работах [3, 5]. Представлены графические решения задачи термоупругости в виде временных зависимостей предельных тепловых нагрузок и термомеханических напряжений как функция гранулометрического состава частиц.

Экспериментальным подтверждением явилось определение размера порошка с помощью скоростной киносъемки и измеренных значений  $q$  и  $\tau$ .

Теплообменные характеристики исследованных нами систем охлаждения из металлических сеток заводского изготовления, напыляемых порошком из минеральных сред, представлены в [2].

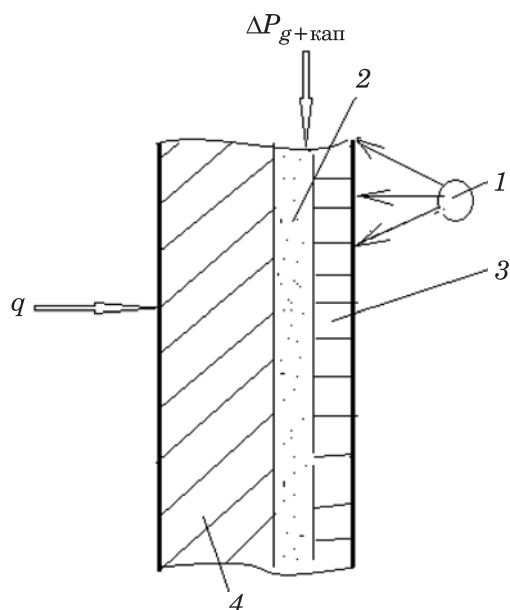
Тепловая защита охлаждаемой поверхности показана на рис. 2.

Отвод плотности теплового потока  $q$  происходит за счет конвективного охлаждения, а подача охладителя осуществляется при совместном действии капиллярных и массовых сил  $\Delta P_{g+\text{кап}}$ .

В данной работе экспериментально получены предельные области тепловых нагрузок для покрытий из металлических сеток и естественных минеральных сред: для тешенитных покрытий  $q = (2 \div 4) \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ ; для гранитных покрытий  $q = (4 \div 6) \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$  и для кварцевых покрытий  $q = (0,6 \div 1,5) \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$  в области  $\Delta T = (20 \div 75) \text{ К}$ .

Таким образом, исследованы комплексные пористые поверхности с микро-нанопорами. Они являются перспективными промышленными продуктами, поскольку дополняют друг друга, компактные и могут выполнять различные тепловые задачи, отводят более высокие тепловые нагрузки по сравнению с существующими высокофорсированными системами ох-





**Рис. 2. Схема тепловой защиты охлаждаемой поверхности:**

1 — распылитель; 2 — капиллярное природное покрытие; 3 — металлическая пористая сетка; 4 — охлаждающая подложка

лаждения, позволяют при совместном действии управлять теплотехническими характеристиками системы охлаждения за счет избытка жидкости  $m = m_{ж}/m_{п}$  при совместном действии массового и капиллярного потенциалов ( $\Delta P_{g+кап}$ ), т.е. имеют синергический эффект.

## Выводы

1. На экспериментальной установке [2] исследован теплообмен для покрытий из минеральных сред металлических сеток в зависимости от характеристик и параметров термоинструмента, теплофизических свойств поверхности нагрева и покрытия. Система напыления применима и для бензовоздушных и керосиновоздушных горелок. Экспериментально получено, что в 1,5 и более раз сокращается расход сжатого воздуха, а ресурс камер сгорания увеличивается до 600 ч. В результате снижения расхода охладителя, отказа от насосов годовой экономический эффект на одну горелку составляет не менее 200 – 300 долл. и резко сокращается расход воды в системе охлаждения, что имеет и экологический эффект.

2. Разработанные устройства систем охлаждения с пористыми покрытиями позволяют выполнять резку железобетонных конструкций детонационными высокотемпературными факелами, истекающими из камер сгорания

и сопел. Совместное использование пористых поверхностей с микро- и нанопокрывтиями металлических сеток делает их компактными и многофункциональными, работающими с более высокими тепловыми нагрузками и эффективным процессом нанесения покрытий.

3. Покрытия показали высокий тепломассообмен в системах охлаждения за счет комбинированного действия капиллярных и массовых сил.

4. Предложен алгоритм проектирования систем охлаждения на основе покрытий из природных материалов. Представлена область применения этих систем для различных промышленных энергетических установок.

5. Экспериментально получены предельные области плотности тепловых нагрузок для покрытий из металлических сеток и естественных минеральных сред: для тешенитных покрытий  $q = (2 \div 4) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; для гранитных покрытий  $q = (4 \div 6) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> и для кварцевых покрытий —  $q = (0,6 \div 1,5) \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> в области  $\Delta T = (20 \div 75)$  К. Эти показатели значительно превосходят результаты, полученные в [7 – 9, 11 – 18].

## Список литературы

1. Поляев, В. М. Применение пористой системы в энергетических установках / В. М. Поляев, А. А. Генбач // Промышленная энергетика. — 1992. — № 1. — С. 40 – 43.
2. Генбач, А. А. Моделирование теплообмена в капиллярно-пористых покрытиях в энергоустановках / А. А. Генбач, Д. Ю. Бондарцев, А. Я. Шелгинский // Промышленная энергетика. — 2020. — № 6. — С. 31 – 38.
3. Поляев, В. М. Предельное состояние поверхности при термическом воздействии / В. М. Поляев, А. Н. Генбач, А. А. Генбач // ТВТ. — 1991. — Т. 29, № 5. — С. 923 – 934.
4. Polyayev, V. Control of Heat Transfer in a Power Cooling System / V. Polyayev, A. Genbach // Second world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. — 1991. — Dubrovnik, Yugoslavia, 23 – 28 June. — Pp. 639 – 644.
5. Genbach, A. A. Comparison of Cooling Systems in Power Plant Units / A. A. Genbach, D. Bondartsev, H. I. Beloiev // Energies. — 2021. — Vol. 14, ssue 19, 6365. — Pp. 1 – 14.
6. Genbach, A. A. Boiling crisis in porous structures / A. A. Genbach, D. Bondartsev, H. I. Beloiev, N. A. Genbach // Energy, 2022, 259, 125076. Pp. 1 – 12.
7. Wei Wang. Efficiency study of a gas turbine guide vane with a newly designed combined cooling structure / Wei Wang // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2015. — January Vol. 80. —

- Pp. 217 – 226. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.024.
8. **Xing Yang. Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow** / Xing Yang, et at. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. — September. — Vol. 140. — Pp. 25 – 40. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109.
  9. **Seong Won Moon. A novel coolant cooling method for enhancing the performance of the gas turbine combined cycle** / Seong Won Moon, et at. // Energy. 2018. — 1 October. — Vol. 160 — Pp. 625 – 634. DOI: 10.1016/j.energy.2018.07.035.
  10. **Genbach, A. A. Thermal Science** / A. A. Genbach, D. Yu. Bondartsev, I. K. Iliev. 2019. — Vol. 23, Issues 2, Pp. 849 — 860. DOI: 10.2298/TSCI171016139G.
  11. **Riadh Boubaker. Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application** / Riadh Boubaker, Vincent Platel. *Energy*. 2016. — 15 September. — Vol. 111, 2016. — Pp. 402 – 413. DOI: 10.1016/j.energy.2016.05.102.
  12. **Gang, Lei. The convective heat transfer of fractal porous media under stress condition** / Gang Lei, Weirong Li, Qingzhi Wen // International Journal of Thermal Sciences. — 2019. — March. — Vol. 137. — Pp. 55 – 63. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.017.
  13. **Shoji Mori. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media** / Shoji Mori, Kunito Okuyama // International Journal of Multiphase Flow. — 2009. — October. — Vol. 35. — Pp. 946 – 951. DOI: 10.1016/j.ijmulliphascflow.2009.05.003.
  14. **Mieczyslaw E. Poniewski. Peculiarities of boiling heat transfer on capillary-porous coverings** / Mieczyslaw E. Poniewski // International Journal of Thermal Sciences. Volume 43, Issue 5, May 2004. Pages 431 – 442. DOI: 10.1016/i.iithermalsci.2003.10.002.
  15. **Kimihide Odagiri. Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe** / Kimihide Odagiri, Hosei Nagano // International Journal of Thermal Sciences. — 2019. — Vol. 140, June. — Pp. 530 – 538. DOI: 10.1016/i.iithermalsci.2019.03.008.
  16. **Xianbing Ji, et at. Pool boiling heat transfer on uniform and non-uniform porous coating surfaces** / Xianbing Ji, et at. // Experimental Thermal and Fluid Science. Volume 48, July 2013, Pages 198 – 212. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.03.002.
  17. **Chang, Y. H. Experimental investigation on bubble dynamics and boiling heat transfer for saturated pool boiling and comparison data with previous works** / Y. H. Chang, Y. M. Ferng // Applied Thermal Engineering. Volume 154, 25 May 2019, Pp. 284 – 293. DOI: 10.1016/i.applthermaleng.2019.03.092.
  18. **Chuang, T. J. Investigating effects of heating orientations on nucleate boiling heat transfer, bubble dynamics, and wall heat flux partition boiling model for pool boiling** / T. J. Chuang, Y. H. Chang, Y. M. Ferng // Applied Thermal Engineering. Vol. 163, 25 December 2019, 114358. DOI: 10.1016/i.applthermaleng.2019.114358.
  19. **Газотермическое напыление**. Под ред. Л. X. Балдаева. — М.: Маркет ДС, 2007. — 344 с.
  20. **Hasui, A. Cladding and spraying** /per. From Jap. Edited by V. S. Stepin, N. G. Shesterkin / A. Hasui, O. Morigaki. — М.: Mashinostroenie, 1985. — 240 p. (in Russ.).

## References

1. **Polyaev V. M., Genbach A. A. Promyshlennaya energetika** (Industrial power engineering), 1992, No. 1, pp. 40 – 43.
2. **Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Shelginsky A. Ya. Promyshlennaya energetika** (Industrial power engineering), 2020, No. 6, pp. 31 – 38.
3. **Polyaev V. M., Genbach A. N., Genbach A. A. TVT** (TVT), 1991, Vol. 29, No. 5, pp. 923 – 934.
4. **Polyaev V., Genbach A.** Control of Heat Transfer in a Power Cooling System, Second world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics, 1991, Dubrovnik, Yugoslavia, 23 – 28 June, pp. 639 – 644.
5. **Genbach A. A., Bondartsev D., Beloiev H. I.** Comparison of Cooling Systems in Power Plant Units, *Energies*, 2021, Vol. 14, Issue. 19, No. 6365, pp. 1 – 14.
6. **Genbach A. A., Bondartsev D., Beloiev H. I., Genbach N. A.** Boiling crisis in porous structures, *Energy*, 2022, No. 259, 125076, pp. 1 – 12.
7. **Wei Wang.** Efficiency study of a gas turbine guide vane with a newly designed combined cooling structure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, January, Vol. 80, pp. 217 – 226, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.024.
8. **Xing Yang.** Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, September, Vol. 140, pp. 25 – 40, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109.
9. **Seong Won Moon.** A novel coolant cooling method for enhancing the performance of the gas turbine combined cycle, *Energy*, 2018, 1 October, Vol. 160, pp. 625 – 634, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.energy.2018.07.035.
10. **Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Iliev I. K.** Thermal Science, 2019, Vol. 23, Issues 2, pp. 849 – 860, [Electronic resource]. — DOI: 10.2298/TSCI171016139G.
11. **Riadh Boubaker, Vincent Platel.** Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application, *Energy*, 2016, 15 September, Vol. 111, 2016, pp. 402 – 413, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.energy.2016.05.102.
12. **Gang Lei, Weirong Li, Qingzhi Wen.** The convective heat transfer of fractal porous media under stress condition, *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, March, Vol. 137, pp. 55 – 63, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.017.

13. **Shoji Mori, Kunito Okuyama.** Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media, *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, October, Vol. 35, pp. 946 – 951, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.ijmulliphaselw.2009.05.003.
14. **Mieczyslaw E. Poniewski.** Peculiarities of boiling heat transfer on capillary-porous coverings, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 43, Issue 5, May 2004, pp. 431 – 442, [Electronic resource]. — URL: DOI: 10.1016/j.iithermalsci.2003.10.002.
15. **Kimihide Odagiri, Hosei Nagano.** Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe, *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, Vol. 140, June, pp. 530 – 538, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.iithermalsci.2019.03.008.
16. **Xianbing Ji.** Pool boiling heat transfer on uniform and non-uniform porous coating surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 48, July 2013, pp. 198 – 212, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.03.002.
17. **Chang Y. H., Ferng Y. M.** Experimental investigation on bubble dynamics and boiling heat transfer for saturated pool boiling and comparison data with previous works, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 154, 25 May 2019, pp. 284 – 293, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/i.applthermaleng. 2019. 03.092.
18. **Chuang T. J., Chang Y. H., Ferng Y. M.** Investigating effects of heating orientations on nucleate boiling heat transfer, bubble dynamics, and wall heat flux partition boiling model for pool boiling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 163, 25 December 2019, p. 114358, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/i.applthermaleng.2019.114358.
19. **Baldaev L. H.** *Gazotermicheskoe napylenie* (Thermal spraying), Moscow, Market DS, 2007, 344 p.
20. **Hasui A., Morigaki O., Stepin V. S., Shesterkin N. G.** Cladding and spraying / per. From Jap., Moscow, Mashinostroenie, 1985, 240 p. (in Russian).

**a.genbach@aes.kz**

## Cooling of power installations with coatings from mineral mediums

Genbach A. A., Genbach N. A., Andreeva E. A., Shelginsky A. Ya.

Coatings obtained by spraying natural materials and intended for cooling highly forced and intensive industrial power plants have been studied. Mineral media from strong rocks (granite, quartzite, teschenite) were used as materials. The areas of application of the porous cooling system have been developed and studied and a design scheme has been given, and many installations have been introduced into production. Nanoscale and microscale surfaces were used as coatings. The thermal tool for spraying coatings was a rocket burner with a high-temperature supersonic pulsating detonation jet. The characteristics and parameters of a thermal tool operating on a kerosene-oxygen mixture with a coefficient of excess oxidizer on the coating surface less than one were obtained. Afterburning of kerosene was carried out on the coating. The specific heat flows on the coating were (5 – 12) MW/m<sup>2</sup> with an optimal jet length of (4 – 12) × 10<sup>-2</sup> m. The distribution of heat flow is determined depending on the radius of the stagnation spot. The heat transfer of the torch was regulated by the power of the burner, the length and angle of inclination of the jet to the coating. The dependence of heat flows causing compressive, tensile and melting stresses on the surface of the coating and substrate on the size of the powder and the time of heat supply was revealed. A comparison of porous surfaces with a micro-nanoscale showed advantages over other systems and, when used together, makes it possible to control the thermal characteristics of industrial power plants.

**Keywords:** natural materials, coatings, combustion chamber, thermal tools.

EDN: TTRXTW

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

## Использование технологии циркулирующего кипящего слоя для получения метанола

Рябов Г. А., доктор техн. наук, Фоломеев О. М.  
АО «ВТИ», Москва

Показано, что метанол является потенциально жизнеспособным топливом в контексте технологии Power-to-Fuels, где избыточная возобновляемая электроэнергия может быть преобразована в водород с помощью электролиза воды, а затем подвергнута реакции с  $\text{CO}_2$  с образованием метанола. Дымовые газы электростанций могут обеспечить относительно концентрированный поток  $\text{CO}_2$  для этой реакции. Рассмотрены технологии получения метанола с минимальным углеродным следом. Предложена новая схема на основе использования технологии циркулирующего кипящего слоя при сжигании и газификации биомассы.

**Ключевые слова:** декарбонизация, полезные продукты из твердых топлив, производство метанола, выбросы  $\text{CO}_2$ , биомасса, циркулирующий кипящий слой.

В [1] представлен обзор развития технологии переработки угля в химические продукты с акцентом на получение различных видов топлива, их потенциальную привлекательность, а также на экономические риски, связанные с волатильностью мировых цен на газ. Такой подход обеспечивает эффективную переработку малоценных низкосортных угольных активов в более ценную и более доступную продукцию. При этом современные системы конверсии угля на основе газификации требуют значительных предварительных капиталовложений. Многие такие проекты осуществляются по стратегическим причинам — таким как необходимость ограничения импорта природного газа и нефти, обеспечивая определённый уровень национальной энергетической безопасности. При этом конечные продукты имеют значительную ценность и способствуют снижению воздействия на окружающую среду по сравнению с исходным углём.

По сравнению с водородом и метаном метанол — жидкость в условиях окружающей среды, что обеспечивает лучшее хранение и транспортировку. Он может использоваться в двигателях внутреннего сгорания без специальной модификации [2] при снижении выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  по сравнению с традиционными ископаемыми видами топлива. Метанол является потенциально жизнеспособным топливом в контексте технологии Power-to-Fuels, где избыточная возобновляемая электроэнергия мо-

жет быть преобразована в водород с помощью электролиза воды, а затем подвергнута реакции с  $\text{CO}_2$  с образованием метанола. Дымовые газы угольных электростанций или от промышленных процессов могут обеспечить относительно концентрированный поток  $\text{CO}_2$  для этой реакции.

Метанол можно производить из угля, биомассы, нефти и природного газа с использованием процесса конверсии (рис. 1). 10 лет назад ожидалось, что использование метанола будет быстро расти, но этого не произошло. Китай представляет собой ключевой ориентир для экономики метанола, поскольку производит 70 % метанола из угля, причем еще в 2016 г. путем смешивания около 21 млн т метанола с бензином было получено топливо для транспортных средств. В настоящее время единственная в мире действующая промышленная установка по производству метанола из  $\text{CO}_2$  — это установка Джорджа Олаха в Исландии (введена в эксплуатацию в 2012 г.), которая преобразует до 5,6 тыс. т  $\text{CO}_2$  в 5 млн л метанола в год, используя геотермальную энергию для производства водорода.

Важно, чтобы метанол производился с минимальными выбросами  $\text{CO}_2$  (зеленый метанол). В этом плане значительные перспективы появляются при использовании различных гибридных систем и биомассы в качестве углеродно-нейтрального топлива.



