



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**Научно-технический  
и производственный журнал**

**(26) 3 / 2024**

**POWER ENGINEERING:  
RESEARCH, EQUIPMENT,  
TECHNOLOGY**

*Scientific & Technical Journal*

## **Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ**

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года  
Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

**Главный редактор** АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю.  
**Второй главный редактор** АХМЕТОВА И.Г.  
**Заместитель главного редактора** STANIMIR VALTCHEV

**Ответственный секретарь** ГРАЧЕВА Е.И.

**Научный редактор** КАЛИНИНА М.В.

### **ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:**

#### **ВАК:**

- ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ)  
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ,  
ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ  
НАУКИ)
- ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ  
СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ  
НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ  
НАУКИ)
- ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ  
НАУКИ)
- РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

#### **РИНЦ:**

- ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**Свидетельство  
о регистрации СМИ:** Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) -  
ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г.

**Подписка:** Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740

**Сайт:** <https://www.energyret.ru/>

**Издатель:** Казанский государственный энергетический университет

**Адрес издателя:** 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51

**Адрес редакции:** 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51

**Тел./факс:** +7 (843) 527-92-76

**Email:** problems\_ener@mail.ru

**Типография:** ООО "ФОЛИАНТ"

**Адрес типографии:** 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Профсоюзная, 17 в

# Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

---

---

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2024  
Т.26, № 3  
Май - Июнь

ISSN 1998-9903 (Print)  
ISSN 2658-5456 (Online)

---

---

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

## УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

## ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

Журнал освещает фундаментальные и прикладные исследования, а также дискуссионные вопросы по проблемам энергетики и связанными с ней отраслями производства и науки.

В Журнале публикуются результаты открытых научных исследований, выполняемых учеными научных учреждений, высших учебных заведений, иных организаций и граждан, ведущих научные исследования в порядке личной инициативы.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

АХМЕТОВА И.Г.  
АРАКЕЛЯН Э.К.  
БОРУШ О.В.  
БОЧКАРЕВ И.В.  
БРЯКИН И.В.  
ВАНЬКОВ Ю.В.  
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.  
ГРАЧЕВА Е.И.  
ДМИТРИЕВ А.В.  
ДОВГУН В.П.  
ЗВЕРЕВА Э. Р.  
ИВШИН И.В.  
КАЛАЙДА М.Л.  
КАСИМОВ В.А.

КОРНИЛОВ В.Ю.  
ЛАПТЕВ А.Г.  
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.  
МИНГАЛЕЕВА Г.Р.  
НИКОЛАЕВА Л.А.  
ПЕТРОВ Т.И.  
САФИН А.Р.  
СУСЛОВ К.В.  
ФЕДОТОВ А.И.  
ЯКИМОВ Н.Д.  
PENTIUC RADU DUMITRU  
KOLCUN MICHAEL

## Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-83199 от 31.03.2022 г.

# Power engineering: research, equipment, technology

---

---

SCIENTIFIC &  
TECHNICAL JOURNAL

2024  
Vol. 26, № 3  
May - June

ISSN 1998–9903 (Print)  
ISSN 2658-5456 (Online)

---

---

**Founder:** Kazan State Power Engineering University

**Publisher:** Kazan State Power Engineering University

**Editor-in-Chief:** EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV  
**Second Editor in Chief:** AKHMETOVA IRINA GAREEVNA  
**Deputy Chief Editor:** STANIMIR VALTCHEV

The Journal publishes the results of open scientific research carried out by scientists of scientific institutions, higher educational institutions, other organizations and citizens conducting research in the form of a personal initiative. The following materials are accepted for publication: original articles; scientific reviews; reviews; short messages; reference materials.

**Sections:**

**Editorial board:**

AKHMETOVA IRINA	IVSHIN IGOR	YAKIMOV NIKOLAY
ARAKELYAN EDIK	KALAJDA MARINA	KOLCUN MICHAIL
BORUSH OLESYA	KASIMOV VASIL	ILIYA K. ILIEV
BOCHKAREV IGOR	KORNILOV VLADIMIR	ION V. ION
BRYAKIN IGOR	LAPTEV ANATOLY	PENTIUC RADU DUMITRU
VANKOV YURY	MESHCHERYAKOV VIKTOR	STANIMIR VALTCHEV
GRACHEVA ELENA	MINGALEEVA GUZEL	DMITRIEV ANDREY
VAFIN DANIL	NIKOLAEVA LARISA	DOVGUN VALERY
GOLENISHCHEV-KUTUZOV	SUSLOV KONSTANTIN	SAFIN ALFRED
ALEXANDER		
ZVEREVA ELVIRA	FEDOTOV ALEXANDER	SHCHINNIKOV PAVEL

**Address** Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Republic of Tatarstan,  
Russian Federation  
**Tel./fax:** +7 (843) 527-92-76  
**Printing House:** LLC «FOLIANT»  
**Address of the printing house** 420111, Republic of Tatarstan, g. Kazan, Str. Trade Union, 17 V  
**Email:** [problems\\_ener@mail.ru](mailto:problems_ener@mail.ru)  
**Site:** <https://www.energyret.ru/>

© Power engineering: research, equipment, technology, 2024.

**СОДЕРЖАНИЕ  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

<b>ИВАНИЦКИЙ М.С.</b> Технологические нормативы и показатели выбросов ТЭСИ котельных	<b>3</b>
<b>МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ</b>	
<b>МИНУЛЛИН Р.Г., ГРАНСКАЯ А.А., АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., АХМЕТОВА И.Г., МУСТАФИН Р.Г., КАСИМОВ В.А.</b> Способы подключения аппаратуры локационного мониторинга к воздушным линиям электропередачи	<b>16</b>
<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ</b>	
<b>СИНЮКОВ А.В., АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., ЗАРУЦКИЙ Н.Н., СИНЮКОВА Т.В., ГРАЧЕВА Е.И.</b> Использование аппарата на базе нечеткой логики для демпфирования колебаний гибкоподвешенного груза	<b>33</b>
<b>МАЙОРОВ А.А., САФИН А.Р.</b> Методы оптимизации роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами	<b>50</b>
<b>ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА</b>	
<b>ОЖУЛАС В.А., ПЕТРИЩЕВ А.В., ФИШОВ А.Г.</b> Использование симулятора режимов Миннигрид для решения задач проектирования	<b>66</b>
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ</b>	
<b>ЗУБОВА Е.В., ФЕДОСОВ Д.С.</b> Исследование условий возникновения резонанса на высших гармониках в электрической сети, питающей нелинейную нагрузку	<b>83</b>
<b>БЕЛЬСКИЙ Р.А., ФРОЛОВ В.Я., ЖИЛИГОТОВ Р.И., САФОНОВ Е.П.</b> Снижение кратности коммутационного перенапряжения в генераторных сетях	<b>96</b>
<b>ЗИГАНШИН Ш.Г., ЗАГРЕТДИНОВ А.Р., ВАНЬКОВ Ю.В.</b> Энергосберегающие мероприятия при эксплуатации промышленных печей на газоперерабатывающем предприятии	<b>108</b>
<b>НАБИУЛЛИНА М.Ф., МИНГАЛЕЕВА Г.Р., АФАНАСЬЕВА О.В., ТИМОФЕЕВА С.С.</b> Использование растительных отходов для обеспечения функционирования сельскохозяйственных энергокомплексов	<b>120</b>
<b>ГРИБКОВ А.М., ЧИЧИРОВА Н.Д., МИРСАЛИХОВ К.М.</b> Определение траектории дымового факела с использованием спутниковых снимков	<b>132</b>
<b>ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА</b>	
<b>ЯКИМОВ Н.Д., ШАГЕЕВ А.Ф., ДМИТРИЕВ А.В., МУТУГУЛЛИНА И.А.</b> Температурное поле в цилиндрическом пористом слое при «бесконечном» нагреве с оттоком теплоты	<b>146</b>
<b>ПЛОТНИКОВ Л.В., РЫЖКОВ А.Ф., КРАСИЛЬНИКОВ Д.Н., ДАВЫДОВ Д.А., ШУРУПОВ В.А.</b> Экспериментальная оценка структуры потока в вертикальном коническом диффузоре при разных способах подачи воздуха	<b>156</b>
<b>ДОНСКОЙ И.Г.</b> Влияние лучистых теплопотерь на условия плавления материала с внутренним тепловыделением	<b>173</b>
<b>ВАФИН Д.Б., МУКАТДАРОВ А.А., МУКАТДАРОВА Д.А.</b> Тепловое состояние в туннельной печи обжига кирпичей со сводовым расположением горелок	<b>184</b>

## CONTENTS

## ECOLOGICAL SAFETY

<b>IVANITSKIY M.S.</b> Technological standards and emission indicators thermal power plants and boiler houses	<b>3</b>
---	----------

**METHODS AND INSTRUMENTS OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT**

<b>MINULLIN R.G., GRANSKAYA A.A., ABDULLAZYANOV E.YU., AKHMETOVA I.G., MUSTAFIN R.G., KASIMOV V.A.</b> Connecting methods of location monitoring equipment to overhead power lines	<b>16</b>
--	-----------

**ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS**

<b>SINYUKOV A.V., ABDULLAZYANOV E.YU., SINYUKOV T.V., ZARUCKIY N.N., GACHEVA E.I.</b> Using a fuzzy logic-based apparatus for damping vibrations of a flexible load	<b>33</b>
<b>MAIOROV A.A., SAFIN A.R.</b> Methods for optimizing rotors of synchronous electric motors with permanent magnets	<b>50</b>

**ELECTRIC POWER INDUSTRY**

<b>OZHULAS V.A., PETRISHHEV A.V., FISHOV A.G.</b> Using a simulator of Minigrad modes to solve design problems	<b>66</b>
--	-----------

**ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES**

<b>ZUBOVA E.V., FEDOSOV D.S.</b> Study of resonance conditions on higher harmonics in an electrical network supplying a nonlinear load	<b>83</b>
<b>BELSKY R.A., FROLOV V.Y., ZHILIGOTOV R.I., SAFONOV E.P.</b> Reducing the frequency of switching overvoltage in generator networks	<b>96</b>
<b>ZIGANSHIN SH.G., ZAGRETDINOV A.R., VANKOV Y.V.</b> Energy-saving measures for the operation of industrial furnaces at a gas processing plant	<b>108</b>
<b>NABIULLINA M.F., MINGALEEVA G.R., AFANASEVA O.V., TIMOFEEVA S.S.</b> The use of plant waste to ensure the functioning of agricultural energy complexes	<b>120</b>
<b>GRIBKOV AM., CHICHIROVA N.D., MIRSALIKHOV K.M.</b> Determining the trajectory of a smoke flame using satellite images	<b>132</b>

**THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING**

<b>YAKIMOV N.D., SHAGEEV A.F., DMITRIEV A.V., MUTUGULLINA I.A.</b> Temperature field in a cylindrical porous layer during “endless” heating with heat outflow	<b>146</b>
<b>PLOTNIKOV L.V., RYZHKOV A.F., KRASILNIKOV D.N., DAVYDOV D.A., SHURUPOV V.A.</b> Experimental evaluation of the flow structure in a vertical conical diffuser with different air supply methods	<b>156</b>
<b>DONSKOY I.G.</b> The influence of radiant heat loss on the melting conditions of a material with internal heat release	<b>173</b>
<b>VAFIN D.B., MUKATDAROV A.A., MUKATDAROVA D.A.</b> Thermal condition in a tunnel brick kilning kiln with vocculated burners	<b>184</b>

# ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



УДК 621.311.22

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-3-3-15

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НОРМАТИВЫ И ПОКАЗАТЕЛИ ВЫБРОСОВ ТЭСИ КОТЕЛЬНЫХ

Иваницкий М.С.

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
в г. Волжском, Россия

ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0002-8779-5453>, mseiv@yandex.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ* данного исследования заключается в необходимости практической реализации отечественной государственной стратегии экологического развития, позволяющей обеспечить функционирование основных отраслей экономики с низким уровнем выбросов парниковых газов с учетом мировых климатических изменений для постепенного перехода к полной углеродной нейтральности. Природоохранная политика в области охраны окружающей среды направлена на ограничение поступления выбросов парниковых газов в атмосферу посредством разработки и совершенствования организационных и технологических мероприятий. Таким образом, на основе сформированной стратегии энергетические предприятия могут участвовать в проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ с целью определения нормативов допустимых выбросов парниковых газов в атмосферу для котельных установок тепловых электрических станций. **ЦЕЛЬ.** В работе проанализирована законодательная база, нормативно-технические документы и методические подходы к установлению норм и оценке технологических показателей выбросов парниковых газов в атмосферу для котельных установок. **МЕТОДЫ.** Расчеты выбросов углекислого газа в атмосферу при работе котельных установок тепловых электрических станций, использующих в качестве топлива каменный и бурый уголь (варианты), выполнены в соответствии с методическими рекомендациями, основанными на балансовых уравнениях, учитывающих теплотехнические характеристики топлива. Массовые и удельные выбросы углекислого газа определены для наиболее распространенных типов углей, используемых на российских ТЭС. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** С учетом состава и низшей теплоты сгорания топлива, входной тепловой мощности (50 МВт и более) и показателей тепловой экономичности ТЭС различного типа рассчитаны массовые и удельные выбросы углекислого газа в пересчете на тонну натурального и условного топлива. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные результаты исследования могут быть использованы на энергетических предприятиях и ТЭС при разработке программы повышения экологической эффективности и обосновании участия в государственном эксперименте по квотированию выбросов, в том числе постепенному переходу к полной углеродной нейтральности процесса производства энергии.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность ТЭС, технологическое нормирование выбросов, массовые и удельные выбросы, индикативные показатели, парниковые газы

**Для цитирования:** Иваницкий М.С. Технологические нормативы и показатели выбросов ТЭСИ котельных // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-3-15.