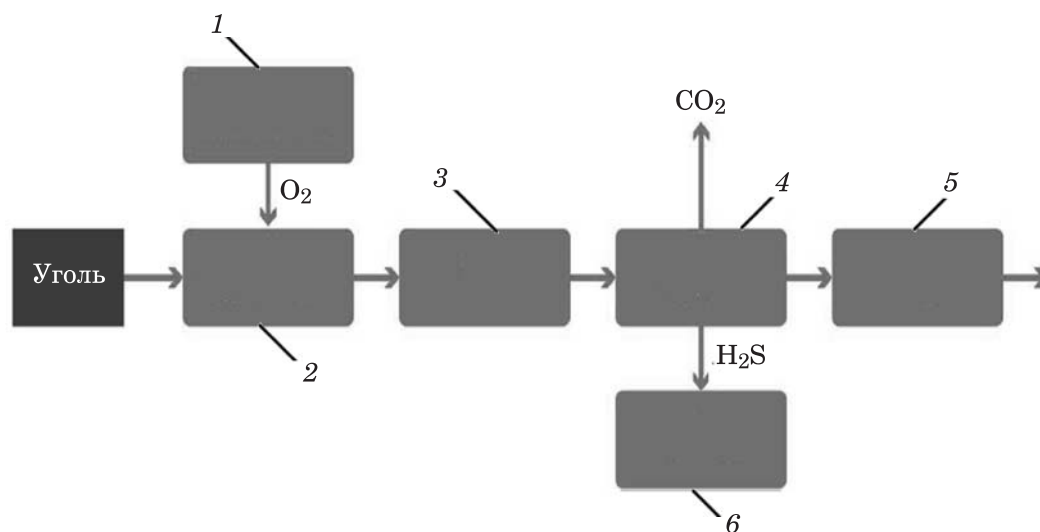
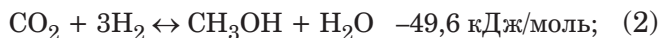


Рис. 1. Блок-схема преобразования угля в метанол [3]:

1 — воздухоразделительная установка; 2 — газификация угля; 3 — кислый сдвиг (реактор конверсии кислых газов); 4 — удаление кислых газов; 5 — очистка от серы; 6 — синтез метанола

### Технологии производства метанола

В настоящее время метанол обычно производится при температурах около 200 – 300 °С и давлениях 5 – 10 МПа каталитическим гидрированием СО и СО<sub>2</sub>, полученных в основном в результате паровой конверсии природного газа на медных катализаторах [4, 5]. В настоящее время все коммерчески налаженные процессы получения метанола осуществляются с использованием композитных катализаторов Cu/ZnO/Al. Образование метанола на основе синтез-газа можно описать следующими реакциями (температура — 300 °К):



Синтез метанола в целом является экзотермическим, т.е. выделяемое тепло должно эффективно отводиться, чтобы избежать как дезактивации катализатора, так и образования побочных продуктов. Схема изотермического реактора впервые была предложена Линде с использованием кожухотрубной конструкции. Трубы, заполненные катализаторами, работают при температуре около 255 °С и давлении 55 бар. Произведенное тепло отводится за счет циркуляции холодной воды со стороны корпуса, в результате генерируется пар высокого давления для других целей. В настоящее время функционируют около 340 заводов по производству метанола общей мощностью око-

ло 140 млн т в год. В ближайшие 10 лет метанол, полученный из ископаемого топлива, останется доминирующим. Уголь в качестве сырья будет использоваться в Китае, Индии и Индонезии.

Поскольку производство метанола из СО<sub>2</sub> и возобновляемого водорода находится в относительно зачаточном состоянии, связанные с этим затраты и риски высоки. Поддерживающая политика и финансовые стимулы, включая налоговые льготы, будут стимулировать усилия по развитию этих проектов. Ожидается, что к 2050 г. возобновляемый метанол достигнет паритета стоимости с метанолом, полученным из ископаемого топлива. Интерес представляют и разработки схем получения метанола с использованием котлов с кипящим слоем при сжигании биомассы.

### Гибридные схемы получения метанола

Гибридные схемы получения метанола с минимальным углеродным следом зачастую связаны с применением электролизеров, использующих электроэнергию от возобновляемых источников для получения водорода и сжигательных устройств, генерирующих СО<sub>2</sub>. Затем потоки этих веществ направляются в метанатор [6]. Цель данной работы — выбор процессов для децентрализованной системы получения метанола в установке тепловой мощностью 20 МВт, использующей древесную щепу. Было выполнено моделирование нескольких подпроцессов: сжигания в среде ки-

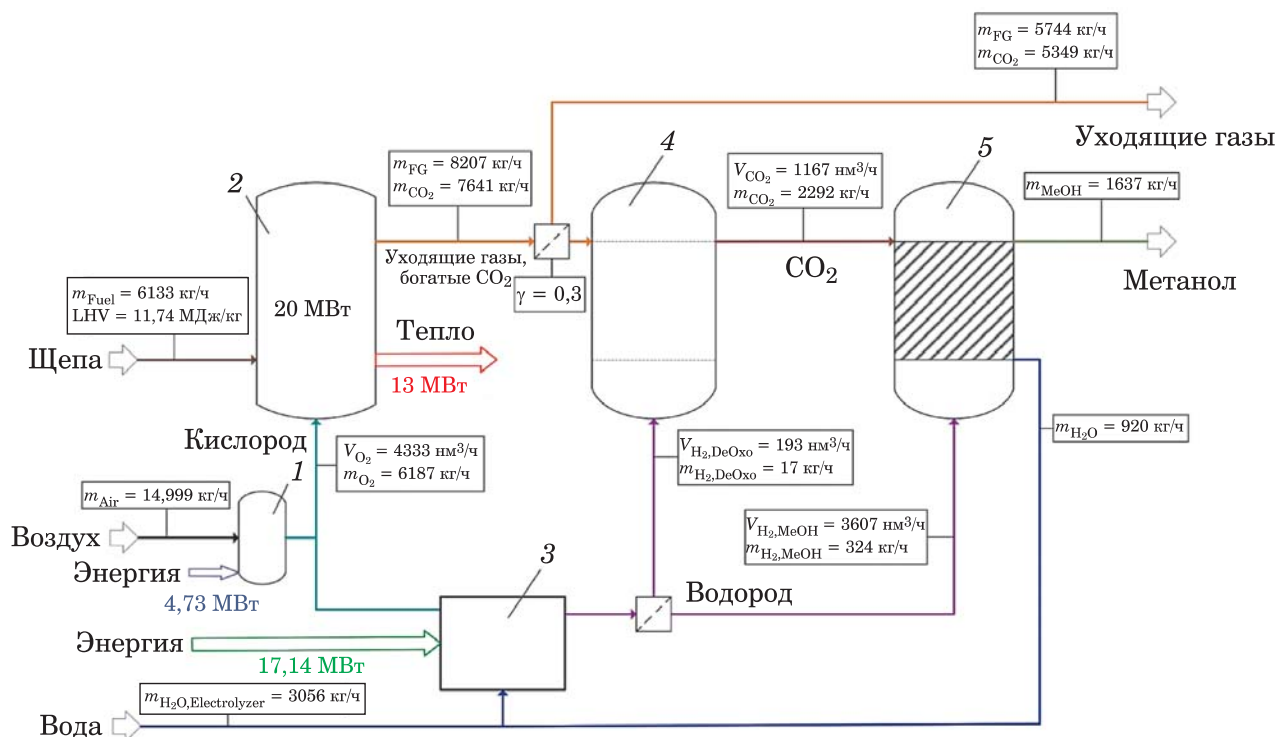


Рис. 2. Схема потоков при кислородном сжигании биомассы:

1 — воздухоразделительная установка; 2 — котел с КС; 3 — электролизер; 4 — установка DeOxo + дегидратация; 5 — синтез метанола

слорода с рециркуляцией  $\text{CO}_2$  в сочетании с реактором DeOxo, сжигания в воздушной среде, включая улавливание  $\text{CO}_2$  путем абсорбции, синтеза метанола, использования щелочного электролизера. По всем этим процессам были выполнены тепловые и массовые балансовые расчеты. Результаты расчета схемы при кислородном сжигании приведены на рис. 2.

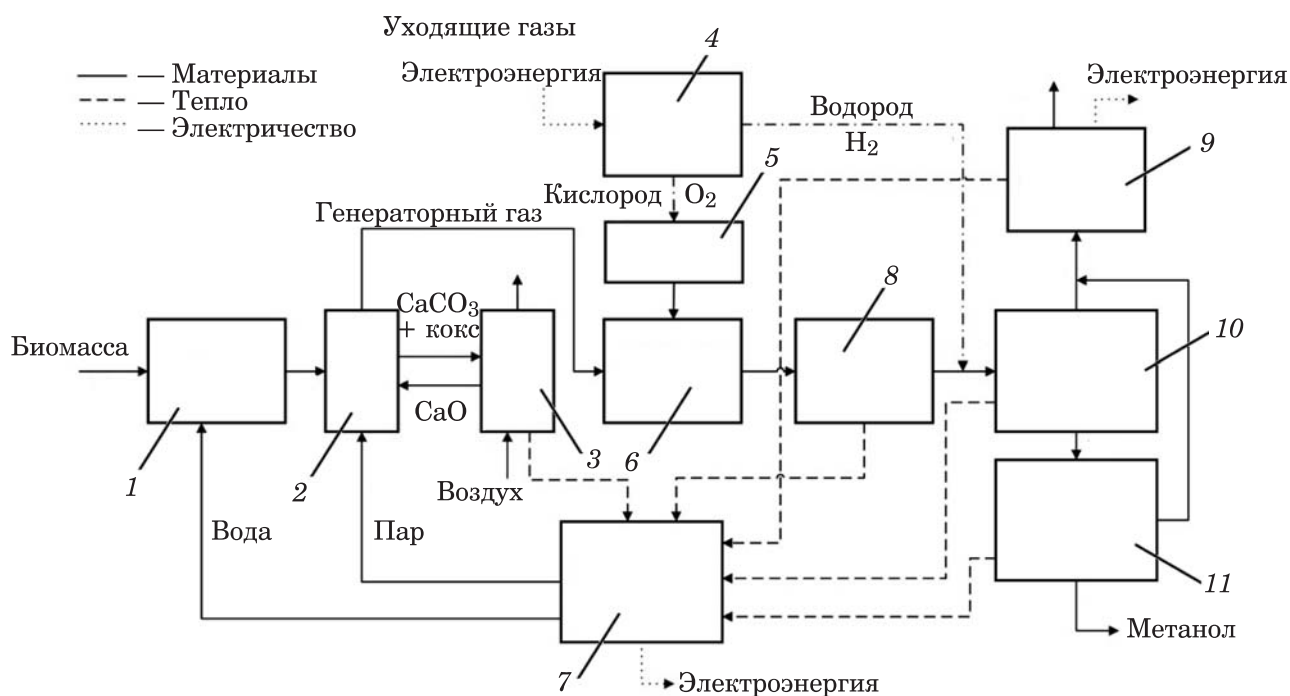
Была выполнена технико-экономическая оценка [7] представленной в [6] концепции завода по производству зеленого метанола. Оказалось, что цена зеленого метанола не может конкурировать с рыночными ценами на метанол, полученный из ископаемого топлива (природного газа). Чистые производственные затраты в размере 785 евро/т в 2022 г. могут быть реализованы для базового сценария на основе электролизера номинальной мощностью 50 МВт<sub>эл</sub>.

В [8] рассмотрены вопросы интеграции установок газификации биомассы с электролизными установками, которые производят водород, для объединения с обогащенным CO и  $\text{CO}_2$  синтетическим газом. В ней представлен технико-экономический анализ трех гибких установок по переработке энергии и биомассы

в метанол, основанных на различных технологиях газификации: прямой газификации, непрямо́й газификации и сорбционно-интенсифицированной газификации. Конструкция и эксплуатационные критерии каждой установки рассчитаны на работу как без добавления зеленого водорода (базовый режим), так и с добавлением водорода (расширенный режим) от электролизера, который включается, когда цена на электроэнергию позволяет экономически выгодное производство водорода.

Установки по производству метанола включают в себя блок газификации, блок очистки, кондиционирования и сжатия синтетического газа, блок синтеза и очистки метанола, а также паровой цикл с возможностью гибкой эксплуатации. На рис. 3 показана блок-схема установки «энергия и переработка биомассы в метанол» (PBtM), рассмотренная в [8], на основе непрямо́й газификации с инертным теплоносителем (IG).

Древесную биомассу подают в сушилку для снижения влажности с 45 до 15 %, а высушенную биомассу направляют на блок газификации. В установках, основанных на непрямо́й газификации (рис. 4), твердый теплоноситель циркулирует между камерой сгорания с более



**Рис. 3. Блок-схема установки по производству электроэнергии и переработке биомассы в метанол на базе ИБ:**

1 — сушиллка; 2 — газогенератор с инертным теплоносителем; 3 — дожигатель кокса; 4 — электролизер; 5 — хранилище кислорода; 6 — автотермический риформинг; 7 — утилизатор тепла парового цикла; 8 — очистка синтетического газа, кондиционирование и сжатие; 9 — двигатель внутреннего сгорания; 10 — синтез метанола; 11 — очистка метанола

высокой температурой и газификатором с пониженной температурой, чтобы обеспечить теплоту, необходимую для газификации биомассы. Теплота генерируется в результате сгорания полукокса, который поступает из газификатора в камеру сгорания. После газификатора размещена установка каталитического автотермического риформинга, а также установка высокотемпературной фильтрации для преобразования метана и смолы в полезные реагенты для синтеза (СО и Н<sub>2</sub>).

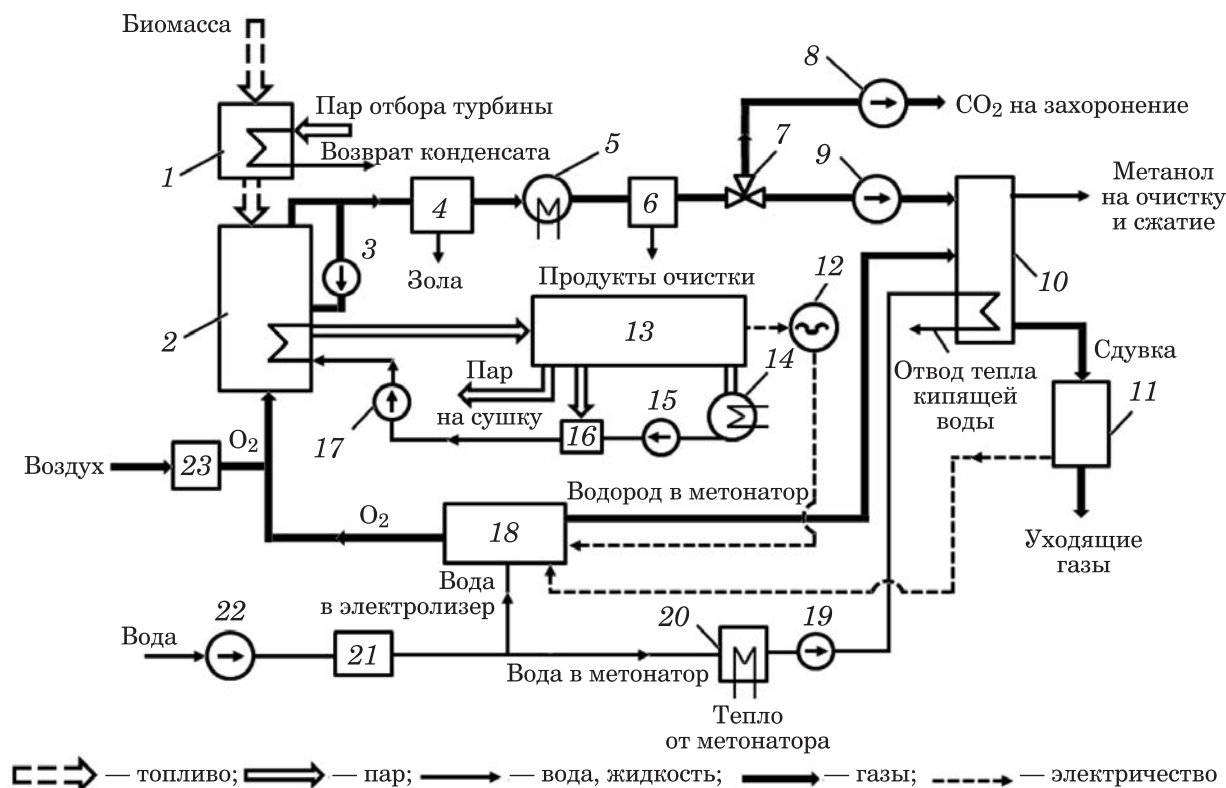
#### Схема установки сжигания биомассы в циркулирующем кипящем слое с выработкой электроэнергии для получения метанола

Для условий России с ограниченными возможностями использования энергии ветра и солнца при низких ценах на биомассу возможным направлением исследований гибридных систем является применение схем со сжиганием или газификацией биомассы с производством электроэнергии от этих процессов для электролиза с получением водорода. Подобные предложения рассмотрены ВТИ применительно к получению водорода.

Возможная схема получения метанола с использованием подходов, изложенных в [9],

представлена на рис. 4. Сырая биомасса подается в паровую сушилку 1 и далее в котел с ЦКС 2. Котел с ЦКС при давлении, несколько превышающем атмосферное (на сопротивление линии отвода дымовых газов, порядка 20 КПа), работает в режиме кислородного сжигания с рециркуляцией СО<sub>2</sub> за счет дымососа 3. Этот дымосос забирает охлажденные в конвективной части котла (на схеме не показана) дымовые газы, содержащие в основном поток СО<sub>2</sub> с парами воды и небольшой долей неконденсирующихся газов, и направляет их обратно в котел с ЦКС. Кислород в котел поступает от электролизера 8 и воздухоразделительной установки (ВРУ) 23.

Поток СО<sub>2</sub> от котла подается в фильтр тонкой очистки от частиц (рукавный фильтр) и далее на конденсацию паров воды 5 и в систему очистки от соединений серы, азота и излишков кислорода 6. Очищенный поток СО<sub>2</sub> может разделяться шибером 7 на поток для захоронения, на котором установлен компрессор 8 для его сжатия примерно до 10 МПа, и поток, сжатый в компрессоре 9 до 2–3 МПа, поступающий в метанатор 10. Образовавшийся метанол подается на дополнительную очистку (на схеме не показана) и далее потребителю. Газы (сдувка) из метанатора используются для



**Рис. 4. Схема получения метанола с использованием котла с ЦКС при атмосферном давлении:**

1 — сушилка биомассы; 2 — котел с ЦКС; 3 — дымосос рециркуляции; 4 — фильтр очистки от частиц; 5 — конденсатор влаги газов от котла с ЦКС; 6 — система очистки от соединений серы, азота и избытков кислорода; 7 — шибер переключения потоков  $\text{CO}_2$ ; 8 — компрессор сжатия  $\text{CO}_2$  для захоронения; 9 — компрессор сжатия  $\text{CO}_2$  для подачи в метанатор; 10 — метанатор; 11 — утилизатор сдвух из метанатора (двигатель и утилизатор тепла); 12 — генератор турбины; 13 — паровая турбина; 14 — конденсатор турбины; 15 — конденсатный насос; 16 — подогреватели воды; 17 — питательный насос котла; 18 — электролизер; 19 — насос подачи воды для охлаждения метанатора; 20 — теплообменник подогрева воды для метанатора; 21 — водоподготовительная установка; 22 — насос подачи сырой воды; 23 — воздуходелительная установка

получения дополнительного потока электроэнергии и теплоты в 11 (например, в двигателе внутреннего сгорания или поршневой машине).

В метанатор подается водород от электролизера 18. Отвод теплоты от метанатора 10 осуществляется кипящей водой, теплота утилизируется в теплообменнике 20 подогрева химически очищенной воды 21, подаваемой насосом 19. Остальные элементы схемы охлаждения и подогрева на рис. 4 не показаны. Вода от насоса 21 после очистки поступает также в электролизер 18 и для подпитки конденсатного тракта паровой турбины 13.

Пар от котла 2 поступает в паровую турбину 13 с электрогенератором 12. Конденсат пара после конденсатора 14 направляется конденсатным насосом 15 в систему регенеративного подогрева 16 и далее питательным насо-

сом 17 в котел 2. Пар из отбора турбины используется для сушки биомассы. Электроэнергия от генератора 12 паровой турбины 13 и системы утилизации тепла сдвух из метанатора 11 подается в электролизер 18.

Исходными данными для расчета паросиловой установки являются данные нашей предыдущей разработки, а именно: расход пара от котла 100 т/ч, параметры пара — температура 510 °С, давление 10 МПа. В результате тепловая мощность составила 76,7 МВт. Следует отметить, что параметры пара и мощность близки к характерным для отечественной турбины К 25-8,8 производства КТЗ.

Прежде всего необходимо было определить показатели котла с ЦКС при кислородном сжигании. Биомасса — щепка с теплотой сгорания 8,52 МДж/кг (2440 ккал/кг, влажность 40 %). Для сушки ее используется пар отбора турби-



## Показатели котла с ЦКС при кислородном сжигании подсушенной щепы

Показатель	Значение	
	21 % кислорода	30 % кислорода
КПД котла, %	93,0	94,65
Расчетный расход щепы, т/ч	17,4	17,1
Общий расход кислорода, тыс. нм <sup>3</sup> /ч	15,8	15,5
Температура горячего кислорода, °С	250	
Расход газов рециркуляции, тыс. нм <sup>3</sup>	56,3	34,3
Расход дымовых газов за котлом, тыс. нм <sup>3</sup> /ч	71,2	49,0
Температура уходящих газов, °С	130	
Расход донной золы, кг/ч	16,0	15,7
Расход летучей золы, кг/ч	143,8	141,4
Сечение топочной камеры, м <sup>2</sup>	30,8	20,9
Высота топочной камеры, м	22,1	26,8

ны с давлением 0,5 МПа и температурой 160 °С. Это приводит к незначительному снижению электрической мощности турбины, которое с большим запасом компенсируется использованием тепла от конденсации паров воды, тепла, отводимого от метанатора, и электроэнергии от поршневой машины на сдвукке из метанатора.

При расчете котла определялись не только его технические показатели, но и размеры топки. Кислородное сжигание рассчитывалось в вариантах, когда содержание кислорода в смеси с СО<sub>2</sub> 21 % (также, как и в воздухе) и для повышенного до 30 % содержания кислорода. Результаты расчетов сжигания подсушенной щепы приведены в таблице.

КПД котла при увеличении доли кислорода заметно растет, при этом сечение топки снижается, а высота увеличивается для снятия того же количества тепла. Расход кислорода составляет 15,8 – 15,5 тыс. нм<sup>3</sup>/ч. Если применяется ВРУ криогенного типа, то при удельном расходе электроэнергии по данным НПО «Гелий-маш» 0,38 кВт·ч/м<sup>3</sup> О<sub>2</sub> потребуется около 6,0 – 5,89 МВт. Значительные затраты электроэнергии получают при сжатии СО<sub>2</sub> (0,133 кВт·ч/м<sup>3</sup> СО<sub>2</sub>). Они составляют около 2 МВт. Еще один крупный потребитель электроэнергии — дымосос рециркуляции. По известным аналогам таких дымососов расход электроэнергии при 21 % кислорода составит

около 1,16 МВт, а для 30 % кислорода – 0,61 МВт. Другие затраты на собственные нужды не превышают 0,6 МВт.

При выработке электроэнергии паровой турбины на уровне 27 МВт на электролизер поступает около 17 МВт электричества. При этом вырабатывается около 2 тыс. нм<sup>3</sup>/ч кислорода, а значит, на эту величину следует уменьшить расход кислорода от ВРУ. Тогда затраты электроэнергии на собственные нужды составят соответственно 9 и 8,34 МВт. Если для обоих вариантов принять одинаковую мощность электролизера 18 МВт, то будет произведено 368 кг/ч водорода (из них 352 кг/ч в метанаторе), из которого получится 1778 кг/ч метанола. При этом расход СО<sub>2</sub> — примерно 1300 нм<sup>3</sup>/ч. Таким образом, около 90 % полученного СО<sub>2</sub> пойдет на захоронение. Учет различных затрат на собственные нужды дает некоторое преимущество варианту с концентрацией кислорода 30 %. В этом случае расход водорода составит 374 кг/ч (из них 358 кг/ч в метанаторе), а метанола — 1809 кг/ч.

Необходимо отметить, что для работы электролизера потребуется хорошо очищенная вода (примерно, как для котла). Расход ее составляет около 5 т/ч для производства водорода с максимальным расходом. Кроме того, вода нужна для подпитки по конденсатному тракту турбины и для восполнения потерь в тракте охлаждения метанатора кипящей водой.

### Технико-экономические оценки

Для сравнения предложенной системы получения водорода с другими системами генерации водорода с низким углеродным следом необходимо выполнить оценку приведенной стоимости водорода в течение жизненного цикла и определить углеродный след (в г  $\text{CO}_2$  на кг  $\text{H}_2$ ). Приведенная стоимость производства продукта (электроэнергии или водорода) рассчитывается как результат деления суммы затрат (капитальные затраты, затраты на топливо и другие эксплуатационные затраты, например, оплаты труда, ремонты) по каждому году с учетом переменного дисконта на сумму произведенного продукта по годам также с учетом дисконта. Для упрощения дисконт принят равным 5 % и одинаковым по годам, он важен только для эксплуатационных расходов и расходов на топливо. Жизненный цикл принят равным 30 годам без учета строительства (2 года). Все расчеты выполнены в рублях с переводом в доллары США (для сравнения) по курсу на конец 2023 г. (около 91 руб. за 1 долл. США).

Для упрощения и лучшей возможности сравнения с другими установками получения метанола расчеты были сделаны только для варианта, когда вся электрическая мощность за вычетом затрат на собственные нужды идет на его производство. Удельные капитальные затраты на паросиловую установку приняты равными 2000 долл. США за установленный 1 кВт. Эти затраты включают все инвестиции от проектирования до ввода в эксплуатацию всего комплекса паросилового оборудования и выдачи мощности. Для рассмотренной установки эти затраты равны 53,4 млн долл. США. Капитальные затраты на электролизер по усредненным зарубежным данным в настоящее время составляют около 700 долл. США за 1 кВт. При мощности электролизера 18 МВт максимальные затраты составят 12,6 млн долл. США.

Третьей (наиболее крупной) статьей капитальных затрат является ВРУ. Затраты на современных крупных установках — порядка 4000 – 2000 долл. США за 1 кубометр кислорода в час. При нашем расходе кислорода максимальные капитальные затраты составят 6 млн долл. США. Оценка капитальных затрат на метанацию выполнена по данным [8] с пересчетом по производительности метанола. Они составят 4,15 млн долл. США.

Расчет стоимости паровой панельной сушилки проводился исходя из ее показателей (номинальный расход щепы — 28,75 т/ч со снижением влажности от 40 % до 8 %). Было принято увеличение производительности с запасом 1,5. Ближайший аналог — панельная сушилка ППС 4000/8000 с производительностью 40 т/ч. Она представляет собой барабан диаметром 4 м и длиной 8 м. Ориентировочная стоимость — около 80 млн руб. (0,87 млн долл. США).

Фильтр очистки дымовых газов после котла с ЦКС взят по аналогии с рукавными фильтрами производства «Кондор Эко – СФ НИИОГАЗ». Его ориентировочная стоимость — около 65 млн руб. (0,71 млн долл. США).

Затраты на дополнительные теплообменники и трубопроводы газов в пределах установки оценены в пределах 60 млн руб. (0,65 млн долл. США).

Капитальные затраты на сжатие и очистку потоков  $\text{CO}_2$  отличаются по вариантам незначительно. Они оценены по данным [8] с пересчетом на расход газа и исходя из мощности привода компрессора. Эти капитальные затраты оценены как 3,02 млн долл. США. Небольшая разница имеется в капитальных затратах на дымососы рециркуляции: 0,7 и 0,4 млн долл. США.

Все составляющие капитальных затрат уже учитывают проектирование, строительство и пуско-наладочные работы по основным элементам установки. Суммарные капитальные затраты равны 82,07 млн долл. США для варианта с концентрацией кислорода 21 % и 81,27 млн долл. США для варианта с концентрацией кислорода 30 %. Для оценки непредвиденных затрат при сооружении установки примем увеличение стоимости на 10 % — 90,3 и 89,4 млн долл. США или 8217 млн руб. и 8135 млн руб. соответственно.

Эксплуатационные расходы прежде всего зависят от затрат на топливо. По многочисленным данным о стоимости технологической щепы в диапазоне от 100 до 300 руб. за 1 м<sup>3</sup> принято усредненное значение (с учетом насыпной плотности) 10 долл. США за 1 т. В результате годовые затраты на топливо при расходе сырой щепы составят 29,4 т/ч и 27,7 т/ч при 7000 часах использования номинальной мощности 2,06 и 1,94 млн долл. США.

Эксплуатационные затраты на обслуживание электролизера обычно считают от установленной мощности. Для условий ТЭС они могут

составлять до 2 % от стоимости электролизера, т.е. 0,25 млн долл. США в год. Оценка затрат на катализатор в метанаторе выполнена по зарубежным источникам с пересчетом на расход метана. Они не превышают 0,2 млн долл. США в год. Годовые затраты на воду, стоки, песок и сорбенты для системы очистки газа ориентировочно составляют 0,4 млн долл. США.

Таким образом, переменные эксплуатационные годовые затраты по вариантам равны 2,91 и 2,78 млн долл. США. Жизненный цикл принят равным 30 годам без учета строительства (3 года). Принято, что с использованием номинальной мощности в год установка работает 7000 ч. Для упрощения считаем, что в период наладки и освоения мощности среднее число часов работы в год — 4000. Тогда переменные эксплуатационные затраты за жизненный цикл работы установки равны 83,56 и 79,83 млн долл. США. Условно постоянные затраты в нашем случае могут быть очень высокими — до 40 % от переменных затрат, что за 30 лет эксплуатации будет составлять 34,92 и 33,36 млн долл. США.

Складывая капитальные и эксплуатационные расходы, получаем затраты за жизненный цикл 208,78 и 202,59 млн долл. США. В режиме концентрации кислорода 21 % установка вырабатывает 357,4 млн кг метанола в год, а при концентрации 30 % — 363,62 млн кг метанола. Таким образом, приведенная за жизненный цикл стоимость метанола (LCOF) составляет 584 и 557 долл. США за 1 т метанола (примерно 53 и 50,7 тыс. руб.). Если учесть дисконт (например, как инфляцию 5 % в год), эти значения сильно вырастут до 818 и 774 долл. США за 1 т метанола (примерно 74,4 и 70,4 тыс. руб.).

Как оказалось [7], для реализации периода амортизации от 5 до 25 лет необходимы цены на зеленый метанол в размере 717–1107 евро/т. Чистые производственные затраты — в размере 785 евро в 2022 г. на тонну были получены для базового сценария, что составляет 44 % надбавки к ценам на метанол в Германии в 2022 г. В работе [8] удельные инвестиции в основной капитал (FCI) колеблются между 1823 и 2048 евро/кВт при производстве метанола в расширенном режиме. В нашем случае они много больше, так как только менее 10 % CO<sub>2</sub> поступает в метанатор. В работе LCOF варьируются от 29,7 до 31,7 евро/ГДж (по низшей теплоте сгорания рабочей массы).

Если пересчитать наши значения стоимости метанола на тепло, то получим около 27 евро/ГДж. Таким образом, можно заключить, что выполненные технико-экономические оценки схемы получения метанола при использовании котла с ЦКС при кислородном сжигании укладываются в диапазон известных зарубежных значений.

## Выводы

1. Показано, что метанол является потенциально жизнеспособным топливом в контексте технологии Power-to-Fuels, когда избыточная возобновляемая электроэнергия может быть преобразована в водород с помощью электролиза воды, а затем подвергнута реакции с CO<sub>2</sub> с образованием метанола.

2. Рассмотрены технологии получения метанола. Наибольшее внимание уделено гибридным технологиям получения метанола с минимальным углеродным следом («зеленый» метанол). Показано, что использование биомассы в качестве топлива и различных схем его сжигания и газификации является наиболее перспективным.

3. Предложена новая схема на основе использования технологии циркулирующего кипящего слоя при сжигании и газификации биомассы. На основе установки тепловой мощностью по топливу около 80 МВт оценены тепловые и материальные балансы, возможная электрическая мощность, направляемая на электролизер, расходы водорода и метанола.

4. Оценены капитальные и эксплуатационные затраты, определена приведенная за жизненный цикл установки стоимость метанола. Выполненные технико-экономические оценки схемы получения метанола при использовании атмосферного котла с ЦКС при кислородном сжигании укладываются в диапазон известных зарубежных значений.

## Список литературы

1. Minchener, A. **Development and deployment of future fuels from coal**, Report of Clean Coal Centre IEA, 2019. WWW. IEA-COAL.ORG.
2. Bill, A. **Comparison of CO<sub>2</sub> hydrogenation in a catalytic reactor and in a dielectric-barrier discharge** / A. Bill, B. Eliasson, U. Kogelschatz, L.-M. Zhou // Stud. Surf. Sci. Catal, Elsevier. — 1998. — Pp. 541—544.
3. **Davy Methanol production — a key step in the return of chemicals from coal**. Available from: [www.davyprotech.com/pdfs/Chemicals%20from%20Coal.pdf](http://www.davyprotech.com/pdfs/Chemicals%20from%20Coal.pdf) (2013).

4. **Shaharun, M. S. Recent developments on heterogeneous catalytic CO<sub>2</sub> reduction to methanol** / M. S. Shaharun, M. A. Alotaibi, A. I. Alharthi // *J. CO<sub>2</sub> Util.* 34 (2019) 20 – 33, DOI: 10.1016/j.jcou.2019.05.036.
5. **Тимофеев, В. С. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза** / В. С. Тимофеев, Л. А. Серафимов. — М.: Высшая школа, 2003. — 534 с.
6. **Pratschner, S. Power-to-Green Methanol via CO<sub>2</sub> Hydrogenation — A Concept Study Including Oxyfuel Fluidized Bed Combustion of Biomass** / S. Pratschner, P. Skopec, J. Hrdlicka and F. Winter // *1Energies*. — 2021. — № 14. — Pp. 4638. DOI: 10.3390/en14154638.
7. **Pratschner, S. Techno-economic assessment of a power-to-green methanol plant** / S. Pratschner, F. Radosits, A. Ajanovic, F. Winter // *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 75 (2023) 102563. DOI: 10.1016/j.jcou.2023.102563.
8. **Poluzzi, A. Flexible Power and Biomass-To-Methanol Plants With Different Gasification Technologies** / A. Poluzzi, G. Guandalini, S. Guffanti, M. Martinelli, S. Moioli, P. Huttenhuis, G. Rexwinkel, J. Palonen, E. Martelli, G. Groppi and M. C. Romano // *Frontiers in Energy Research* | www.frontiersin.org January 2022 | Volume 9 | Article 795673 p. 1 – 23.
9. **Рябов, Г. А. Сжигание биомассы в кипящем слое с возможностью получения водорода при частичном удалении CO<sub>2</sub>** / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев // *Альтернативная энергетика и экология*. — 2023. — № 7 (412). — С. 82 – 94.
- actor and in a dielectric-barrier discharge, *Stud. Surf. Sci. Catal*, Elsevier, 1998, pp. 541 – 544.
3. **Davy Methanol production — a key step in the return of chemicals from coal**, [Electronic resource]. — URL: www.davyprotech.com/pdfs/Chemicals%20from%20Coal.pdf, 2013.
4. **Shaharun M. S., Alotaibi M. A., Alharthi A. I.** Recent developments on heterogeneous catalytic CO<sub>2</sub> reduction to methanol, *J. CO<sub>2</sub> Util*, No. 34, 2019, pp. 20 – 33, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.jcou.2019.05.036.
5. **Timofeev V. S., Serafimov L. A.** *Printsipy tekhnologii osnovnogo organicheskogo i neftekhimicheskogo sinteza* (Principles of technology of the main organic and petrochemical synthesis), Moscow, Vysshaya shkola, 2003, 534 p.
6. **Pratschner S., Skopec P., Hrdlicka J., Winter F.** Power-to-Green Methanol via CO<sub>2</sub> Hydrogenation — A Concept Study Including Oxyfuel Fluidized Bed Combustion of Biomass, *1Energies*, 2021, No. 14, pp. 4638, [Electronic resource]. — DOI: 10.3390/en14154638.
7. **Pratschner S., Radosits F., Ajanovic A., Winter F.** Techno-economic assessment of a power-to-green methanol plant, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, No. 75, 2023, p. 102563, [Electronic resource]. — DOI: 10.1016/j.jcou.2023.102563.
8. **Poluzzi A., Guandalini G., Guffanti S., Martinelli M., Moioli S., Huttenhuis P., Rexwinkel G., Palonen J., Martelli E., Groppi G., Romano M. C.** Flexible Power and Biomass-To-Methanol Plants With Different Gasification Technologies, *Frontiers in Energy Research*, January 2022, Vol. 9, Article 795673 pp. 1 – 23, [Electronic resource]. — URL: www.frontiersin.org.
9. **Ryabov G. A., Folomeev O. M.** *Al'ternativnaya energetika i ekologiya (International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology)*, 2023, No. 7 (412), pp. 82 – 94.

## References

1. **Minchener A.** Development and deployment of future fuels from coal, Report of Clean Coal Center IEA, 2019, [Electronic resource]. — URL: WWW.IEA-COAL.ORG.
2. **Bill A., Eliasson B., Kogelschatz U., Zhou L.-M.** Comparison of CO<sub>2</sub> hydrogenation in a catalytic re-

GARYabov@vti.ru

## Using circulating fluidized bed technology to methanol production

Ryabov G. A., Folomeev O. M.

Methanol has been shown to be a potentially viable fuel in the context of Power-to-Fuels technology, where excess renewable electricity can be converted to hydrogen through water electrolysis and then reacted with CO<sub>2</sub> to form methanol. Flue gases from power plants can provide a relatively concentrated flow of CO<sub>2</sub> for this reaction. Technologies for producing methanol with a minimal carbon footprint are considered. A new scheme is proposed based on the use of circulating fluidized bed technology for biomass combustion and gasification

**Keywords:** decarbonization, useful products from solid fuels, methanol production, CO<sub>2</sub> emissions, biomass, circulating fluidized bed.



EDN: UZQHW

Специальность 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

## Экспериментальное исследование микроклимата котлотурбинного цеха Ивановской ТЭЦ-2

**Бухмиров В. В., Бушуев Е. Н.**, доктора техн. наук,  
**Светушков И. И.**, аспирант,  
**Родионова М. В., Долинин Д. А.**, кандидаты техн. наук  
ФГБОУ ВО «ИГЭУ», Иваново

Представлены данные экспериментального исследования микроклимата, а также результаты измерения количества примесей в воздухе рабочей зоны котлотурбинного цеха Ивановской ТЭЦ-2. Сделан вывод о соответствии полученных параметров действующим санитарно-гигиеническим нормам. На основе анализа полученных данных разработаны рекомендации по повышению энергетической эффективности и улучшению условий труда персонала объекта.

**Ключевые слова:** энергосбережение, микроклимат, основное и вспомогательное оборудование ТЭЦ, результаты измерений, анализ экспериментальных данных, теплопотери, примеси.