## TECHNOLOGICAL STANDARDS AND EMISSION INDICATORS THERMAL POWER PLANTS AND BOILER HOUSES

Ivanitskiy M.S.

**Volzhsky Branch of the National Research University  
«Moscow Power Engineering Institute», Russia**  
ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0002-8779-5453> , mseiv@yandex.ru

**Abstract:** *RELEVANCE* this study is based on the need for the practical implementation of the national state strategy for environmental development, which allows for the functioning of the main sectors of the economy with low greenhouse gas emissions, taking into account global climate change, for a gradual transition to full carbon neutrality. Environmental protection policy in the field of environmental protection is aimed at limiting the entry of greenhouse gas emissions into the atmosphere through the development and improvement of organizational and technological measures. Thus, based on the formed strategy, energy enterprises can participate in conducting an experiment on quotas for emissions of pollutants in order to determine the standards for permissible greenhouse gas emissions into the atmosphere for boiler installations of thermal power plants. *PURPOSE.* The paper analyzes the legislative framework, regulatory and technical documents and methodological approaches to setting standards and evaluating technological indicators of greenhouse gas emissions into the atmosphere for boiler plants. *METHODS.* Calculations of carbon dioxide emissions into the atmosphere during the operation of boiler installations of thermal power plants using coal and natural gas as fuel (options) are performed in accordance with methodological recommendations based on balance equations. Mass and specific carbon dioxide emissions have been determined for the most common types of coal and natural gas used at Russian thermal power plants. *RESULTS.* Taking into account the composition and lower heat of combustion of fuel, input thermal power (50 MW or more) and thermal efficiency indicators of thermal power plants of various types, mass and specific carbon dioxide emissions in terms of a ton of natural and conventional fuel are calculated. *CONCLUSION.* The obtained research results can be used at energy enterprises and thermal power plants in the development of a program to improve environmental efficiency and justify participation in a state experiment on emission quotas, including a gradual transition to full carbon neutrality of the energy production process.

**Keywords:** *environmental safety of thermal power plants, technological regulation of emissions, mass and specific emissions, indicative indicators, greenhouse gases*

**For citation:** Ivanitskiy M.S. Technological standards and emission indicators thermal power plants and boiler houses. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (3): 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-3-15.

### **Введение (Introduction)**

Постепенный переход технологий к полной углеродной нейтральности направлен на формирование энергетическими предприятиями стратегии отсутствия углеродного следа в процессе производства тепловой и электрической энергии. В этой связи в последнее время разработаны и утверждены механизмы государственной стратегии экологического развития, регламентирующие основные пути достижения низких значений углеродоемкости технологического производства, в том числе мероприятий для снижения косвенных выбросов парниковых газов в атмосферу. Отметим, что обеспечение требований по сокращению массовых выбросов парниковых газов на 70% к 2030 году по сравнению с уровнем выбросов 1990 года предлагается осуществить путем разработки и внедрения технических и технологических мер, для которых будут определены эффективные механизмы стимулирования. В связи с этим энергетическими предприятиями должны быть разработаны программы повышения экологической эффективности, предусматривающие возможность выполнения мер по ограничению поступления выбросов парниковых газов в атмосферу. Другим вариантом повышения экологической безопасности ТЭС является участие энергетического предприятия в эксперименте по квотированию выбросов парниковых газов. В реальных условиях участие энергетических предприятий в эксперименте по квотированию выбросов углекислого газа сопровождается техническими и технологическими сложностями. Поэтому снижение углеродного следа посредством

сокращения прямых и косвенных выбросов парниковых газов при производстве электрической и тепловой энергии должно сопровождаться решением организационных вопросов и реализацией режимно-технологических мероприятий, учитывающих возможность внедрения на действующих энергетических предприятиях наилучших доступных технологий. Важным аспектом при этом являются технологические особенности установленного энергетического оборудования и теплотехнические характеристики топлива, которые во многом определяют технологические показатели выбросы парниковых газов для конкретной ТЭС. Утверждение технологических показателей выбросов парниковых газов планируется при актуализации ИТС 38-2022 в 2024 году [4 – 7].

Анализ законодательной базы и нормативно-технических документов, регламентирующих необходимость снижения выбросов парниковых газов в атмосферу при сжигании топлива в котлах ТЭС и котельных показывает, что климатическая политика в Российской Федерации интенсивно развивается, особенно, начиная с 2020 года. В соответствии с требованиями ФЗ №296 от 02.07.2021 года установлены требования по ограничению выбросов парниковых газов в атмосферный воздух, которые регламентируют нормативы предельно допустимых выбросов и требования по реализации климатических проектов на территории России, а также определяют подходы для осуществления регулирования выбросов парниковых газов за счет внедрения на энергетических предприятиях технологических решений на стадии охлаждения продуктов сгорания и режимно-технологических мероприятий на стадии сжигания органического топлива в котельных установках. Для практического внедрения требований ФЗ №296 от 02.07.2021 года разработана и утверждена Приказом Минприроды России № 371 от 27.05.2022 года методика количественного определения объемов выбросов парниковых газов для каждого источника выбросов энергетических предприятий.

В части решения задач достижения углеродной нейтральности разработана Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем парниковых газов до 2050 года. Стратегия определяет сценарии (инерционный, целевой (интенсивный)), которые включают основные направления достижения развития экономики страны с низким уровнем парниковых газов (структурный сдвиг, поглощающую способность, снижение энергоемкости экономики). Определены эффекты от реализации различных сценариев, показатели массовых выбросов и поглощений парниковых газов до 2050 года. Следует отметить, что по данным Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов сектор энергетики является основным источником поступления парниковых газов в атмосферу [5, 6].

В работах [8 – 10] рассматриваются технологические мероприятия, направленные на снижение выбросов парниковых газов, которые предусматривают замену угольного топлива природным газом (при наличии технологической и/или экономической целесообразности), использование новых проектных решений конденсационных электростанций, характеризующихся относительно высоким коэффициентом по производству электрической энергии, а также широкое внедрение отечественных парогазовых технологий. Для вышеуказанных решений выполнено определение массовых и удельных выбросов парниковых газов в атмосферу с учетом технических характеристик ТЭС и котельных различных типов, в том числе оценено влияние компенсационных выплат (налога) на выбросы углекислого газа на изменение себестоимости производства тепловой и электрической энергии на ТЭС, тарифа на потребляемые энергетические ресурсы. В ходе исследования установлено, что по некоторым данным, к парниковым газам, образующимся на ТЭС или котельных при сжигании органического топлива, являются водяные пары. В этой связи важным является вопрос определения массовых и удельных выбросов углекислого газа и водяных паров для наиболее распространенных типов углей, используемых в отечественной теплоэнергетике на ТЭС.