Производство тепловой и электрической энергии — ключевой фактор жизнедеятельности современного человека. По статистике Министерства энергетики Российской Федерации, установленная мощность электростанций ЕЭС России на 01.01.2022 г. составила 246 590,9 МВт, из которых доля тепловых электрических станций (ТЭС) составляет 66,1 % [1]. Тепловые электростанции являются крупнейшими потребителями топлива в стране. В 2014 г. ими было использовано около 307 млн т у.т [2]. Задача повышения эффективности использования ТЭС при производстве электрической и тепловой энергии своевременна и актуальна, поскольку высокая степень взаимной зависимости российской экономики и энергетики дает возможность при повышении эффективности ТЭС наблюдать положительные тенденции в смежных секторах экономики.

Главным отличием ТЭС от других генерирующих объектов является наличие парового котла с высокими характеристиками пара, который вместе с турбогенератором расположен в главном корпусе (в котлотурбинном цехе). Для поддержания работоспособности основного цикла в главном корпусе расположено и вспомогательное оборудование: насосы, деаэраторы, подогреватели, сепараторы и т.д. Но высокая концентрация теплогенерирующего оборудования в одном здании оказывает прямое влияние на микроклимат помещений

(температуру, влажность, скорость воздуха, концентрацию различных частиц и веществ) и, как следствие, на состояние и самочувствие персонала станции, а также сказывается на энергетических затратах объекта на собственные нужды.

Таким образом, повышение эффективности использования энергетических ресурсов на ТЭС представляет собой комплексную задачу. С одной стороны, должны быть обеспечены требования технологического процесса генерации энергоресурсов, а с другой стороны — соблюдены санитарно-эпидемиологические нормы для персонала станции и созданы комфортные условия для осуществления трудовой деятельности.

Исходными данными для решения поставленной задачи являются: информация о фактических режимах работы основного и вспомогательного оборудования объекта; результаты измерения характеристик воздушной среды рабочей зоны помещений ТЭС; действующие нормы, определяющие допустимые параметры и характеристики микроклимата для рассматриваемого типа работ.

Параметры микроклимата производственных помещений приведены в [3] СанПиН 1.2.3685–21. В соответствии с вышеназванными нормами микроклимат на рабочих местах в производственных помещениях определяют: температура воздуха, температура поверхностей ограждающих конструкций (стены, пото-

лок, пол), устройств, а также технологического оборудования или ограждающих его устройств; относительная влажность воздуха; скорость движения воздуха; интенсивность теплового облучения. Так, для помещений, в которых выполняются работы, связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения (категория работ IIa), допустимыми параметрами микроклимата являются:

температура воздуха,  $T$  (°C): 17,0 – 23,0 (для холодного периода года), 18,0 – 27,0 (для теплого периода года);

температура поверхностей,  $T_{\text{п}}$  (°C): 16,0 – 24,0 (для холодного периода года), 17,0 – 28,0 (для теплого периода года);

относительная влажность воздуха,  $W$  (%): 15 – 75;

скорость движения воздуха,  $V$  (м/с): не более 0,1 (для диапазона температур ниже оптимальных значений), не более 0,3 (для диапазона температур воздуха выше оптимальных значений).

Немаловажным фактором, определяющим безопасность и комфортность воздуха рабочей зоны производственных помещений, является наличие примесей. Учитывая специфику производственного процесса, для анализа были выбраны следующие параметры: содержание в атмосфере углекислого газа  $\text{CO}_2$ ,  $\text{см}^3/\text{м}^3$  (ppm); массовая концентрация микрочастиц  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ; концентрация летучих органических соединений (ЛОС), характеризуемая параметром  $t\text{VOC}$ ,  $\text{мг}/\text{м}^3$ . В соответствии с ГОСТ 12.1.005–88 «Система безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [4] оптимальная концентрация  $\text{CO}_2$  составляет 800 – 1000 ppm. При содержании примеси 1000 – 1400 ppm у человека наблюдаются вялость, проблемы с внимательностью и неточной обработкой информации, дыханием и состоянием носоглотки (указанный диапазон является верхней границей допустимой нормы).

Содержание тонкодисперсной пыли является ключевым фактором при оценке качества воздуха и его безопасности в рабочей зоне производственных помещений. Данную характеристику описывает величина  $\text{PM}_{2.5}$ , выражающая концентрацию мелкодисперсных взвешенных частиц размером от 0,001 до

2,5 мкм, находящиеся в воздухе и легко проникающие сквозь биологические барьеры организма. По требованиям СанПиН [3] среднегодовая концентрация микрочастиц не должна превышать 0,025  $\text{мг}/\text{м}^3$ .

Величина  $t\text{VOC}$ ,  $\text{мг}/\text{м}^3$  характеризует наличие в воздухе рабочей зоны летучих органических соединений (продуктов сгорания органических топлив, газообразных выделений в технологических процессах и в быту, детергентов (поверхностно-активных веществ) и других органических газов. В главном корпусе ТЭС показатель  $t\text{VOC}$  может свидетельствовать об утечках водорода, используемого для охлаждения генератора турбоагрегата. В соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005–88 данный показатель не должен превышать 1  $\text{мг}/\text{м}^3$ . Превышение нормы по этому показателю может вызвать дисбаланс иммунитета организма, привести к нарушению функционирования центральной нервной системы и системы пищеварения, обусловить тяжелые повреждения легких, печени и кроветворной системы человека [4].

## Методы исследования

Объектом исследования микроклимата был выбран главный корпус (котлотурбинный цех) Ивановской ТЭЦ-2, в котором расположено основное оборудование: восемь паровых котлов и пять турбогенераторов.

Основными параметрами при оценке качества микроклимата в котлотурбинном цехе являлись температура  $T$ , °C и относительная влажность  $W$ , %. Данные параметры были измерены метеометром МЭС-200А. Абсолютная погрешность измерения температуры (в соответствии с паспортом метеометра) составила  $\pm 0,2$  °C, относительной влажности —  $\pm 3$  %. Учитывая особенности технологического процесса и характеристики основного и вспомогательного оборудования, контроль подвижности воздуха не выполнялся. Были измерены также параметры, определяющие наличие примесей в воздухе рабочей зоны: содержание в атмосфере  $\text{CO}_2$ ,  $\text{см}^3/\text{м}^3$  (ppm), массовая концентрация микрочастиц  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{мг}/\text{м}^3$  и концентрация летучих органических соединений (ЛОС), характеризуемая параметром  $t\text{VOC}$ ,  $\text{мг}/\text{м}^3$ . Указанные характеристики воздушной среды были измерены при помощи детектора

воздуха Qingping [5]. Погрешность измерения указанным прибором составляет:  $\pm 10$  мкг/м<sup>3</sup> для массовой концентрации микрочастиц PM2.5,  $\pm 20$  % для концентрации летучих органических соединений tVOC и  $\pm 15$  % для концентрации углекислого газа CO<sub>2</sub>.

Контроль тепловлажностных характеристик воздуха рабочей зоны объекта и наличия примесей осуществлялся в период с января 2020 г. по май 2024 г. Для измерения показателей микроклимата цеха были выбраны характерные точки в основных зонах обслуживания около теплогенерирующего оборудования. Так, для котельного отделения были выбраны точки на отметках 0,00 м, 8,00 м и 25,6 м. Общее количество точек измерений — 23. В турбинном отделении были выбраны точки на отметках 0,00 м, 8,00 м и 16,00 м. Общее число точек измерений — 16.

### Результаты измерений

Результаты измерения температуры и относительной влажности воздуха в пределах котлоагрегата № 3 показаны на рис. 1 и рис. 2. Штриховые линии соответствуют изменениям параметров в холодный период, сплошные линии — в тёплый.

Вне зависимости от температуры наружного воздуха во время работы котла температура превышает допустимые значения. Также стоит отметить четкую тенденцию — увеличение температуры по высоте котла. Данный факт можно объяснить тепловыми потерями от наружной обшивки котлоагрегата. Практически постоянная температура по высоте котла была зафиксирована 27 мая 2023 г., что объясняется полным остановом станции для ремонта. Относительная влажность воздуха в котельном отделении при работе в штатном режиме находится в интервале 18–55 %, что соответствует допустимым параметрам (рис. 2).

Увеличение влажности до 86,4 % 06.01.2024 г. на отметке 0,00 м связано с утечкой пара вблизи точки измерения. В момент останова станции 27.05.2024 г. относительная влажность воздуха в цехе незначительно отличалась от параметров наружного воздуха. Дополнительные характеристики качества воздушной среды котлотурбинного цеха (CO<sub>2</sub>, PM2.5, tVOC) не превышали допустимые нормы.

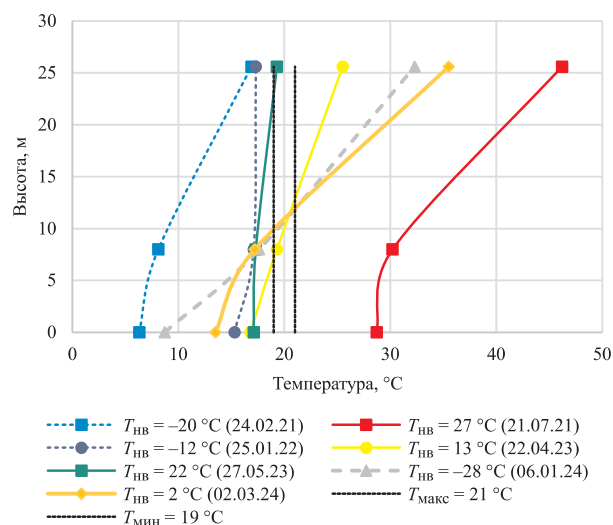


Рис. 1. Температура воздуха в пределах котлоагрегата № 3:

$T_{Н.В}$  — температура наружного воздуха

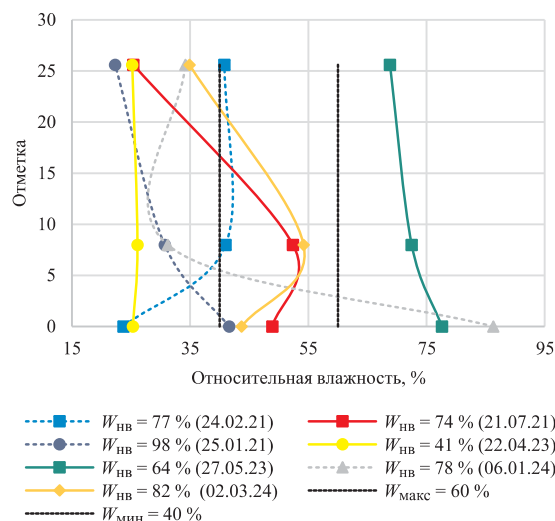
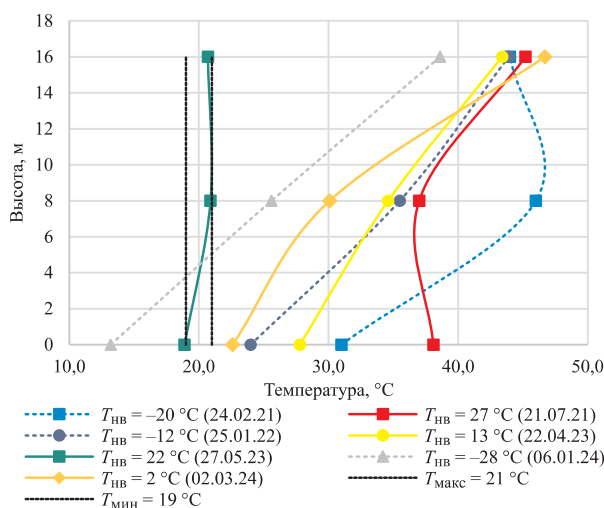


Рис. 2. Относительная влажность воздуха в пределах котлоагрегата № 3:

$W_{НВ}$  — относительная влажность наружного воздуха

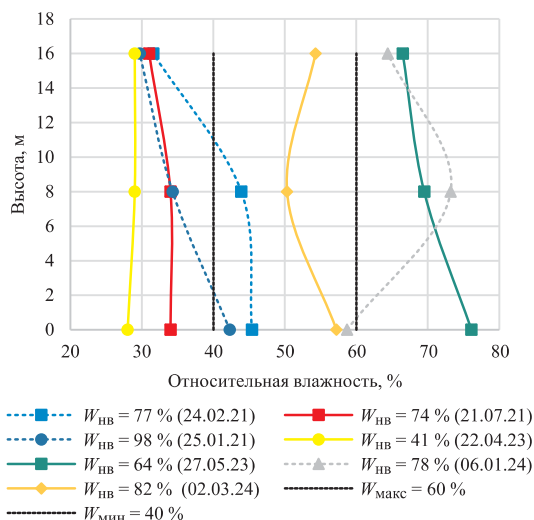
Основные характеристики микроклимата турбинного отделения показаны на рис. 3 и рис. 4.

Температура турбинного отделения изменялась в диапазоне 14 – 45 °C. Наблюдаемое 06.01.2024 г. на отметке 0,00 м снижение температуры связано с высокими присосами холодного воздуха через дверной проём. Стоит отметить, что, несмотря на достаточно низкую температуру наружного воздуха, температура воздуха на отметке 16,00 м превышает 35 °C. Это связано с высокой концентрацией тепловыделяющего оборудования (деаэраторы



**Рис. 3. Температура воздуха в пределах турбоагрегата № 3:**

$T_{\text{нв}}$  — температура наружного воздуха



**Рис. 4. Относительная влажность в пределах турбоагрегата № 3:**

$W_{\text{нв}}$  — относительная влажность наружного воздуха

и греющие трубопроводы) и недостаточной аэрацией отметки.

Относительная влажность воздуха в турбинном отделении не имеет четкой тенденции. Основными факторами изменения влажности являются параметры наружного воздуха, а также режим работы оборудования станции.

Особо следует отметить вспомогательный параметр tVOC. За период январь — апрель 2024 г. данный показатель варьировался от 6,287 до 8,721 мг/м<sup>3</sup>, что превышает допустимую норму в 1 мг/м<sup>3</sup> [4]. Связано это с утечками водорода через уплотнения генератора, а также с испарением масла смазки подшипни-

ков турбогенераторов во время работы. Остальные показатели не превышали допустимые нормы.

## Выводы

1. Анализ экспериментальных данных выявил ряд отклонений показателей микроклимата от установленных норм.

2. Оценка результатов измерения параметров и характеристик воздушной среды объекта позволила определить основные пути энергосбережения, а также направления повышения комфортности микроклимата в целях обеспечения комфортных условий труда персонала. Среди наиболее действенных мероприятий для решения поставленных задач можно рассматривать снижение тепловых потерь основного и вспомогательного оборудования станции, а также снижение объема присосов наружного воздуха в холодный период года.

## Список литературы

1. Приказ Министерства энергетики РФ от 28.11.2023 № 108 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2023 – 2038 годы» [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.soups.ru/future-planning/sipr-ees/> (дата обращения 09.06.2024).
2. Прогноз научно-технического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года. — М., 2016. — 111 с.
3. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания. — М., 2021. — 452 с.
4. ГОСТ 12.1.005–88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарные требования к воздуху рабочей зоны. — М., 1988. — 78 с.
5. Qingping: официальный сайт. — URL: <https://www.qingping.com> (дата обращения: 17.09.2023)
6. Бухмиров, В. В. Экспериментальное исследование микроклимата на ТЭЦ / В. В. Бухмиров, И. И. Светушков, Е. Н. Бушуев, Е. Н. Темлянцева, М. В. Родионова // Вестник ИГЭУ. — 2023. — № 6. — С. 13 – 22.

## References

1. Prikaz Ministerstva energetiki RF ot 28.11.2023 No. 108 «Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya elektroenergeticheskikh sistem Rossii na 2023 – 2038 gody» (Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated November 28, 2023 No. 108 «On approval of the scheme and program



- for the development of electric power systems of Russia for 2023 – 2038»), [Electronic resource]. — URL: <https://www.so-ups.ru/future-planning/sipr-ees/> (accessed: 09.06.2024).
2. **Prognoz nauchno-tekhnicheskogo razvitiya ot-raslei toplivno-energeticheskogo kompleksa Rossii na period do 2035 goda** (Forecast of scientific and technical development of the fuel and energy complex of Russia for the period up to 2035), Moscow, 2016, 111 p.
  3. **SanPiN 1.2.3685–21. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bez-vednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya** (SanPiN 1.2.3685 – 21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans), Moscow, 2021, 452 p.
  4. **GOST 12.1.005–88. Mezhgosudarstvennyi standart. Sistema standartov bezopasnosti truda. Obshchie sanitarnye trebovaniya k vozdukhу rabochei zony** (State Standard 12.1.005 – 88. Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air), Moscow, 1988, 78 p.
  5. **Qingping, ofitsial'nyi sait** (Qingping: official website), [Electronic resource]. — URL: <https://www.qingping.com> (accessed: 17.09.2023).
  6. **Bukhmirov V. V., Svetushkov I. I., Bushuev E. N., Temlyantseva E. N., Rodionova M. V. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta** (Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University), 2023, No. 6, pp. 13 – 22.

BA06095@mail.ru

## Experimental study of the microclimate of the boiler-turbine shop of Ivanovskaya CHPP-2

Bukhmirov V. V., Bushuev E. N., Svetushkov I. I., Rodionova M. V., Dolinin D. A.

The data of an experiment to study the microclimate and the results of measuring the amount of impurities in the air of the working area of the boiler-turbine shop of the Ivanovo CHPP-2 are described. A conclusion was made about the compliance of the obtained parameters with current sanitary and hygienic standards. Based on the analysis of the data obtained, recommendations were developed to increase energy efficiency and improve the working conditions of facility personnel

**Keywords:** energy saving; microclimate; main and auxiliary equipment of thermal power plants; measurement results; analysis of experimental data; heat loss; impurities.

EDN: XDVYEV

Специальность 2.4.4. Электротехнология и электрофизика

## Моделирование нагрева высокоэнергетических радиопоглощающих композитов в СВЧ-камерах различного типа\*

**Сивак А. С.**, канд. техн. наук, **Калганова С. Г.**, доктор техн. наук,  
**Тригорлый С. В.**, канд. техн. наук, **Кадыкова Ю. А.**, доктор техн. наук  
АО «Научно-производственное предприятие «Контакт», Саратов

**Сахаджи Г. В.**, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

Работа посвящена моделированию нагрева высокоэнергетических радиопоглощающих композитов (ВРК) в СВЧ-камерах различного типа с целью определения конструкции, обеспечивающей наибольшую напряженность электрического поля электромагнитной волны в рабочем пространстве для эффективного процесса диссипации СВЧ-энергии при нагреве ВРК. Инструмент для исследования — математическая модель, состоящая из системы взаимосвязанных уравнений электродинамики и теплопереноса. Приведены результаты численного математического моделирования в виде распределения температурного поля в объеме высокоэнергетических радиопоглощающих композитов для реализации их функциональных свойств, связанных с интенсивным выделением тепловой энергии в результате СВЧ-диссипации в камерах резонаторного типа, с бегущей волной на квази coaxиальном волноводе.

**Ключевые слова:** численное моделирование, СВЧ электромагнитное поле, нагрев, высокоэнергетический радиопоглощающий композит, диссипация СВЧ-энергии.

Серьезная комплексная задача — создание современных типов высокоэнергетических радиопоглощающих композитов (ВРК) и разработка технологии физического воздействия на материал для его функциональной активности, связанной с высвобождением энергии [1]. Исследования по применению электрофизических методов обработки материалов и изделий показали эффективность использования для этой цели энергии сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний. СВЧ-воздействие на высокоэнергетические материалы по сравнению с другими электрофизическими методами обработки показывает высокую эффективность за счет объемной, равномерной обработки объекта при избирательной диссипации СВЧ-энергии, что обеспечивается различными диэлектрическими свойствами материалов матрицы и наполнителя в композите [2]. Математическое описание процессов СВЧ-нагрева ВРК, как правило, представляет собой самосогласованную (связанную) задачу

электродинамики и теплопереноса, решаемую с применением численных методов моделирования, наиболее распространенными из которых являются метод конечных разностей и метод конечных элементов. В настоящее время имеется современное программное обеспечение, реализующее данные методы математического моделирования [3, 4]. Вместе с тем отсутствуют методики математического моделирования взаимосвязанных процессов СВЧ-нагрева ВРК с учетом их функциональной активности, связанной с высвобождением энергии, в двух- и трехмерной постановке применительно к СВЧ-установкам с различными камерами, основанные на использовании современных численных методов решения задач математической физики. Таким образом, для создания высокоэффективных СВЧ электро-технологических установок, позволяющих выполнять СВЧ-нагрев ВРК в соответствии с заданными технологическими требованиями, необходима разработка адекватных математических моделей, учитывающих возможность равномерного нагрева композита за счет наличия устойчивых максимумов и минимумов

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00796, <https://rscf.ru/project/24-29-00796/>.

электрического поля внутри рабочей СВЧ-камеры с объектом.

Цель работы — разработка математических моделей взаимосвязанных процессов электродинамики и теплопереноса в СВЧ электротехнологических установках на базе рабочих камер различного типа (периодического и методического действия) при нагреве ВРК с учетом изменения их функциональных свойств.

### Методология исследования

Для решения поставленной задачи, которая включает в себя моделирование распределения температурного поля в ВРК при их нагреве в СВЧ-установках на базе рабочих камер различного типа, рассмотрены возможные конструкции СВЧ нагревательных установок. В работах Ю. С. Архангельского [5, 6] детально описаны различные виды СВЧ-установок для нагрева диэлектриков. Основным типом СВЧ-генератора, используемым в нагревательных конструкциях, является магнетрон. Линия передачи, соединяющая СВЧ-генератор с рабочей камерой, представляет собой прямоугольный волновод. Поперечное сечение этого волновода определяется выводом энергии СВЧ-генератора, а его длина и форма зависят от взаимного расположения СВЧ-генератора и рабочей камеры. В электротехнологии наибольший интерес представляет рабочая камера, так как именно в ней осуществляется технологический процесс СВЧ-нагрева. В качестве определяющих признаков при выборе рабочих камер используются их габариты, характер электромагнитного поля в камере, тип излучающей системы.

Инструментом для исследования распределения СВЧ электромагнитного поля в ВРК, находящегося в рабочей камере СВЧ-установки, является математическая модель, состоящая из системы взаимосвязанных уравнений электродинамики и теплопереноса. Для их реше-

ния использовался метод конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics [7 – 9].

Объектами исследования являлись рабочие камеры СВЧ-установок разных типов с расположенными в них образцами ВРК с различными поглощающими наполнителями. Предмет исследования — распределение температурных полей в объеме ВРК для обеспечения заданных функциональных их свойств.

Задачей математического моделирования является определение оптимальных параметров рабочих СВЧ-камер для реализации функциональных свойств ВРК, связанных с интенсивным выделением тепловой энергии в результате СВЧ-диссипации при нагреве наполнителя не ниже 500 °С, высокой скоростью нагрева (более 10 °С/с) и разностью температур в объеме поглощающего наполнителя не выше 100 °С.

На основе анализа литературы для моделирования выбраны камера со стоячей волной (резонаторного типа) и камера с бегущей волной на квазикоаксиальном волноводе [6, 10]. Камеры волноводно-щелевого типа представляют научно-практический интерес для нагрева объектов больших площадей и объемов, но ввиду многообразия их конструкций разработка оптимальной СВЧ-камеры для ВРК является самостоятельной исследовательской задачей, поэтому в данной работе не решалась.

При этом рассматриваются ВРК с заданными размерами, физическими свойствами и различными формами поглощающих СВЧ-энергию наполнителей, находящихся в объеме полимерной матрицы (рис. 1).

Свойства этих наполнителей и их расположение в матрицах в качестве исходных данных для моделирования были определены ранее [11]. В качестве исходных данных для моделирования приняты следующие размеры образцов ВРК: минимальный размер (диаметр,

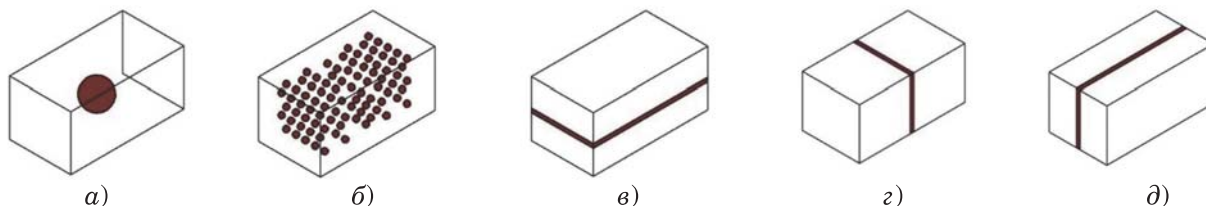


Рис. 1. Конструкции ВРК на основе полимерной матрицы с наполнителем различной формы:

*a* — в виде одной крупной сферы; *b* — в виде множества сфер; *в*, *г*, *д* — в виде плоского слоя, расположенного по-разному по отношению к вектору напряженности  $E$  электрического поля электромагнитной волны

высота) —  $\text{Ø}40 \times 40$  мм, толщина поглотителей  $h = 3$  мм, а также тангенс угла диэлектрических потерь для материала матрицы  $\text{tg}\delta = 0,01$  (эпоксидная смола ЭД-20) и поглощающего наполнителя  $\text{tg}\delta = 1,1$  (карбид кремния). СВЧ-мощность варьировалась в пределах от 300 до 1200 Вт при частоте 2450 МГц и времени обработки 60 с.

### Результаты исследования

Конструкция резонаторных камер должна обеспечивать равномерный нагрев объекта в любой части внутреннего объема, занятого нагреваемым объектом. На основании полученных результатов установлено, что максимальная температура нагрева ВРК зависит от его расположения в объеме резонаторной СВЧ-камеры. Наиболее эффективной конструкцией композита, обеспечивающей необходимые параметры диссипации СВЧ-энергии, является ВРК с одной сферой наполнителя (рис. 1, а). Установлено, что ВРК с данным наполнителем нагревается выше  $500^\circ\text{C}$  при низком уровне мощности (600 Вт), обеспечивая высокую скорость нагрева —  $14,8^\circ\text{C}/\text{с}$  (рис. 2, а). При этом максимальный градиент температуры в объеме сферы-наполнителя  $\Delta T = 34^\circ\text{C}$  при уровне СВЧ-мощности (600 Вт) и  $\Delta T = 69^\circ\text{C}$  при 1200 Вт (рис. 2, б). Разница температур между максимальной в объеме сферы-наполнителя и в характеристической точке не превышает  $14^\circ\text{C}$ . Это свидетельствует, что температура в объеме ВРК сосредоточена в центральной области сферы-наполнителя.

Результаты моделирования ВРК с наполнителем в виде множества сфер диаметром  $d = 5$  мм в виде тонкого слоя показали нецелесообразность использования для их нагрева камеры резонаторного типа, так как они не обеспечивают эффективность процесса диссипации СВЧ-энергии ввиду низкой скорости нагрева для первых и большой разницы температур в объеме наполнителя для вторых.

Конструкция камеры с бегущей волной на квазикоаксиальном волноводе показана на рис. 3. Обрабатываемый объект является продолжением внутреннего проводника согласующего перехода коаксиального волновода и располагается вдоль оси волновода. Для согласования такой камеры с прямоугольным волноводом используется волноводно-коаксиальный переход. Неравномерность нагрева в таких камерах составляет  $\pm 3\%$ , что значительно меньше неравномерности, получаемой в СВЧ-камерах со стоячей волной. Камеры с бегущей волной на квазикоаксиальном волноводе подходят для нагрева образцов цилиндрической формы. В связи с этим рассматриваются конструкции ВРК с расположением поглощающего наполнителя в поперечном и продольном сечениях образцов цилиндрической формы.

Для предложенной геометрии СВЧ-камеры сначала определяется напряженность электрического поля в СВЧ-камере без образца [12]. Изменяя геометрию экрана, квазикоаксиального перехода и его расположения относительно короткозамкнутой части волновода, необходимо добиться оптимального распределения

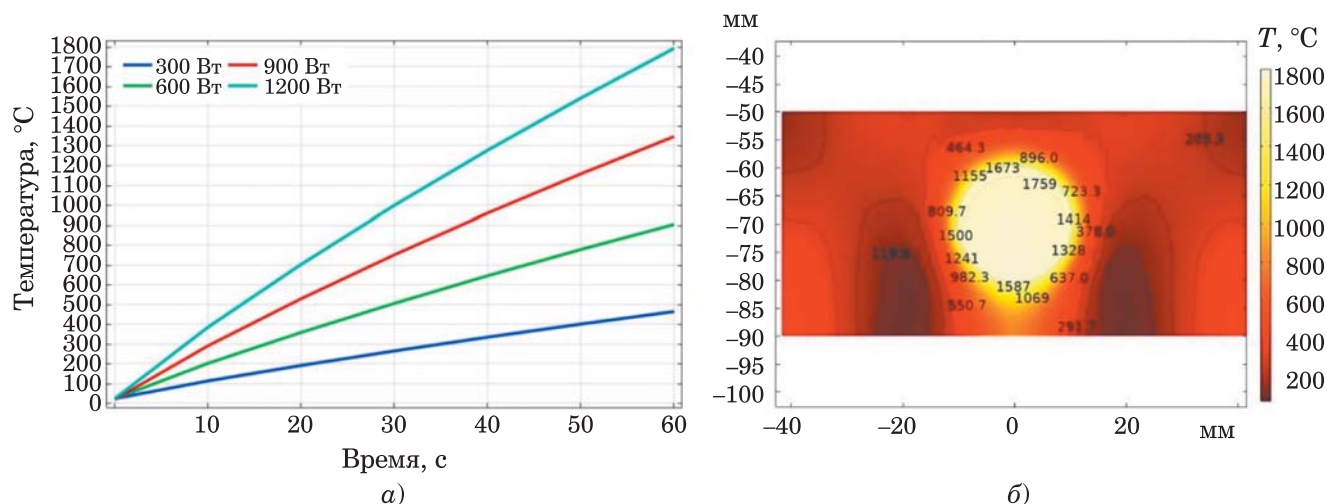
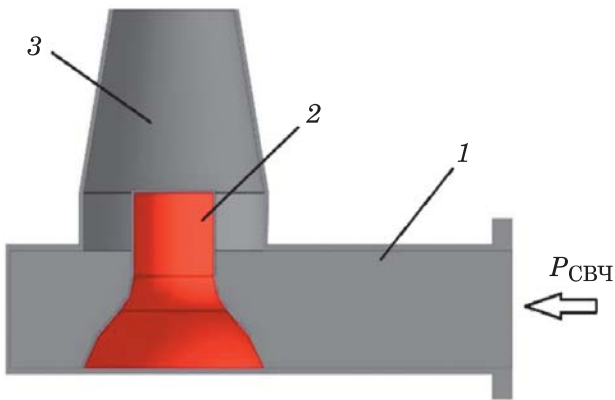


Рис. 2. ВРК со сферой-наполнителем диаметром  $d = 20$  мм:

а — изменение температуры при различных уровнях СВЧ-мощности; б — температурное поле в средней плоскости композита, уз в момент времени 60 с при мощности 1200 Вт





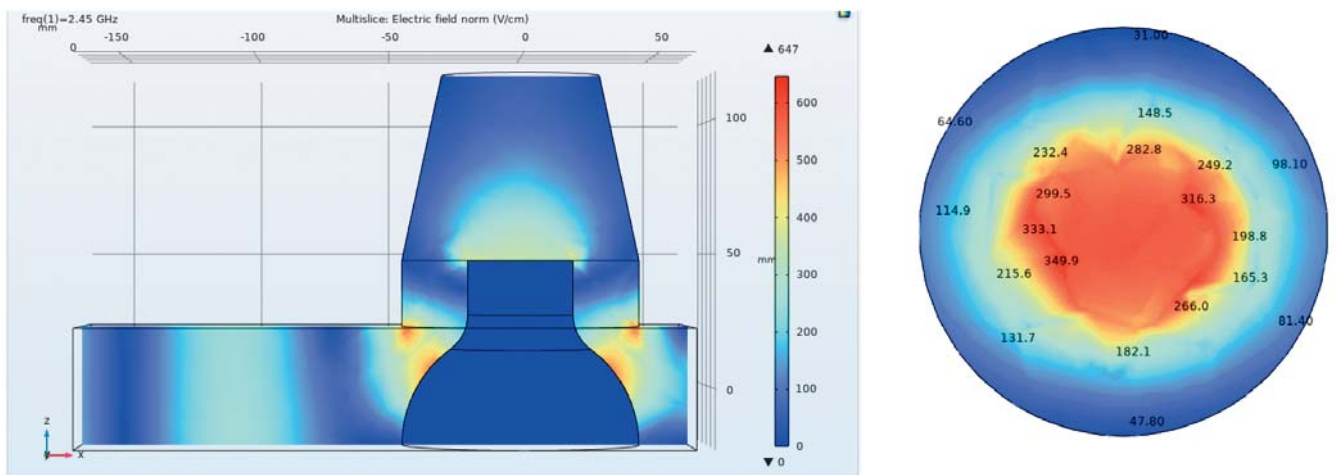
**Рис. 3. Конструкция СВЧ-камеры с бегущей волной на квази coaxиальном волноводе:**

1 — прямоугольный волновод; 2 — волноводно-коаксиальный переход (согласующий переход); 3 — рабочая СВЧ-камера (внешний экран)

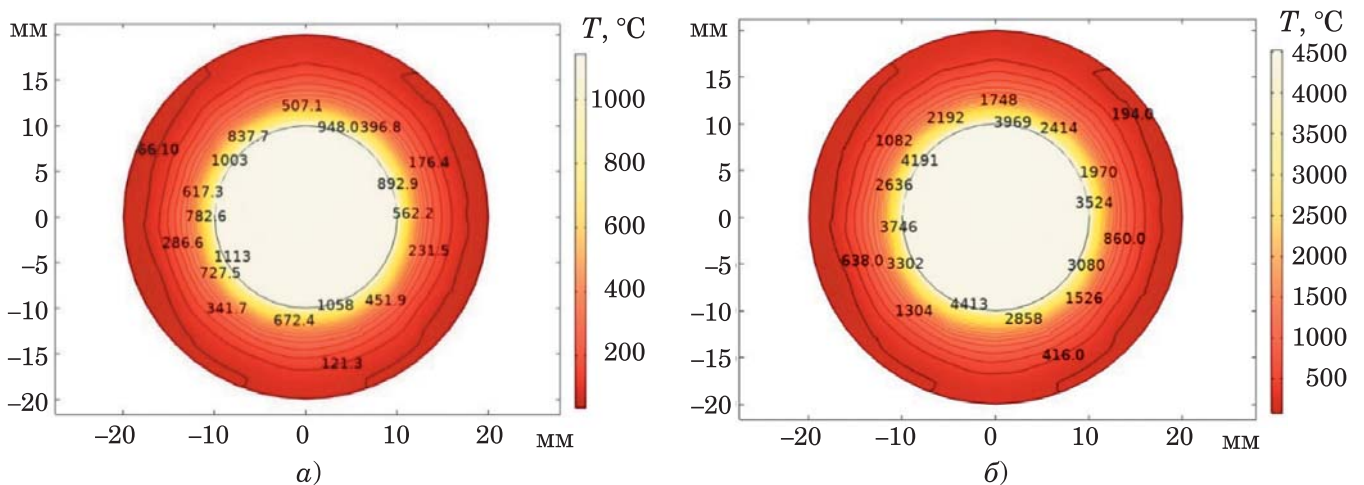
напряженности электрического поля в СВЧ-камере: наибольшей напряженности электрического поля  $E$  в рабочей камере и максимальной симметрии поля в ее коаксиальной части (рис. 4).

Для полученной геометрии СВЧ-камеры и расположения образца ВРК с заданными физическими свойствами выполняется численное моделирование процессов электродинамики и теплопроводности, определяются напряженность электрического поля и распределение температуры в образце ВРК при заданной мощности. Варьируя мощность и время нагрева, определяем требуемое распределение температуры в ВРК и скорости нагрева.

Установлено, что образец ВРК, в матрице которого расположен сферический наполни-

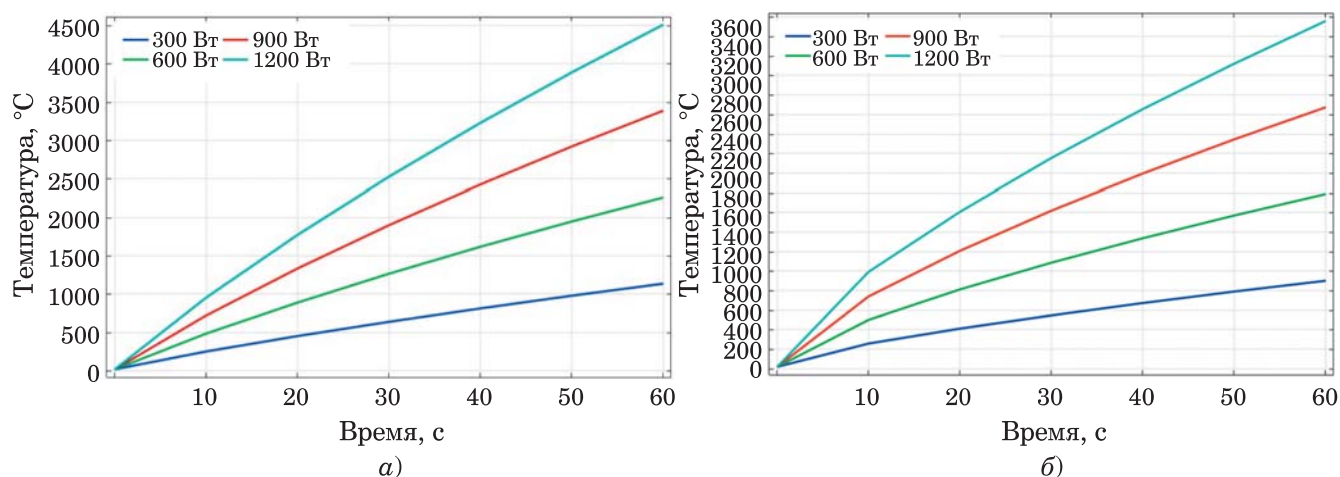


**Рис. 4. Распределение напряженности  $E$  электрического поля в СВЧ-камере на квази coaxиальном волноводе**



**Рис. 5. Распределение температурного поля в ВРК со сферическим наполнителем в средней плоскости композита в момент времени 60 с при СВЧ-мощности:**

$a$  — 300 Вт;  $b$  — 1200 Вт



**Рис. 6.** Изменение температуры во времени при различных уровнях СВЧ-мощности в центральной точке ВРК со сферическим наполнителем (а) и с тонким слоем наполнителя (б)

### Зависимость температуры наполнителя от мощности излучения в СВЧ-камере квазиоаксиального типа

Форма наполнителя	Мощность СВЧ-излучения, Вт							
	300		600		900		1200	
	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	Скорость нагрева $\nu, ^\circ\text{C}/\text{c}$	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	Скорость нагрева $\nu, ^\circ\text{C}/\text{c}$	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	Скорость нагрева $\nu, ^\circ\text{C}/\text{c}$	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	Скорость нагрева $\nu, ^\circ\text{C}/\text{c}$
Сфера $d = 20$ мм	1113	18,2	2250	37,1	3380	55,9	4510	74,8
Слой в вертикальной плоскости рабочей камеры	630	10,2	1243	20,3	1858	30,6	2486	41,0
Слой в горизонтальной плоскости рабочей камеры	900	14,6	1789	29,4	2670	44,1	3560	58,9

тель  $d = 20$  мм, нагревается интенсивно до максимальной температуры в наполнителе 1141 °С, 2270 °С, 3400 °С и 4527 °С при уровнях мощности 300 Вт, 600 Вт, 900 Вт и 1200 Вт соответственно (рис. 5). Температура в характеристической точке наполнителя составила 1121 °С, 2250 °С, 3380 °С и 4507 °С при тех же уровнях мощности (рис. 6). Максимальная разница  $\Delta T$  между температурой в наполнителе и характеристической точкой не превышает 20 °С при всех значениях СВЧ-мощности, что свидетельствует о равномерности температурного поля в объеме наполнителя.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что предложенная конструкция СВЧ-камеры квазиоаксиального типа обеспечивает эффективный процесс диссипации СВЧ-излучения при обработке ВРК

цилиндрической формы. ВРК с наполнителем в форме тонкого слоя и сферы показали высокую скорость нагрева 10,2 – 18,2 °С /с при минимальном уровне мощности в 300 Вт (см. таблицу).