Результаты анализа показывают, что наиболее перспективным и относительно малозатратным мероприятием для снижения массовых выбросов парниковых газов в атмосферу является вариант перевода котлов, сжигающих уголь на природный газ. Такой вариант позволит сократить валовые выбросы углекислого газа в атмосферу примерно на 40-50%, что в абсолютном значении составит порядка 60-70 млн. тонн. Кроме того, рассмотрены технологии сжигания природного газа совместно с водородом, а также вариант полного перевода котельных установок на использование в качестве топлива водорода. При этом учет влияния теплоты сгорания водорода, изменение состава продуктов сгорания и нормальной скорости распространения пламени, которая характеризует физико-химические свойства топлива будет оказывать значительное влияние на характеристики теплообмена на поверхностях нагрева котла, что потребует внесения конструктивных и

технических изменений в типовые проектные решения отечественных котельных установок вследствие снижения их показателей тепловой экономичности. Разработанные в настоящее время технологии получения водорода являются высокочрезвычайно затратными, что не позволяет обеспечить его безопасное крупномасштабное производство и, главное, сделать этот процесс производства экономически рентабельным [8].

В работе [11] рассматриваются различные сценарии достижения углеродной нейтральности национальной экономики России посредством применения экстраполяционного подхода к развитию ситуаций роста выбросов парниковых газов и сравнения с данными углеродоемкости ведущих мировых стран. Результаты исследования показали, что полное поглощение парниковых газов биосферой (лесами) в настоящее время практически невозможно. Сравнительные варианты изменения динамики выбросов парниковых газов показывают, что для достижения климатической нейтральности к 2060 году в оптимистичном варианте необходимо обеспечить темп снижения удельных выбросов парниковых газов в атмосферу на уровне 1%/год. Наиболее реальный сценарий достижения климатической нейтральности и перспектив снижения углеродоемкости является вариант, характеризующийся темпом уменьшения массовой эмиссии парниковых газов 0,5%/год при умеренной поглощающей способности лесов за счет выполнения проектов по восполнению лесов и условия создания национальных проектов и решений, обеспечивающих широкомасштабное улавливание и захоронение углерода.

В [12] выполнен анализ технических и технологических решений для снижения выбросов парниковых газов в атмосферу в России и обеспечения климатической нейтральности. Отмечено, что на оценку эмиссии парниковых газов значительное влияние оказывает разброс значений выбросов метана при лесных пожарах. При этом практически не реализуются технологические проекты по созданию установок и систем, позволяющих улавливать метан в больших объемах. Кроме того, следует отметить, что отсутствия совершенной системы пользования лесом и масштабное возникновение лесных пожаров препятствуют выполнению национальных обязательств по ограничению выбросов в атмосферу парниковых газов. Разработка регулируемых государственных подходов в этой части могла способствовать рациональному потреблению энергетических ресурсов, в том числе за счет применения технологий улавливания и утилизации сопутствующих и свалочных газов.

В работе [13] представлен анализ решений, предложенных в результате проведения конференции по изменениям климата в 2021 году, основанных на снижении углеродного следа наиболее энергоемких отраслей мировой экономики, восстановлении лесных массивов, сокращении глобальных выбросов метана, а также ряде вариантов развития мировой энергетики с учетом темпов роста численности населения Земли. На основе расчетных моделей глобального углеродного цикла НИУ МЭИ выполнены оценки ряда сценариев изменения глобального климата с учетом темпов роста населения планеты и потребления энергетических ресурсов. Результаты анализа показали, что выполнения всех предложенных мер в рамках проведения конференции по изменениям климата позволит обеспечить темпы потепления на уровне 1,5 °C при нынешних темпах роста населения планеты и потребления энергетических ресурсов. Следует заметить, что наиболее сложным вопросом является обеспечение декарбонизации наиболее энергоемких отраслей мировой экономики и последовательного достижения ими полной углеродной нейтральности. Оценки показали, что сохранение прежних темпов роста населения планеты может обеспечить безопасный темп роста температуры в пределах 1,8 °C, тем самым, не затрагивая проблему глобальной перестройки всей мировой энергетической инфраструктуры. В ходе расчетов установлено, что в настоящее время темп роста температуры соответствует сценарию, характеризующему предельное значение, равное 2,3 °C, однако, при реализации имеющихся инструментов декарбонизации мировой экономики возможно его ограничение до уровня 2 °C.

Широкое использование новых принципов государственного регулирования негативного влияния объектов теплоэнергетики на окружающую среду на основе технологического нормирования выбросов может быть реализовано с применением инфраструктуры стандартизации парниковых газов, как это показано в работе [14]. Таким образом, для практической реализации данного проекта необходима разработка и внедрение организационных и режимно-технологических мероприятий, основанных на принципах наилучших доступных технологий, на энергетических предприятиях с учетом особенностей технологического процесса, установленного энергетического оборудования и вида используемого топлива. В этой связи рассматриваются различные пути

совершенствования разработанной инфраструктуры для эффективного управления и регулирования выбросов парниковых газов в атмосферу.

Следует отметить, что технологические показатели выбросов, предложенные в ИТС 38-2017 не были утверждены, в 2022 году разработан и введен в действие актуализированный ИТС 38-2022, предусматривающий новые технологические нормативы [1 – 3].

В соответствии с ИТС 38-2022, утвержденные технологические показатели выбросов маркерных веществ, для топливосжигающих установок тепловой мощностью 50 МВт и более, вступили в силу с 01.09.2023 года. Поэтому энергетические предприятия и ТЭС I категории до 31.12.2024 года должны подготовить и направить заявку на получение комплексного экологического разрешения (КЭР). Следует отметить, в соответствии с новыми требованиями при подаче заявки на получение КЭР для таких топливосжигающих установок необходимо разрабатывать ППЭЭ [2, 3].

Необходимо отметить, что основное оборудование действующих ТЭС разделено на 3 возрастные группы в соответствии со сроком ввода в эксплуатацию (первая группа (старое оборудование) – до 31.12.2000, вторая группа – в период с 01.01.2001 по 31.12.2025, третья группа – начиная с 01.01.2026). Таким образом, основные проблемы адаптации оборудования реальных ТЭС к технологическим показателям выбросов согласно ИТС 38-2022 связаны с тем, что загрязняющие атмосферу выбросы большей части топливосжигающих установок, эксплуатация которых начата до 31.12.2000, не соответствуют новым актуализированным требованиям технологических показателей, значения которых более ужесточены по сравнению с ИТС 38-2017 [2].