Для ВРК с наполнителем в форме множества сфер не удалось добиться равномерного распределения температурного поля и требуемой высокой скорости нагрева.

### Выводы

1. На основе анализа литературы для расчетного моделирования с целью определения оптимальных конструкций рабочих СВЧ-камер для реализации функциональных свойств ВРК, связанных с интенсивным выделением тепловой энергии в результате СВЧ-диссипа-

ции, выбраны камера резонаторного типа, волноводно-щелевая с бегущей волной и камера с бегущей волной на квазикоаксиальном волноводе.

2. Суть разработки оптимальной конструкции СВЧ-камеры заключается в том, что в соответствии с размерами образца для частоты 2450 МГц при полученной геометрии рабочей камеры и расположении композита с заданными физическими свойствами выполняется численное моделирование процессов электродинамики и теплопроводности, определяются напряженность электрического поля и распределение температуры в образце ВРК при заданной мощности.

3. Результаты численного моделирования показали, что ВРК с множеством сфер наполнителя диаметром  $d = 5$  мм, а также с наполнителем в виде тонкого слоя нецелесообразно использовать в камерах резонаторного типа. Наиболее эффективной конструкцией композита, обеспечивающей необходимые параметры диссипации СВЧ-энергии, является ВРК с одной сферой наполнителя. Композит нагревается выше  $500$  °С при мощности 600 Вт с высокой скоростью нагрева ( $14,8$  °С/с) и максимальным градиентом температуры в объеме сферы-наполнителя ( $\Delta T = 34$  °С).

4. Установлено, что эффективный процесс диссипации энергии обеспечивает конструкция СВЧ-камеры квазикоаксиального типа для ВРК цилиндрической формы с наполнителем в форме тонкого слоя или одной сферы при минимальном уровне СВЧ-мощности 300 Вт и высокой скорости нагрева ( $10,2 - 18,2$  °С/с).

5. Результаты численного математического моделирования позволили спрогнозировать нагрев ВРК на основе матрицы из ЭД-20 с поглощающим энергию наполнителем из карбида кремния в СВЧ-камере квазикоаксиального типа. Результаты натурного эксперимента и численного моделирования нагрева ВРК в СВЧ электромагнитном поле показали сходимость с погрешностью  $8 - 15$  %.

Таким образом, в результате математического моделирования предложена конструкция СВЧ-камеры для обеспечения наибольшей напряженности электрического поля  $E$  в рабочей камере и максимальной симметрии поля в ее коаксиальной части для эффективного процесса диссипации СВЧ-энергии при нагреве ВРК.

## Список литературы

1. Вызулин, С. А. Радиопоглощающие материалы для обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем военного назначения / С. А. Вызулин // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информационная безопасность»: Сб. статей III Всерос. научно-технической конференции, Анапа, 21 – 22 апреля 2021 года. — Анапа: ФГАУ «ВИТ «ЭРА», 2021. — С. 295 – 310.
2. Сивак, А. С. Влияние СВЧ электромагнитного поля на распределение температуры в композиционных материалах / А. С. Сивак, Г. В. Сахаджи, С. Г. Калганова, Ю. А. Кадыкова, С. В. Тригорлый // Электричество. — 2023. — № 11. — С. 27 – 33.
3. Kovetz, A. *The Principles of Electromagnetic Theory* / A. Kovetz. — Cambridge University Press, 1990. — 221 p.
4. Сиркели, А. И. Обзор САПР моделирования СВЧ-устройств / А. И. Сиркели, В. Е. Драч // Интерактивная наука. — 2017. — № 1(11). — С. 139 – 141. — DOI: 10.21661/r-116149.
5. Архангельский, Ю. С. СВЧ электротермия / Ю. С. Архангельский. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. — 408 с.
6. Архангельский, Ю. С. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю. С. Архангельский, И. И. Девяткин. — Саратов: СГУ, 1983. — 140 с.
7. Захаров, В. В. Математическое моделирование взаимосвязанных процессов электродинамики и теплопереноса в СВЧ установках с камерами бегущей волны и лучевого типа при термообработке диэлектриков с учетом изменения их физических свойств : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.10 / Захаров Вадим Валерьевич. — Саратов, 2020. — 150 с.
8. Arballo, J. R. Numerical Simulation of the Heat, Mass and Momentum Transfer during the Microwave Drying of Osmodehydrated Porous Material / J. R. Arballo, L. A. Campacone, R. H. Mascheroni // Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Curitiba. — Curitiba, 2014. — URL: [https://www.comsol.com/paper/download/200371/arbalo\\_abstract.pdf](https://www.comsol.com/paper/download/200371/arbalo_abstract.pdf) (дата обращения 20.09.2023).
9. Chen, J. Simulation of Microwave Heating of Porous Media Coupled With Heat, Mass and Momentum Transfer / J. Chen, K. Pitchai, S. Birla, J. Subbiah, D. Jones // Excerpt from the proceeding of the 2012 th COMSOL Conference in Boston. — Boston, 2012. — URL: [http://microwave.unl.edu/custom/Paper\\_COMSOL\\_2012.pdf](http://microwave.unl.edu/custom/Paper_COMSOL_2012.pdf), (дата обращения 20.09.2023).
10. Сивак, А. С. Исследование диэлектрических свойств композиционных материалов / А. С. Сивак, С. Г. Калганова, Ю. А. Кадыкова, Т. П. Чермашенцева // Вопросы электротехнологии. — 2021. — № 4(33). — С. 23 – 28.
11. Передерин, Ю. В. Прогнозирование свойств высокоэнергетических композитов с ис-



пользованием информационных технологий: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Бийск, 2013, 19 с.

12. **Комаров, В. В.** *Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с диссипативными средами в СВЧ-нагревательных системах* / В. В. Комаров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2010. — Т. 13, № 4. — С. 57 – 63.

## References

1. **Vyzulin S. A.** *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoi nauki po napravleniyu «Informatsionnaya bezopasnost'»: Sb. statei III Vseros. nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Anapa, 21 – 22 aprelya 2021 goda* (State and prospects for the development of modern science in the direction of «Information Security»: Collection of articles of the III All-Russian scientific and technical conference, Anapa, April 21 – 22, 2021), Anapa, FGOU «VIT «ERA», 2021, pp. 295 – 310.
2. **Sivak A. S., Sakhadzi G. V., Kalganova S. G., Kadykova Yu. A., Trigorly S. V.** *Elektrichestvo* (Electricity), 2023, No. 11, pp. 27 – 33.
3. **Kovetz A.** *The Principles of Electromagnetic Theory*, Cambridge University Press, 1990, 221 p.
4. **Sirkeli A. I., Drach V. E.** *Interaktivnaya nauka* (Interactive science), 2017, No. 1(11), pp. 139 – 141, DOI: 10.21661/r-116149.
5. **Arkhangelsky Yu. S.** *SVCh elektrotermiya* (Microwave electrothermy), Saratov, Saratov state technical university, 1998, 408 p.
6. **Arkhangelsky Yu. S., Devyatkin I. I.** *Sverkhvysokochastotnye nagrevatel'nye ustanovki dlya intensivifikatsii tekhnologicheskikh protsessov* (Microwave heating units for intensification of technological processes), Saratov, Saratov state university, 1983, 140 p.
7. **Zakharov V. V.** *Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvyazannykh protsessov elektrodinamiki i teplo-*
8. **Arballo J. R., Campanone L. A., Mascheroni R. H.** Numerical Simulation of the Heat, Mass and Momentum Transfer during the Microwave Drying of Osmodehydrated Porous Material, Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Curitiba, Curitiba, 2014, [Electronic resource]. — URL: [https://www.comsol.com/paper/download/200371/arballo\\_abstract.pdf](https://www.comsol.com/paper/download/200371/arballo_abstract.pdf) (accessed: 20.09.2023).
9. **Chen J., Pitchai K., Birla S., Subbiah J., Jones D.** Simulation of Microwave Heating of Porous Media Coupled With Heat, Mass and Momentum Transfer, Excerpt from the proceeding of the 2012 th COMSOL Conference in Boston, Boston, 2012, [Electronic resource]. — URL: [http://microwave.unl.edu/custom/Paper\\_COMSOL\\_2012.pdf](http://microwave.unl.edu/custom/Paper_COMSOL_2012.pdf) (accessed: 20.09.2023).
10. **Sivak A. S., Kalganova S. G., Kadykova Yu. A., Chermashentseva T. P.** *Voprosy elektrotekhnologii* (Issues of Electrotechnology), 2021, No. 4 (33), pp. 23 – 28.
11. **Perederin Yu. V.** *Prognozirovanie svoistv vysokonergeticheskikh kompozitov s ispol'zovaniem informatsionnykh tekhnologii* (Prediction of properties of high-energy composites using information technologies), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Biysk, 2013, 19 p.
12. **Komarov V. V.** *Fizika volnovykh protsessov i radio-tekhnicheskie sistemy* (Physics of Wave Processes and Radio Systems), 2010, Vol. 13, No. 4, pp. 57 – 63.

nayka@kontakt-saratov.ru

## Modeling of heating of high-energy radio-absorbing composites in microwave chambers of different types

Sivak A. S., Kalganova S. G., Trigorly S. V., Kadykova Y. A., Sakhadzi G. V.

The work is devoted to modeling the heating of high-energy radio-absorbing composites (HARCs) in microwave chambers of various types in order to determine the design that provides the highest electric field strength of the electromagnetic wave in the working space for the effective process of microwave energy dissipation during the heating of HARCs. The research tool is a mathematical model consisting of a system of coupled electrodynamics and heat transfer equations. The results of numerical mathematical modeling in the form of temperature field distribution in the volume of high-energy radio-absorbing composites to realize their functional properties associated with intensive heat energy release as a result of microwave dissipation in resonator-type chambers with a traveling wave on a quasi-coaxial waveguide are presented.

**Keywords:** numerical modeling; microwave electromagnetic field; heating, high-energy radio-absorbing composite; microwave energy dissipation.





## ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

EDN: GIWOLE

Специальность 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность

### Положения и принципы концепции индустриального вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС

**Сафронова Н. Н.**

Ассоциация строительного комплекса атомной отрасли, Москва

Рассмотрена проблема организации унифицированного процесса массового вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС на индустриальной основе. Сформулированы принципы и основные положения концепции демонтажа конструкций энергоблоков АЭС в векторе выполнения практических работ по выводу из эксплуатации АЭС с соблюдением нормативно-правовых условий безопасности, эффективности и экологической приемлемости объектов использования атомной энергии.

**Ключевые слова:** атомная станция, безопасность, вывод из эксплуатации, концепция, принципы, индустриальные методы демонтажа.

#### Проблема вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС для текущего периода

Демонтаж оборудования и разрушение конструкций энергоблоков АЭС после исчерпания ими запаса ресурса безопасности представляет собой особый этап в жизненном цикле ядерных энергетических установок [1, 2]. Предельный ресурс эксплуатации энергоблоков АЭС ограничивается деградацией служебных и механических свойств его ответственных конструкций за счет роста поврежденности конструкционного материала, деформационного изменения формы конструкций, оборудования и изделий энергоблока под действием радиационного излучения, коррозии и эрозионного износа, термомеханических напряжений. В период создания первых АЭС их проектный ресурс из-за недостаточной базы знаний информации о возможном поведении конструкций энергоблока под действием агрессивной среды и нейтронного повреждения ограничивался малым периодом, который затем продлевался на основе данных инженерно-диагностических обследований фактического технического состояния энергоблока. Для текущего периода проектный срок эксплуатации большинства построенных энергоблоков АЭС оценивается периодом в 30 – 60 лет, а в некоторых перспективных проектах и до 100 лет [3, 4]. В настоя-

щее время значительное число энергоблоков в мире уже исчерпали свой проектный, а также дополнительный и фактический ресурсы и находятся в режиме вывода из эксплуатации.

На сегодняшний день безопасный и эффективный вывод из эксплуатации АЭС является одной из основных стратегических задач, стоящих перед атомной отраслью Российской Федерации. На текущий момент уже остановлено 10 блоков АЭС. В их числе Блоки № 1, 2 Нововоронежской АЭС и др. [5], которые в текущий период находятся в состоянии, требующим демонтажа конструкций и оборудования, их дезактивации и удаления с площадки их промышленного функционирования. В ближайшие годы будут еще окончательно остановлены более 17 блоков АЭС. Так в 2045 году с учетом обоснованных решений о продлении сроков эксплуатации энергоблоков АЭС количество остановленных энергоблоков составит 27. От качества и экономической, физико-технологической эффективности решения этой задачи во многом зависят не только социальная приемлемость и безопасность комплексного процесса вывода из эксплуатации энергоблока АЭС, но и позитивная перспектива будущего развития атомной энергетики.

В общем случае вывод из эксплуатации энергоблока АЭС, как определено в ряде нормативных документов регулятора и рекомендациях МАГАТЭ [6, 7], заключается в безопасном снятии с эксплуатации и удалении накопленной радиоактивности до уровня, позволяющего освободить его промышленную проектную площадку для дальнейшего неограниченного использования. Демонтаж, дезактивация и утилизация фрагментов разрушенного оборудования и конструкций энергоблока АЭС, выполнение реабилитационных работ на его территории могут быть достигнуты с помощью различных альтернативных концепций и методов для их осуществления.

В их числе концепция многоблочного процесса [8]. Результатом реализации такой концепции станет обезвреживание оборудования, элементов конструкций, трубопроводов, сосудов давления, агрегатов и сооружений, других компонентов энергоблока и его проектной площадки размещения, содержащих радиоактивные загрязняющие вещества. В рамках такой концепции компоненты энергоблока удаляются или обезвреживаются, в том числе территория размещения энергоблока подвергается реабилитации до состояний, которые считаются приемлемыми для обеспечения возможности их неограниченного использования. В другом варианте вывод из эксплуатации энергоблока АЭС предполагает, что данный объект подвергается конверсии и поддерживается в таком состоянии, при котором риск в аспектах безопасности жизнедеятельности и защиты экологии окружающего мира, населения является приемлемым. В далеком будущем этот объект может быть окончательно дезактивирован, чтобы можно было разрешить неограниченное использование территории его площадки, а также использование конструкции, агрегатов и материалов, сохранивших свои служебные качества и пригодные для повторного применения или для получения полезных материалов. В рамках этой концепции радиоактивные загрязняющие компоненты энергоблока и фрагменты их демонтажа будут упакованы в конструкции и сооружения защитного типа, имеющие длительный период проектного функционирования. Эти конструкции, например, специальные контейнеры, сооружения, хранилища радиоактивных опасных химических и ядерных материалов всегда поддерживаются в работоспособном надежном состоянии. При этом осуществляется постоян-

ный мониторинг их безопасности до тех пор, пока радиоактивность не упадет до уровня, позволяющего неограниченное использование компонентов.

Россия входит в число лучших поставщиков (в области экологически приемлемого использования атомной энергии) на ядерном энергетическом рынке, имеет глобальные экономические и социальные перспективы. В настоящее время на мировом рынке продукции ядерно-топливного цикла сложилась агрессивная конкурентная среда, в том числе для оказания услуг по выводу из эксплуатации энергоблоков АЭС [2, 6, 8]. В этой связи важно усиление конкурентоспособности РФ на рынках строительства, функционирования и вывода из эксплуатации АЭС, в первую очередь созданных по российским проектам. Поэтому путь решения проблемы инновационного развития специализированных производств и подготовки высококвалифицированных кадров для массового вывода из эксплуатации АЭС в ближайшее время по причине исчерпания их фактического ресурса безопасной эксплуатации представляется перспективным. Его необходимо формировать на базе логически ясных принципов общей концепции индустриального вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС. Такую концепцию еще предстоит сформулировать и верифицировать в ближайшем будущем.

### **Постановка задачи вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС на индустриальной основе**

Частные задачи [9 – 17], относящиеся к проблеме проектирования, осуществления и оптимизации процессов вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС и иных объектов использования атомной энергии как оригинальных сложных технических систем и энергетических комплексов, решались и решаются многими специалистами в течение многих лет. Однако комплексный научный подход к данной междисциплинарной научно-технической и социально-экономической проблеме в аспектах применения индустриальных методов вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС не применялся, что в итоге формирует риски, относящиеся к конкурентной способности РФ на мировом энергетическом рынке. В таких обстоятельствах актуальной, имеющей существенный социально-экономический и физико-технологический вызов, является проблема

конверсии и демонтажа конструкций, дезактивации и утилизации отработавших свой фактический ресурс конструктивных компонентов энергоблоков АЭС на индустриальной основе. Конверсию и демонтаж энергоблоков АЭС в общем случае по варианту использования их проектных площадок по новому назначению путем их модернизации с полной утилизацией их радиоактивных компонентов и промышленных отходов, проведения реабилитационных мероприятий важно осуществлять на проектно-системной основе в рамках общей оригинальной концепции. В основе этой концепции должны быть верифицированные научные принципы и положения. Таким образом, формулируется актуальная для национального хозяйства страны задача на новую разработку положения и свода логически ясных принципов для формирования концепции индустриального вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС в текущий момент и на перспективу для будущего периода массового исчерпания фактического ресурса действующих в настоящее время АЭС.