В этой связи целью работы является анализ законодательной базы, нормативно-технических документов и методических подходов к установлению норм и оценке технологических показателей выбросов парниковых газов в атмосферу для котельных установок, сжигающих органическое топливо.

Научная новизна выполненных исследований заключается в том, что для наиболее распространенных для использования на российских ТЭС и котельных типов каменных, бурых углей и антрацита (всего 80 типов) рассчитаны массовые и удельные выбросы углекислого газа в пересчете на тонну натурального (т CO<sub>2</sub>/т.н.т.) и условного топлива (т CO<sub>2</sub>/т.у.т.).

Теоретическая значимость исследований заключается в том, что полученные результаты расчета массовых и удельных выбросов углекислого газа и водяных паров с учетом их состава и низшей теплоты сгорания топлива, входной тепловой мощности (50 МВт и более) и показателей тепловой экономичности ТЭС и котельных различного типа могут быть использованы как исходные данные при проведении бенчмаркинга и установлении индикативных показателей выбросов парниковых газов при разработке и актуализации отраслевых информационно-технических справочников.

Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности их использования на ТЭС и котельных при обосновании технологических показателей выбросов парниковых газов в атмосферу.

Результаты исследования могут быть использованы энергетическими предприятиями для обоснования участия в государственном эксперименте по квотированию выбросов и разработке ППЭЭ, подготовке углеродной отчетности ТЭС.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

В рамках актуализации ИТС, основанных на принципах НДТ, отраслевой бенчмаркинг способствует определению технологических показателей выбросов парниковых газов в атмосферу, которые должны быть установлены для реализации стратегии экологического развития, позволяющей обеспечить функционирование основных отраслей экономики с низким уровнем выбросов парниковых газов с учетом мировых климатических изменений для постепенного перехода к полной углеродной нейтральности. При этом применение удельных показателей углеродоемкости (бенчмарков) широко используется для оценки экологической безопасности процесса производства тепловой и электрической энергии, так как углеродоемкость определяет величину углеродного следа посредством учета косвенных выбросов парниковых газов в наиболее развитых энергоёмких отраслях экономики, потребляющих производимую энергию ТЭС и электростанций других типов, которые образуют прямые выбросы парниковых газов [5, 15].

В соответствии с ФЗ №296 от 02.07.2021 года установлены нормативы предельно допустимых выбросов и требования по реализации климатических проектов в России, в соответствии с которыми будет происходить регулирование выбросов парниковых газов, в том числе за счет технологического сокращения выбросов или увеличения их поглощения

различными экосистемами [2].

Согласно Приказа Минприроды России № 371 от 27.05.2022 года для реализации основных задач ФЗ №296 от 02.07.2021 года установлены методические требования к количественному определению объемов выбросов парниковых газов для каждого источника выбросов. Для количественного определения рассматриваются методы, основанные на данных о деятельности и коэффициентов выбросов, материально-сырьевого баланса, периодических измерений и непрерывном (круглосуточном) мониторинге выбросов парниковых газов.

Расчеты выбросов углекислого газа в атмосферу при работе котельных установок тепловых электрических станций, использующих в качестве топлива уголь и природный газ (варианты), в работе выполнены в соответствии с балансовыми соотношениями, приведенными в РД 153-34.0-02.318-2001, и с учетом методических требований Приказа Минприроды России № 371 от 27.05.2022 года [15]. В этой связи в работе определен перечень наиболее распространенных для использования на ТЭС типов каменных, бурых углей и антрацита (всего 80 типов). С учетом состава и низшей теплоты сгорания топлива, входной тепловой мощности (50 МВт и более) и показателей тепловой экономичности ТЭС различного типа рассчитаны массовые и удельные выбросы углекислого газа в пересчете на тонну натурального (т CO<sub>2</sub>/т.н.т.) и условного топлива (т CO<sub>2</sub>/т.у.т.) (по тепловому эквиваленту 29,3 МДж/кг) с учетом рекомендаций [15]. Расчеты удельных выбросов парниковых газов при сжигании мазута в работе не проводились вследствие того, что доля мазута в топливном балансе российских ТЭС составляет порядка 2 %. Полученные результаты расчетов могут найти применение при обосновании решения для стимулирования российских ТЭС и котельных в части внедрения технологических мер, способствующих снижению выбросов парниковых газов в атмосферу, в том числе постепенному переходу к полной углеродной нейтральности процесса производства энергии [16 – 19].

#### **Обсуждение (Discussions)**

Важно отметить, что перевод котельных установок на сжигание водородного топлива в настоящее время невозможен вследствие полного отсутствия или только частичного решения технических задач, которые позволяют безопасного получения, хранения, транспортировки, использования водорода, несмотря на то, что это обеспечит переход на полную углеродную нейтральность топочного процесса. Анализ современных способов сжигания топлива показывает, что в настоящее время существуют технологии добавки водорода к природному газу в объемной доле до 50%. Однако, при сжигании водородного топлива несколько увеличиваются выбросы в атмосферу водяных паров, которые, как было отмечено ранее, по некоторым данным, также является парниковым газом. При этом следует заметить, что вред от выбросов водяного пара в атмосферу значительно меньше, чем от выбросов, образующихся при сжигании органического топлива. Поэтому при использовании в качестве топлива в котельных установках водорода или водородсодержащих газов (в зависимости от варианта реализации технологий сжигания) необходимо разрабатывать и применять технические решения, способствующие снижению выбросов водяных паров в атмосферу [8].

Таким образом, на основе проведенных аналитических исследований показано, что в настоящее время существует ряд организационных и технологических сложностей, затрудняющих переход к полной углеродной нейтральности производства тепловой и электрической энергии. В этой связи значительно усложняется реализация требований ФЗ №195 от 26.07.2019 года в части разработки совершенных экономических и финансовых механизмов стимулирования внедрения технологических мер, способствующих снижению выбросов парниковых газов в атмосферу [2, 4].

На рисунке 1 представлены результаты расчета удельных выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании каменного угля (варианты) в котельных установках ТЭС.

Результаты расчета удельных выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании угля (варианты) в котельных установках ТЭС представлены на рисунке 2. Выполненные оценки в пересчете на натуральное топливо показывают, что при сжигании бурых углей удельные выбросы углекислого газа соответствуют диапазону 0,926 – 2,006 т CO<sub>2</sub>/т.н.т., при использовании каменных углей находятся в пределах 1,357 – 2,464 т CO<sub>2</sub>/т.н.т. При пересчете соответствующих показателей удельных выбросов на условное топливо для варианта применения бурых углей составляют 2,785 – 3,420 т CO<sub>2</sub>/т.у.т., при сжигании каменных углей равны 2,391 – 2,878 т CO<sub>2</sub>/т.у.т.

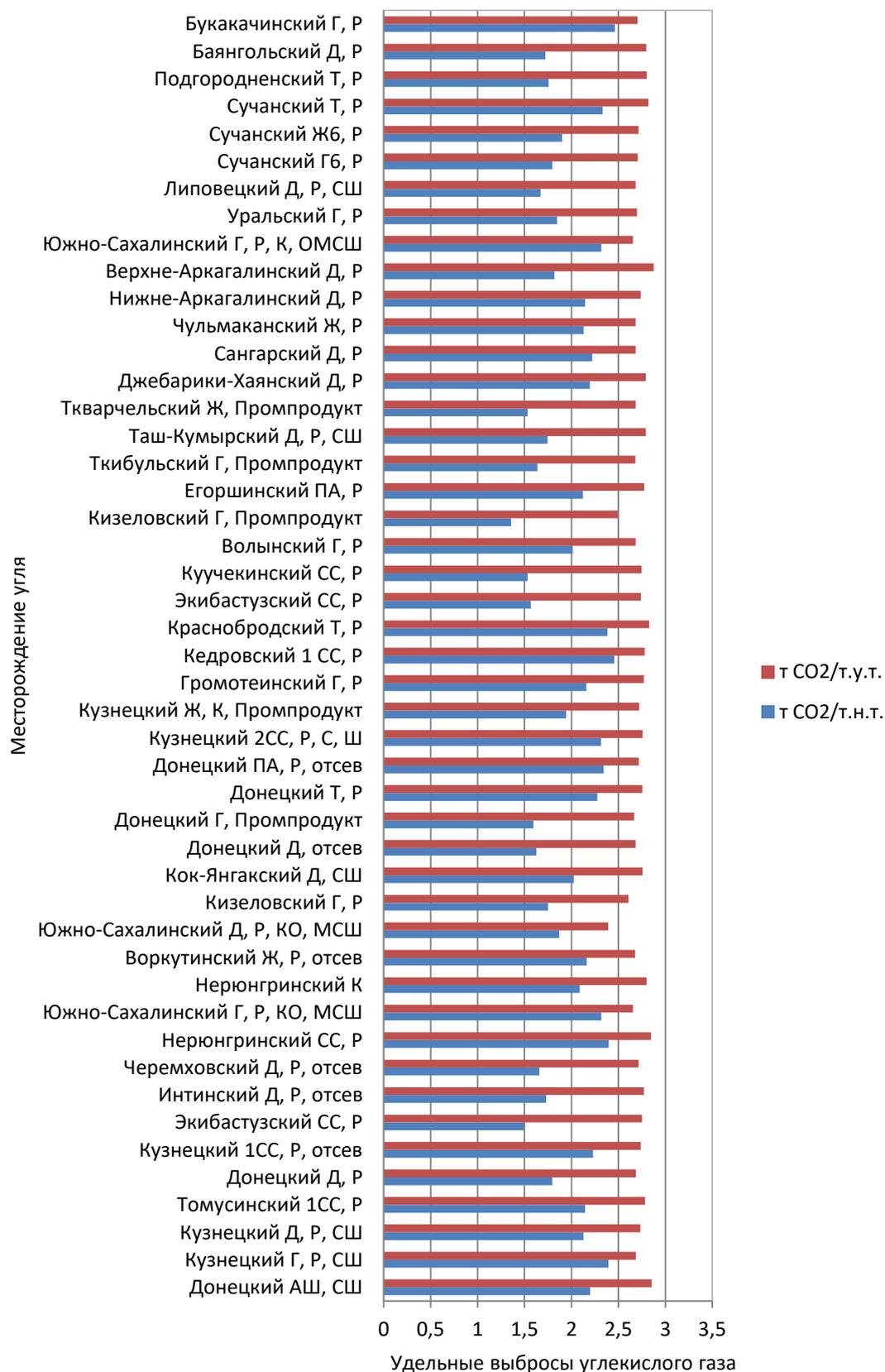


Рис. 1. Удельные выбросы углекислого газа (в пересчете на натуральное и условное топливо) при сжигании различных марок каменного угля

Fig. 1. Specific carbon dioxide emissions (in terms of natural and conventional fuels) during the combustion of various grades of coal

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке2 представлены результаты расчета удельных выбросов углекислого газа (в пересчете на натуральное и условное топливо) при сжигании различных марок бурого угля в котлах ТЭС.