### **Метод решения и принятые допущения, ограничения**

Разработка положения и свода логически ясных принципов для формирования концепции индустриального вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС выполняется в нашем случае от частного к общему. Основой индустриального процесса вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС путем их демонтажа, разрушения конструкций, дезактивации и утилизации отходов, а затем реабилитации проектной площадки до состояния, при котором снимаются все ограничения для дальнейшего ее использование по новому назначению, являются изучение и научное обобщение различных частных проектов и достижений по выводу из эксплуатации энергоблоков АЭС или иных ядерных установок. Поэтому анализ и систематизация накопленных в этой области знаний и опыта в аспектах окончательного прекращения эксплуатации АЭС [8, 18 – 25] в нашем случае является основным методом поиска решения поставленной выше задачи.

При проведении необходимых исследований для формирования проекта вывода из эксплуатации конкретного энергоблока АЭС и обоснования безопасности этого проекта обычно требуются дополнительные интеллек-

туальные, материальные, финансовые и иные ресурсы, проводятся оригинальные лабораторные и натурные эксперименты, испытания, выполняются расчеты. В этой связи представляется важным принять допущение, что при массовом выводе из эксплуатации однотипных энергоблоков АЭС на индустриальной основе приемлемо использование ранее полученных результатов расчетов и испытаний, выполненных для первого демонтированного серийного блока. Это допущение реализуется путем разрешения применения этих результатов при соответствующем ограничении такой возможности документом по управлению качеством интегрального процесса демонтажа и разрушения энергоблока, реабилитации его площадки. Оптимизация затрат по критерию «эффективность – цена работ» возможна путем решения сопряженной задачи о системной классификации всех основных и вспомогательных процессов и процедур [18], действий по разрушительному демонтажу энергоблока АЭС, дезактивации, утилизации фрагментов его конструкций и по возможному полезному использованию материалов этих фрагментов, которые будут одинаковыми по своей сути и достигаемым целям. Таким образом, для общих организационных и инженерно-технических решений по выводу из эксплуатации АЭС на индустриальной основе дополнительным допущением может стать постоянное обновление объема, состава и последовательности действий, главных и вспомогательных процессов, процедур всей комплексной технологии конверсии энергоблока и его площадки до состояния минимального риска радиационной опасности для окружающего мира в формате открытой архитектуры [18, 19, 21, 24]. В общем случае технические решения по выводу из эксплуатации и конверсии энергоблоков АЭС на индустриальной основе определяют регламентацию ресурсного обеспечения, подготовку средств и методов разрушительного демонтажа, организацию и выполнение демонтажных работ, условия по обеспечению постоянного мониторинга безопасности и качества, управление качеством отдельных видов работ, других действий и усилий.

Конечными целями формирования свода принципов для новой концепции индустриального вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС являются разработка комплексного подхода и стандартизированных технологий к решению проблем массового вывода из экс-

плуатации энергоблоков АЭС, а также теоретических основ интегрального междисциплинарного процесса разрушительного демонтажа конструкций энергоблоков АЭС после исчерпания ими ресурса, дезактивации и утилизации фрагментов демонтированных конструкций и элементов оборудования энергетической установки. Для достижения этих целей важно применять общенаучные положения системного анализа и уже апробированные практикой принципы [14, 18, 21]: независимости; взаимного дополнения; частичного дублирования и разнообразия; функциональной безопасности; полноты и приемлемой достаточности осуществляемой деятельности [19, 22, 26], а также системный подход на платформе классификации всех необходимых действий по предварительно заданному набору показателей качества процесса. Исходя из указанного и формируется дополнительный и постоянно пополняемый свод оригинальных принципов построения концепции массового вывода из эксплуатации однотипных энергоблоков АЭС на индустриальной основе.

### Результаты

Основной целью концепции индустриального вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС является достижение эффективности и экологической приемлемости интегрального промышленного процесса демонтажа созданного по типовому проекту энергоблока АЭС и реабилитации его площадки. Эта цель достигается за счет превентивного предупреждения возможных угроз и сокращения факторов радиационной и иной опасности, формирования системы управления качеством для всех видов работ, объективного выбора для этого инвестора и исполнителя. Поэтому в сфере деятельности по массовому демонтажу энергоблоков АЭС, созданных по российским проектам, важно развитие физико-технологического и финансово-экономического механизмов для мотивации деятельности по индустриальному выводу из эксплуатации энергоблоков и контроля ее качества.

Оценка качества вывода из эксплуатации возможна только по результатам объективного прогнозного мониторинга и анализа радиационно-экологической ситуации как в период практических работ по демонтажу энергоблока, так и по завершению всех реабилитационных мероприятий на его промышленной пло-

щадке. Поэтому одним из основных принципов концепции индустриального массового вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС должен стать принцип полноты информационного обеспечения данного вида деятельности. В свою очередь информационное обеспечение должно быть основано на надежных и апробированных методах и средствах, включая специальное программное обеспечение для вычислительных машин и компьютерных сетей, важных для актуального ведения соответствующих систем управляемых баз данных, выполнения необходимых расчетов и др. [2, 8, 21 – 24, 26]. Для этого важно соблюдать принцип «независимость». Этот же принцип лежит в основе эффективного метода конверсии при демонтаже энергоблока АЭС.

В общем случае реализация на практике этого принципа достигалась физическим, функциональным и пространственным разнесением барьеров промышленной, физической, радиационной и ядерной безопасности в соответствии с их приоритетным рангом. При демонтаже конструкций энергоблока и реабилитации его площадки [27] важно применять принципы «разнообразия», «функциональной полноты» и многоуровневой системы мониторинга и управления безопасностью [14, 19] всех видов деятельности по выводу АЭС из эксплуатации. В составе концепции индустриального вывода из эксплуатации энергоблоков должны быть критерии минимизации возможных ущербов и потерь от случайных нарушений проектных условий безопасности при демонтаже энергоблока. С учетом изложенного свод основных принципов, важных для формирования концепции индустриального вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС, показан в сжатом формате в табл. 1 и 2.

### Обсуждение и анализ полученных результатов

На основе уже приобретенного опыта применения указанных выше принципов при выполнении практических работ по конверсии энергоблоков АЭС и исследовательских ядерных установок [2, 3, 8 – 10, 20 – 24, 27] на момент исчерпания их фактического ресурса может быть предложена информационная модель для будущей концепции индустриального массового вывода из эксплуатации АЭС. В различных вариантах деятельности по окончательному прекращению промышленной рабо-



ты АЭС важным становится учет указанных в табл. 1 и 2 принципов. Например, это могут быть варианты вывода из эксплуатации АЭС путем частичного разрушения конструкций и сооружений энергоблока и утилизации радиоактивных отходов от работ по демонтажу или окончательного разрушения энергоблока и полной реабилитации его промышленной площадки либо конверсии и дезактивации строительных конструкций их утилизация для длительного хранения. Применение указанных принципов концепции промышленного вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС наиболее рационально осуществлять за счет формирования необходимых требований физико-технологического и экономического характера. В частности, принцип «полноты обоснования» важно применять уже на стадии принятия решения о возможности продления срока службы или уже наступившей социально-экономической целесообразности вывода из

эксплуатации энергоблока АЭС на базе промышленных унифицированных технологий и средств. Реализовывать этот принцип важно путем определения состава требований к итоговому отчету по обоснованию безопасности применяемых инженерных технических решений для всего комплексного процесса вывода из эксплуатации энергоблока.

Принцип оптимизации состава и порядка выполнения всех необходимых работ по критерию безопасности для персонала и окружающего мира предусматривает поддержание ситуации на возможно низком и достижимом уровне радиационного опасного воздействия как индивидуальных (ниже пределов, установленных СанПиН 2.6.-20 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2020»), так и коллективных доз облучения с учетом социальных и экономических факторов. Этот же принцип оптимизации должен применяться к качеству выполняемых работ. В данном случае крите-

Таблица 1

#### Базовые принципы формирования концепции промышленного вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС

№ п/п	Название	Назначение
1	Принцип унификации	Унификация и метрологическое единство типового методического, информационного и физико-технологического обеспечения комплексного процесса демонтажа конструкций и систем энергоблока.
2	Принцип единства	Планирование и управление выполнением всех процессов и процедур вывода из эксплуатации энергоблока и реабилитации территории его размещения в том числе установления соответствия действующим нормам безопасности, надежности, рисков и др. в едином информационном формате программы управления качеством.
3	Принцип постоянного обновления и улучшения	Системное постоянное обновление базы знаний по информационным и инструментальным средствам промышленного вывода из эксплуатации и реабилитации площадки энергоблока, постоянное улучшение отраслевой информационной базы, нормативов и диагностических данных по условиям промышленного процесса вывода из эксплуатации энергоблока АЭС и его рискам, систематизация новых знаний по общепринятым критериям качества, достоверности, полноты информации и их накапливание (хранение) в информационных системах объектов, проектных и экспертной эксплуатирующей организаций и отраслевого уровней.
4	Принцип общей цели	Обобщение информации, получаемой в ходе различной деятельности при демонтаже конструкций и систем энергоблока, реабилитации его площадки, а также мониторинга соблюдения проектных условий, выполнения процессов и процедур экспертизы безопасности, проведения практических работ, управления рисками и т.д.
5	Принцип совместных действий	Системная координация процессов и процедур: промышленных, технологических, управленческих, диагностического мониторинга промышленной, радиационной, экологической безопасности и других в рамках общей информационной системы.

Таблица 2

**Дополнительные и общие принципы формирования концепции промышленного вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС**

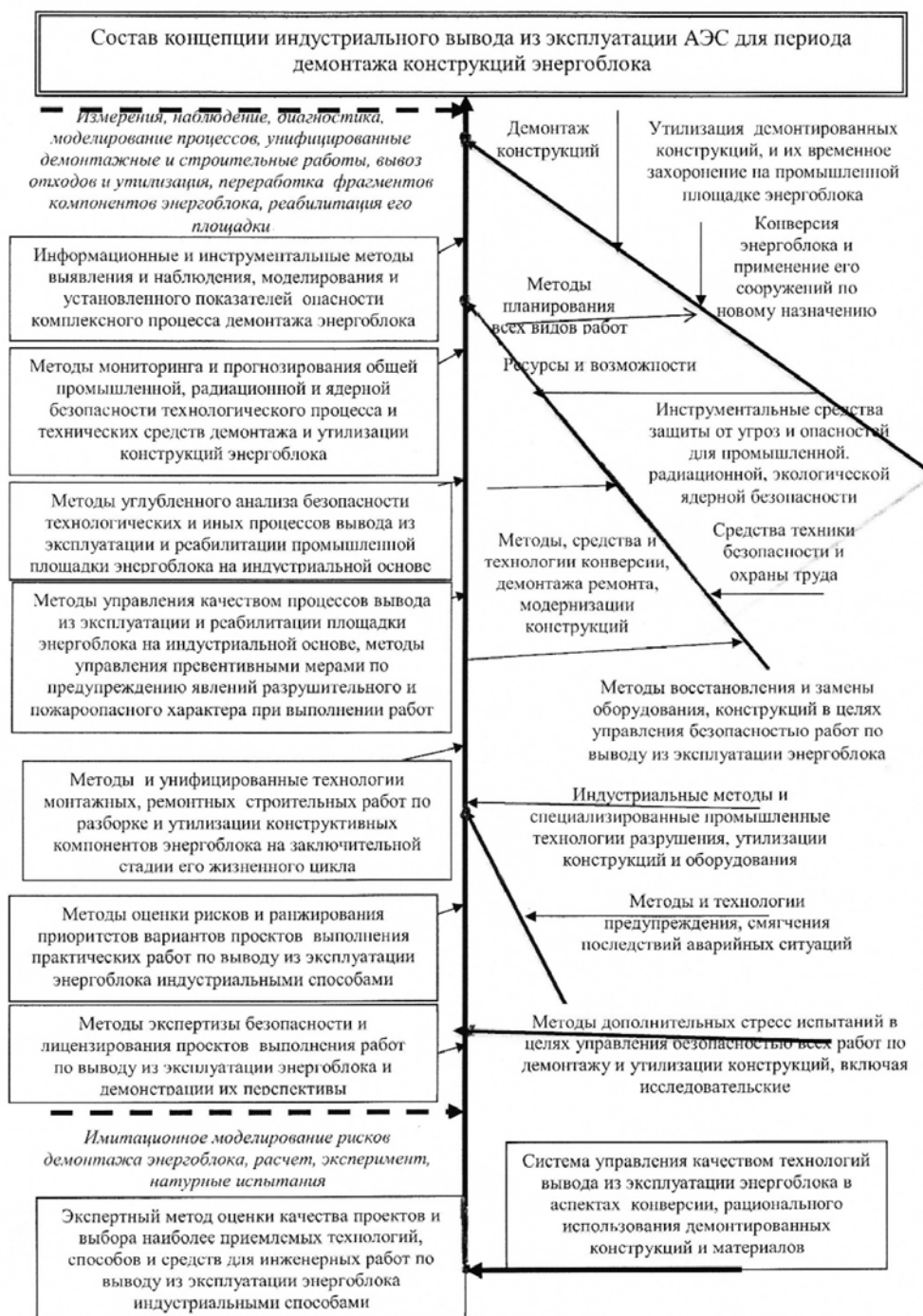
№ п/п	Название	Функциональное назначение и применение
1.	Принципы Культуры безопасности	Определяет набор показателей, критериев функциональной безопасности инженерно-технологической деятельности по выводу из эксплуатации энергоблока АЭС, включая управленческую деятельность организаций и отдельных исполнителей в аспектах высшего приоритета радиационной безопасности, экологической приемлемости, социальной значимости, допустимости рисков при использовании атомной энергии.
2.	Принципы Стандартов качества	Определяет условия обеспечения качества комплексного процесса демонтажа и утилизации конструкций энергоблока, реабилитации его площадки и управление качеством этого процесса.
3.	Принцип Иерархии	Определяет формат описания проектноцелевой деятельности по выводу из эксплуатации энергоблока АЭС с разной степенью обобщения как в целом, так и ее декомпозиции за счет распределение задач и целей по уровням потребностей и возможностей.
4.	Принцип Системной защиты	Обеспечивает метрологическое единство системы классификации и ранжирования опасностей для окружающего мира и персонала, осуществляющего деятельность по выводу из эксплуатации и демонтаж конструкций, систем энергоблока АЭС, реабилитации его площадки промышленными методами.
5.	Принцип Превентивного проектного предупреждения реализации событий аварийного и пожароопасного характера	Обеспечивает условия безопасности труда и охраны окружающей среды, жизнедеятельности населения и пр.
6.	Принципы рационального природопользования, энергетической, экономической эффективности и др.	Определяет условия оптимального ведения деятельности по демонтажу конструкций и реабилитации площадки энергоблока АЭС по критерию бережного потребления ресурсов и охраны окружающей среды.

рием оптимальности будет показатель «достигнутая эффективность – стоимость работы». Принцип «нормирования» важен как в части планирования работ в условиях, требующих не превышения установленных Федеральным законом «О радиационной безопасности населения» и Федеральными нормами индивидуальных пределов доз и других нормативов радиационной безопасности. Подобным образом в концепции промышленного вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС могут быть применены и другие общепринятые принципы в сфере культуры безопасности выполняемых работ и других важных обстоятельств для эффективного и безопасного ведения интегрального процесса полного или частичного демонтажа оборудования и конструкций, последую-

щей длительной консервации площадки энергоблока.

Для концептуального выбора инженерных методов и инструментальных средств конверсии энергоблока АЭС, формирования требований и разработки технических решений на завершающем этапе жизненного цикла АЭС может быть предложена оригинальная модель в формате диаграммы Исикавы (см. рисунок).

Такое представление обеспечивает возможность развития этой модели в направлении формирования инженерной структуры и системы безопасности для превентивного предотвращения проектных инцидентов и аварий при проведении будущих работ по демонтажу энергоблока и реабилитации проектной площадки АЭС на промышленной основе. В цен-



**Предварительная модель концепции вывода из эксплуатации энергоблока АЭС на промышленной основе**

тре внимания модели, прежде всего, остается системно-ориентированный подход развития потенциальных возможностей и обеспечения безопасности вывода из эксплуатации энергоблока. Модель включает вопросы совершенствования инженерных систем ведения практических работ, предупреждения технологических отказов, пожаров, функциональной защиты, в том числе аварийной и физической, от несанкционированных воздействий, а так-

же информационных систем оперативного управления. Кроме того, значительное внимание уделяется универсальным средствам защиты рабочего персонала от негативного воздействия радиоактивных компонентов энергоблока.

Дополнительно нужно отметить следующее. По мере накопления опыта вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС и их конверсии необходимы коррекция и улучшение нор-



мативной базы в части обеспечение качества и эффективности данного процесса. Нельзя также забывать и вопросы профессиональной подготовки и переподготовки соответствующих специалистов и руководителей деятельности по выводу из эксплуатации АЭС. Важной является проблема объективного анализа радиационно-экологической обстановки при производстве работ в период вывода энергоблока из эксплуатации, реабилитации его площадки на территории АЭС и за ее периметром. Поэтому экологический аудит, радиационный мониторинг, включая мониторинг здоровья людей, подвергшихся радиоактивному облучению при выполнении практических работ, должны найти свое место в своде принципов предлагаемой концепции. До текущего момента это не реализовано.

Таким образом, в целом определяются основные принципы для построения концепции индустриального вывода из эксплуатации АЭС, которые по мере накопления опыта и результатов анализа рисков при выполнении практических работ этого направления могут быть уточнены и дополнены. Сформулированные принципы представляются важными для формирования итогового обоснования ядерной, радиационной, промышленной безопасности будущих инновационных индустриальных технологий на этапе вывода из эксплуатации АЭС и их экологической приемлемости.

### Выводы

1. Предложен свод принципов, важных для формирования концепции и документированной разработки комплексного технологического процесса индустриального вывода из эксплуатации и утилизации отходов демонтажа энергоблока, обладающих достаточной общностью и инвариантностью к проектным особенностям и истории функционирования АЭС.

2. Верификация предложенного свода принципов обеспечивается результатами практических работ текущего периода при выводе из эксплуатации энергоблоков Нововоронежский АЭС первого поколения [5].

3. По результатам поиска причинно-следственных связей для выявления новых перспективных технических решений, возможностей для повышения качества и эффективности главного процесса вывода из эксплуатации энергоблока АЭС установлено, что при массовом исчерпании фактического ресурса безопас-

ности многими энергоблоками АЭС в ближайшем будущем достижение целей по окончательному демонтажу энергоблоков и смягчения последствий их опасного наследия наиболее рационально осуществлять индустриальными методами и унифицированными средствами.