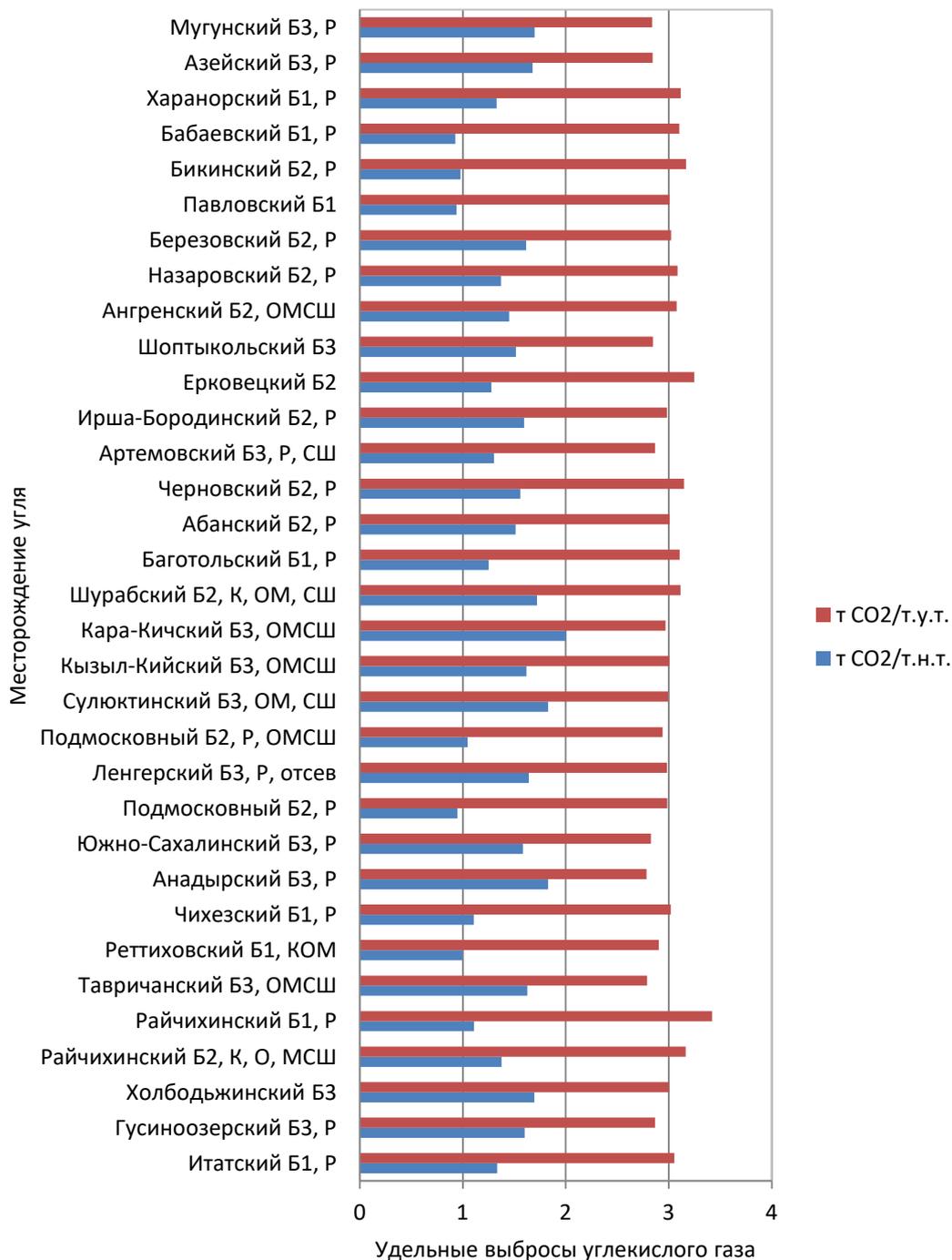


Рис. 2. Удельные выбросы углекислого газа (в пересчете на натуральное и условное топливо) при сжигании различных марок бурого угля  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке3 представлены расчетные данные по удельным выбросам водяных паров (в пересчете на натуральное и условное топливо) и их эквивалент CO<sub>2</sub> при сжигании различных марок каменного угля.

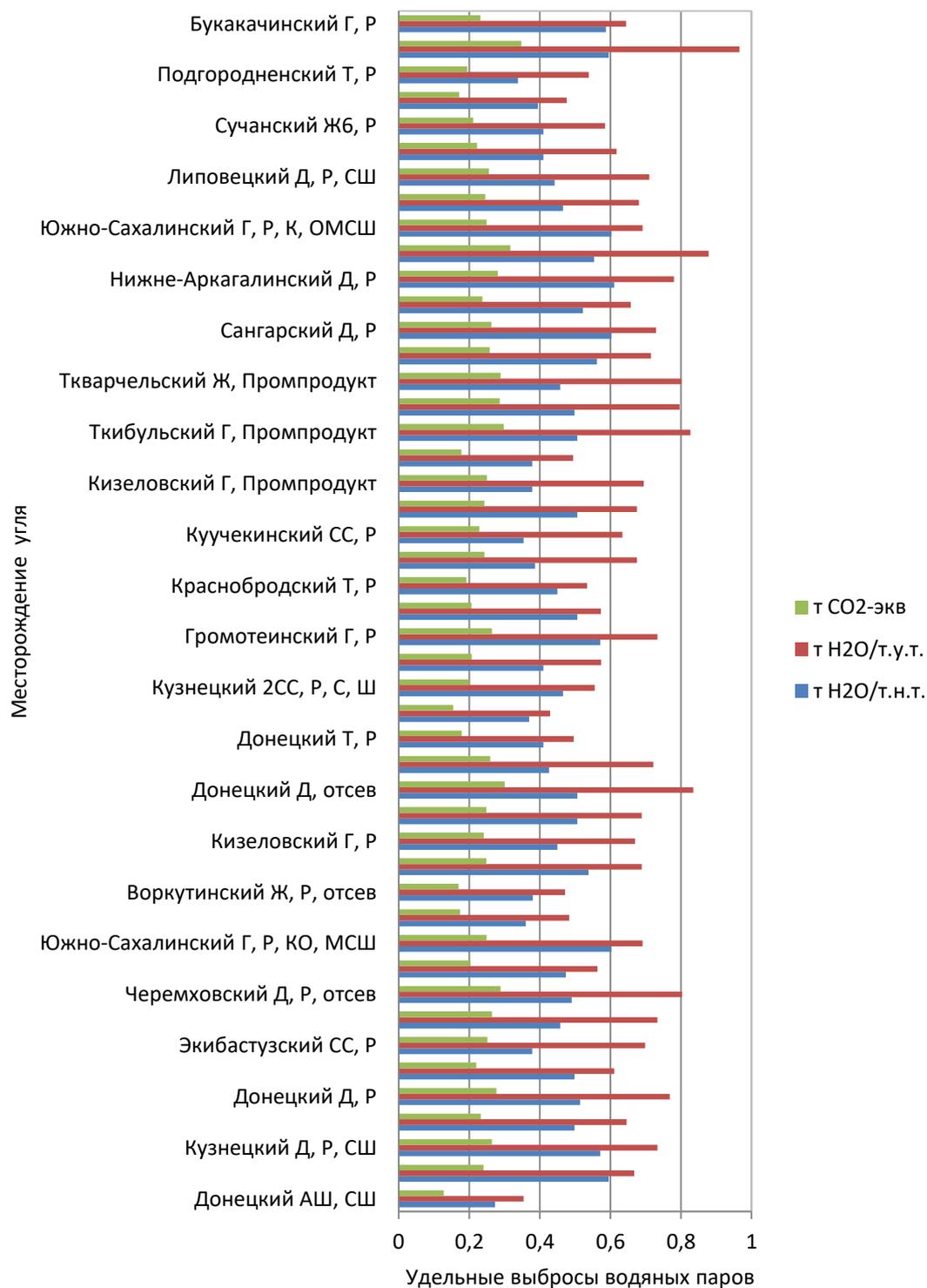


Рис. 3. Удельные выбросы водяных паров (в пересчете на натуральное и условное топливо) и эквивалент CO<sub>2</sub> при сжигании различных марок каменного угля

Fig. 3. Specific emissions of water vapor (in terms of natural and conventional fuels) and the CO<sub>2</sub> equivalent in the combustion of various grades of coal

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 4 представлены расчетные оценки удельных выбросов водяных паров (в пересчете на натуральное и условное топливо) и эквивалент CO<sub>2</sub>, соответствующий значениям t H<sub>2</sub>O/t.u.t., при сжигании различных марок бурого угля.