### Список литературы

1. **Былкин, Б. К. Основы вывода из эксплуатации блоков атомных электрических станций: учеб.-метод. пособие** / Б. К. Былкин, И. А. Енговатов, Ю. А. Зверков и др.; под общей ред. П. Л. Ипатова, А. А. Дементьева, Ю. М. Семченкова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2019. — 504 с.
2. **Горлинский, Ю. Е. Учет зарубежного опыта и рекомендаций МАГАТЭ при планировании вывода из эксплуатации исследовательских ядерных установок** / Ю. Е. Горлинский, Б. К. Былкин, В. А. Кутьков, В. И. Павленко // Атомная техника за рубежом. — 2014. — № 1. — С. 3 – 18.
3. **Ерак, Д. Ю. Прогнозирование радиационного охрупчивания материала сварных швов корпусов реакторов ВВЭР-1000 при продлении ресурса до 60 лет и более** / Д. Ю. Ерак, В. Б. Папина, Д. А. Журко // Вопросы материаловедения. — 2023. — № 4 (116). — С. 227 – 244.
4. **Штромбах, Я. И. Перспективы ядерной энергетики** / Я. И. Штромбах, А. Ю. Гагаринский // Природа. — 2013. — № 12. — С. 17–34.
5. <https://www.atomic-energy.ru/articles/2022/01/14/120950> Вывод из эксплуатации первых энергоблоков ВВЭР на Нововоронежской АЭС.
6. **Decommissioning Strategies for Facilities Using Radioactive Materials**. IAEA Safety Reports Series No. 50. Vienna. 2006.
7. **Managing and Socioeconomics Impact of the Decommissioning of Nuclear Facilities**. IAEA Technical Reports Series No 464. Vienna. 2008.
8. **Енговатов, И. А. Основные положения блоковой концепции вывода из эксплуатации зданий и сооружений АЭС** / И. А. Енговатов, А. И. Иванова, Ж. А. Коваленко, В. Г. Волков, Н. Н. Сафронова // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2023. — № 4. — С. 86 – 94.
9. **Гирченко, А. А. Вывод из эксплуатации подкритического стэнда СО-2М** / А. А. Гирченко, Е. М. Кудрявцев, Р. М. Щепелев и др. // Атомная энергия. — 2014. — Т. 116. — Вып. 2.
10. **Decontamination and Demolition of Concrete and Metal Structure During the Decommissioning of Nuclear Facilities**. IAEA TRS. — No. 286. — Vienna. 1988.
11. **Волков, В. Г. Применение дистанционно управляемых механизмов с целью снижения радиационного воздействия на персонал** / В. Г. Волков, А. В. Чесноков, А. Д. Шиша



- и др. // Атомная энергия. — 2012. — Т. 113. — Вып. 5. — С. 285 – 289.
12. Байдаров, Д. Ю. Методика конверсии исследовательских ядерных реакторов на этапе вывода из эксплуатации / Д. Ю. Байдаров, Т. В. Бойкова, И. А. Тутнов и др. // Глобальная ядерная безопасность. — 2024. — № 2. — С. 58 – 67.
  13. Семенов, С. Г. Проблемы обращения с радиоактивным графитом при выводе из эксплуатации ядерных реакторов / С. Г. Семенов, А. В. Чесноков // Атомная энергия. — 2019. — Т. 126, Вып. 2. — С. 92 – 98.
  14. Северцев, Н. А. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла: монография / Н. А. Северцев, Н. К. Юрков. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. — 568 с.
  15. Соболев, А. В. Метод интегральной оценки надежности оборудования и персонала энергоблока АЭС при длительном сроке эксплуатации / А. В. Соболев, И. А. Тутнов, В. С. Царев, В. Ф. Украинцев // Атомная энергия. — 2021. — Т. 130. — № 3. — С. 152 – 158.
  16. Сомов, И. Е. Расчетно-экспериментальные методы определения параметров при хранении и обращении с ОЯТ / И. Е. Сомов, С. А. Николаев, В. Б. Полевой, С. А. Немытов, В. Н. Беспалов // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов. — 2002. — Вып. 3. — С. 15 – 25.
  17. Volkov, V. G. Radioactive waste management technologies used in rehabilitation of radioactively contaminated facilities and areas at the RRC «Kurchatov institute» / V. G. Volkov, G. G. Gorodetsky, S. G. Semenov // International Journal Nuclear Science and Technology. — 2006. — V. 2, № 1/2. — Pp. 127 – 143.
  18. Магер, В. Е. Управление качеством: учебное пособие / В. Е. Магер. — Москва: ИНФРА-М, 2020. — 176 с. (Высшее образование).
  19. Смит, Дэвид Дж. Функциональная безопасность / Дэвид Дж. Смит, Кеннет Дж. Симсон. — М.: ООО «Издательский дом «Технологии». — 2004. — 208 с.
  20. Аркадскова, О. М. Экспертиза документации и оценка выполнения программ обеспечения качества атомных станций: учебное пособие / О. М. Аркадскова, В. В. Козлов, Е. М. Кудрявцев и др. — М.: МИФИ, 2007. — 56 с.
  21. Тутнов, И. А. Информационно-управляющие системы для технического диагностирования объектов использования атомной энергии: учебное пособие для вузов / И. А. Тутнов. — М.: РАДЭКОН, 2003. — 127 с. ISBN 5-7891-0024-4.
  22. Северцев, Н. А. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла: монография / Н. А. Северцев, Н. К. Юрков. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. — 568 с.
  23. Бакиров, М. Б. Новый подход к исследованию причин повышенной повреждаемости ответственного оборудования АЭС / М. Б. Бакиров, В. И. Левчук, В. П. Поваров, А. Ф. Громов // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2014. — Т. 10. — № 6. — С. 118 – 124.
  24. Волков, В. Г. Контроль объемной активности нуклидов в воздухе при реабилитации площадки старых хранилищ РНЦ «Курчатовский институт» / В. Г. Волков, Г. Г. Городецкий, Ю. А. Зверков, В. Д. Музрукова, С. Г. Семенов, А. В. Чесноков, А. Д. Шиша // Атомная энергия. — 2008. — Т. 104, Вып. 1. — С. 37 – 43.
  25. Енговатов, И. А. Комплексное инженерное и радиационное обследование в проблеме вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС / И. А. Енговатов // Вестник МГСУ. — 2013. — № 1. — С. 125 – 132.
  26. Ginzburg, A. Implentation of BIM-technologies in Russian Construction Industry According to the International Experience / A. Ginzburg, L. Shilova, A. Adamtsevich // Journal of Applied Engineering Science — 2016. — № 14, Vol. 4. — Pp. 457 – 460.
  27. Шилова, Л. А. Информационное моделирование закрытие АЭС / Л. А. Шилова, А. А. Пустовгар // Энергетическая политика. — 2021. — № 2 (156) — С. 72 – 84.

## References

1. Bylkin B. K., Engovatov I. A., Zverkov Yu. A., Ipatov P. L., Dementyev A. A., Semchenkov Yu. M. *Osnovy vyvoda iz ekspluatatsii blokov atomnykh elektricheskikh stantsii* (Fundamentals of decommissioning of nuclear power plant units), Moscow, Publ. MPEI, 2019, 504 p.
2. Gorlinsky Yu. E., Bylkin B. K., Kutkov V. A., Pavlenko V. I. *Atomnaya tekhnika za rubezhom* (Nuclear Technology Abroad), 2014, No. 1, pp. 3 – 18.
3. Erak D. Yu., Papina V. B., Zhurko D. A. *Voprosy materialovedeniya* (Voprosy Materialovedeniya), 2023, No. 4 (116), pp. 227 – 244.
4. Shtrombakh Ya. I., Gagarinsky A. Yu. *Priroda* (Priroda), 2013, No. 12, pp. 17 – 34.
5. *Vyvod iz ekspluatatsii pervykh energoblokov VVER na Novovoronezhskoi AES* (Decommissioning of the first VVER power units at the Novovoronezh NPP), [Electronic resource]. — URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2022/01/14/120950>.
6. **Decommissioning Strategies** for Facilities Using Radioactive Materials, IAEA Safety Reports Series, No. 50, Vienna, 2006.
7. **Managing and Socioeconomics Impact** of the Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA Technical Reports Series, No 464, Vienna, 2008.
8. Engovatov I. A., Ivanova A. I., Kovalenko Zh. A., Volkov V. G., Safronova N. N. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika* (Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika), 2023, No. 4, pp. 86 – 94.
9. Girchenko A. A., Kudryavtsev E. M., Shchepelev R. M. *Vyvod iz ekspluatatsii podkriticheskogo stenda SO-2M* (Decommissioning of the SO-2M Subcritical Facility), Atomic Energy, 2014, Vol. 116, Issue 2.
10. **Decontamination and Demolition** of Concrete and Metal Structure During the Decommissioning

- of Nuclear Facilities, IAEA TRS, No 286, Vienna, 1988.
11. **Volkov V. G., Chesnokov A. V., Shisha A. D.** *Atomnaya energiya* (Atomic Energy), 2012, Vol. 113, Issue 5, pp. 285 – 289.
  12. **Baidarov D. Yu., Boykova T. V., Tutnov I. A.** *Global'naya yadernaya bezopasnost'* (Global Nuclear Safety), 2024, No. 2, pp. 58 – 67.
  13. **Semenov S. G., Chesnokov A. V.** *Atomnaya energiya* (Atomic Energy), 2019, Vol. 126, Issue 2, pp. 92 – 98.
  14. **Severtsev N. A., Yurkov N. K.** *Bezopasnost' dinamicheskikh sistem na etapakh zhiznennogo tsikla* (Safety of Dynamic Systems at Life Cycle Stages), Penza, Publ. PSU, 2023, 568 p.
  15. **Sobolev A. V., Tutnov I. A., Tsarev V. S., Ukraintsev V. F.** *Atomnaya energiya* (Atomic Energy), 2021, Vol. 130, No. 3, pp. 152 – 158.
  16. **Somov I. E., Nikolaev S. A., Polevoy V. B., Nemytov S. A., Bepalov V. N.** *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki, ser. Fizika yadernykh reaktorov* (Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors), 2002, No. 3, pp. 15 – 25.
  17. **Volkov V. G., Gorodetsky G. G., Semenov S. G.** Radioactive waste management technologies used in rehabilitation of radioactively contaminated facilities and areas at the RRC «Kurchatov institute», International Journal Nuclear Science and Technology, 2006, Vol. 2, No. 5, pp. 127 – 143.
  18. **Mager V. E.** *Upravlenie kachestvom* (Quality Management), Moscow, INFRA-M, 2020 – 176S, Higher education.
  19. **Smith David J., Simson Kenneth J.** *Funktsional'naya bezopasnost'* (Functional Safety), Moscow, OOO «Publishing House «Technologies», 2004, 208 p.
  20. **Arkadskova O. M., Kozlov V. V., Kudryavtsev E. M.** *Ekspertiza dokumentatsii i otsenka vypolneniya programm obespecheniya kachestva atomnykh stantsii* (Documentation Review and Assessment of Implementation of Quality Assurance Programs for Nuclear Power Plants), Moscow, MEPhI, 2007, 56 p.
  21. **Tutnov I. A.** *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy dlya tekhnicheskogo diagnostirovaniya ob'ektov ispol'zovaniya atomnoi energii* (Information and control systems for technical diagnostics of nuclear facilities), Moscow, RADEKON, 2003, 127 p., ISBN 5-7891-0024-4.
  22. **Severtsev N. A., Yurkov N. K.** *Bezopasnost' dinamicheskikh sistem na etapakh zhiznennogo tsikla* (Safety of dynamic systems at life cycle stages), Penza, Publ. PSU, 2023, 568 p.
  23. **Bakirov M. B., Levchuk V. I., Povarov V. P., Gromov A. F.** *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* (Bulletin of the Voronezh State Technical University), 2014, Vol. 10, No. 6, pp. 118 – 124.
  24. **Volkov V. G., Gorodetsky G. G., Zverkov Yu. A., Muzrukova V. D., Semenov S. G., Chesnokov A. V., Shisha A. D.** *Atomnaya energiya* (Atomic Energy), 2008, Vol. 104, No. 1, pp. 37 – 43.
  25. **Engovatov I. A.** *Vestnik MGSU* (Bulletin of MGSU), 2013, No. 1, pp. 125 – 132.
  26. **Ginzburg A., Shilova L., Adamtsevich A.** Implementation of BIM-technologies in Russian Construction Industry According to the International Experience, Journal of Applied Engineering Science, 2016, No. 14, Vol. 4, pp. 457 – 460.
  27. **Shilova L. A., Pustovgar A. A.** *Energeticheskaya politika* (Energy Policy), 2021, No. 2 (156), pp. 72 – 84.

safronova\_nn@accni.ru

## Provisions and principles of the concept of industrial decommissioning of NPP power units

Safronova N. N.

The problem of organizing a unified process of mass decommissioning of aging NPP power units on an industrial basis is considered, the principles and main provisions of the concept of liquidation of NPP power units in the vector of practical work on decommissioning of nuclear power plants, the implementation of measures to eliminate the negative consequences of NPP operation and dangerous nuclear legacy in compliance with the regulatory conditions of safety, efficiency and environmental acceptability are formulated facilities for the use of atomic energy.

**Keywords:** Nuclear power plant, safety, decommissioning, concept, principles.

# Идеальное решение для высоких кабельных нагрузок

Активное развитие инфраструктуры страны, обмен всё большим объемом информации, постоянный рост потребления электроэнергии, активное строительство современных мощных промышленных объектов и большое внимание к обеспечению их безопасности требует прокладки силовых кабелей большого сечения. Одними из определяющих критериев кабеленесущих конструкций являются их нагрузочные характеристики и применяемые для их изготовления материалы.

Использование лестничных лотков ОБО Беттерманн даёт больше преимуществ по сравнению с предложением конкурентов: увеличенное пространство, надёжность и способность выдерживать большие нагрузки. Эксперты ОБО Беттерманн рекомендуют использовать лестничные лотки в качестве основной кабельной трассы, и для этого есть все основания.

Лестничные кабельные лотки ОБО Беттерманн производятся из стали методом проката. Все элементы обладают пространственной структурой с многочисленными рёбрами жёсткости, благодаря чему лестничные лотки имеют одни из самых высоких показателей безопасной рабочей нагрузки среди кабеленесущих систем.

При сборке перекладины соединяются с боковыми профилями, образуя знакомый всем формат лестницы. В результате конструкция способна выдерживать распределённую нагрузку до 300 кг на погонный метр. Этого достаточно для монтажа самого тяжёлого и сложного кабеля.

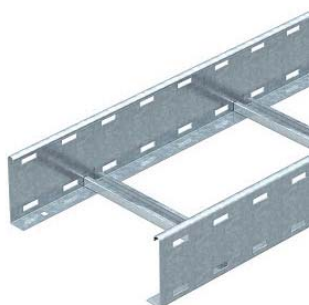
Уникальный механизм складывания лестничных лотков ОБО Беттерманн обеспечивает экономию места. Перекладины крепятся к боковым профилям нержавеющими заклёпками. При складывании можно разместить в 4 – 6 раз больше лотков в одном объёме. После установки лотки фиксируются жёстко, образуя единую конструкцию.

Важный параметр — небольшой вес самого лотка. Лёгкая и ажурная конструкция имеет меньшую металлоёмкость по сравнению с листовыми аналогами, но при этом превосходит их по прочности.

Применение данного типа конструкций позволяет гибко подходить к проектированию и выбору конфигурации трассы. Лестничные лотки предпочтительнее использовать на следующих видах объектов:

- Бытовые и коммерческие помещения
- Промышленные объекты
- Различные инженерные системы вне помещений
- Многоуровневые кабельные эстакады
- Восходящие участки кабельной трассы

ОБО Беттерманн предлагает кабельные лестничные лотки, изготовленные из металла толщиной 1,5 мм, шириной от 200 до 600 мм и длиной 3 или 6 метров в стандартном ассортименте. Специалисты инженерного центра разрабатывают системное решение по индивидуальному заказу, который будет изготовлен в соответствии с размерами планируемой трассы на конкретном объекте заказчика. Лестничные лотки ОБО производятся в Липецке на современном производстве с тщательным контролем за соблюдением немецких стандартов и нормативов, принятых в России. Каждая конструкция полностью соответствует заявленным параметрам.



Использование лестничных лотков ОБО Беттерманн для прокладки силовых кабелей большого сечения является оптимальным решением с точки зрения безопасности, прочности, удобства монтажа и соответствия всем современным требованиям и стандартам.

*Сертификация:  
ГОСТ 52868-21,  
ГОСТ 15150-69,  
ГОСТ 15716-90.  
Продукция  
ОБО Беттерманн  
внесена в Реестр  
Минпромторга (ГИСП).*

*Лицензия  
Государственной  
корпорации  
по атомной энергии  
«Росатом».*



Кабеленесущие системы ОБО Беттерманн на заводе по производству полипропилена в Тобольске — «Тобольск-Полимер» (Тюменская область)



## CONTENTS

### PROJECTS AND RESEARCH

**Kachanov A. N., Chernyshov V. A., Luk'yanov G. V.** Computer simulation of the process of converting a double ground fault into a single-phase fault in 10 kV networks with an isolated neutral. . . . . 2

**Gusev E. V., Sergienkova A. A., Sokolsky A. I.** Increasing energy and resource conservation in the technology of wall clay-ash ceramics. . . . . 9

**Genbach A. A., Genbach N. A., Andreeva E. A., Shelginsky A. Ya.** Cooling of power installations with coatings from mineral mediums. . . . . 15

**Ryabov G. A., Folomeev O. M.** Using circulating fluidized bed technology to methanol production . . . . . 22

**Bukhmirov V. V., Bushuev E. N., Svetushkov I. I., Rodionova M. V., Dolinin D. A.** Experimental study of the microclimate of the boiler-turbine shop of Ivanovskaya CHPP-2. . . . . 31

**Sivak A. S., Kalganova S. G., Trigorlyi S. V., Kadykova Y. A., Sakhadzhi G. V.** Modeling of heating of high-energy radio-absorbing composites in microwave chambers of different types . . . . . 36

### OPERATION, INSTALLATION AND ADJUSTMENT

**Safronova N. N.** Provisions and principles of the concept of industrial decommissioning of NPP power units . . . . . 43

Началась подписка на наш журнал на 2025 г.

Оформить подписку можно через подписные агентства (подписной индекс 70734) или через редакцию.

Возможна подписка на электронную версию журнала.

Главный редактор **С. А. ЦЫРУК**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**М. Г. Баширов, И. В. Белоусенко,**

**В. В. Вахнина, А. В. Волков, Е. Г. Гашо, В. И. Гнатюк, А. О. Гольцев, И. Д. Грачев,**

**Н. Ф. Джагаров (Болгария), Е. Н. Касьянова (ответственный секретарь),**

**Ю. В. Матюнина, И. И. Надтока, Л. А. Новелла (зам. гл. редактора),**

**А. Н. Пехота (Республика Беларусь),**

**С. К. Попов (зам. гл. редактора по теплоэнергетике),**

**Е. Н. Рыжкова (зам. гл. редактора по электроэнергетике), Ю. А. Сычев, В. Э. Фризен,**

**К. Ф. Шарафеддин (Ливан), А. В. Щербаков, С. А. Янченко**

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Перепечатка, копирование материалов, опубликованных в журнале «Промышленная энергетика», допускаются только с разрешения редакции

Адрес редакции: 129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8.

Телефон: (495) 234-74-49.

[Http://www.promen.energy-journals.ru](http://www.promen.energy-journals.ru) E-mail: [prom\\_energy@rambler.ru](mailto:prom_energy@rambler.ru); [prom\\_energy1@mail.ru](mailto:prom_energy1@mail.ru)

Сдано в набор 08.09.2024. Подписано в печать 25.09.2024. Дата выхода в свет 26.09.2024. Формат 60 × 84 1/8. Печ. л. 4,0. Тираж 2500 экз. Заказ БЛ-1366. Цена — свободная.

Адрес для переписки: АО НТФ «Энергопрогресс»: 129090, Москва, ул. Щепкина, д. 8

Оригинал-макет выполнен в издательстве «ФОЛИУМ»

127411, Москва, Дмитровское ш., 157, тел.: (499) 258-08-28. E-mail: [info@folium.ru](mailto:info@folium.ru)