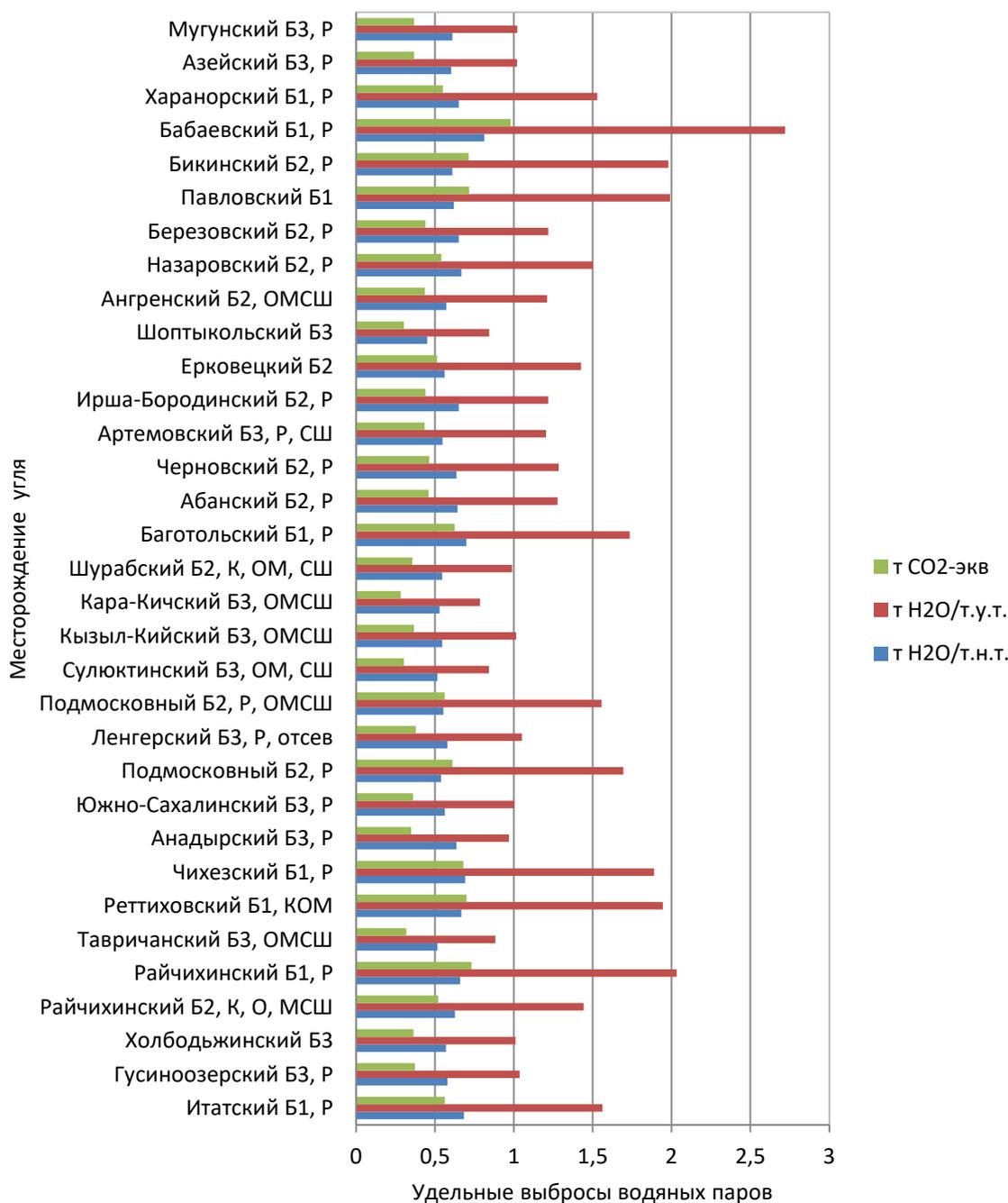


Рис. 4. Удельные выбросы водяных паров (в пересчете на натуральное и условное топливо) и эквивалент CO<sub>2</sub> при сжигании различных марок бурого угля

Fig. 4. Specific emissions of water vapor (in terms of natural and conventional fuels) and CO<sub>2</sub> equivalent during combustion of various grades of brown coal

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты расчетного определения удельных выбросов водяных паров H<sub>2</sub>O и соответствующего эквивалента CO<sub>2</sub> при сжигании угля (варианты) в котельных установках ТЭС представлены на рисунках 3-4. Выполненные оценки, в пересчете на натуральное топливо показывают, что при сжигании бурых углей удельные выбросы водяных паров соответствуют диапазону 0,514 – 0,812 т H<sub>2</sub>O/т.н.т., при использовании каменных углей находятся в пределах 0,273 – 0,611 т H<sub>2</sub>O/т.н.т. При пересчете соответствующих показателей удельных выбросов на условное топливо для варианта применения бурых углей составляют 0,784 – 2,719 т H<sub>2</sub>O/т.у.т., при сжигании каменных углей равны 0,354 – 0,966 т H<sub>2</sub>O/т.у.т. Следует отметить, что показатели удельных выбросов углекислого газа и водяных паров определены на основе балансовых зависимостей без учета конкретного способа сжигания топлива.

Для комплексной оценки парникового эффекта выполнено расчетное определение эквивалента углекислого газа CO<sub>2</sub>-эkv, соответствующего удельным выбросам водяных паров при сжигании конкретных типов каменных и бурых углей, как это показано на рисунках 3 и 4. Расчеты показывают, что эквивалентный вклад водяных паров в суммарные удельные выбросы парниковых газов при использовании каменных углей составляют 0,127 – 0,348 т CO<sub>2</sub>-эkv, в случае сжигания бурых углей соответствует значениям 0,282 – 0,979 т CO<sub>2</sub>-эkv. Таким образом, полученные результаты могут быть применены на энергетических предприятиях и ТЭС при обосновании технологических показателей выбросов парниковых газов в атмосферу. Следует отметить, учет эквивалентного вклада водяных паров при определении суммарных выбросов парниковых газов позволяет комплексно оценивать влияние энергетических предприятий на окружающую среду.

#### **Заключение (Conclusions)**

Выполнен анализ законодательной базы и нормативно-технических документов, регламентирующих необходимость снижения выбросов парниковых газов в атмосферу при сжигании топлива в котлах ТЭС и котельных с целью декарбонизации и постепенного перехода отраслей экономики к углеродной нейтральности посредством сокращения прямых и косвенных выбросов углекислого газа.

Расчетным путем оценены массовые и удельные выбросы парниковых газов (в пересчете на натуральное и условное топливо) в атмосферу при сжигании антрацита, каменного и бурого угля и различных марок в котлах ТЭС, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду.

Определены удельные выбросы водяных паров и их эквивалент CO<sub>2</sub> при сжигании каменного, бурого угля и антрацита, отличающиеся от известных тем, что учитывается вклад водяных паров в суммарные выбросы парниковых газов (CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O) при использовании на российских ТЭС углей различных марок (всего 80 типов). Показано, что при сжигании бурых углей удельный эквивалентный вклад водяных паров составляет 4,5 – 10,2 %, при использовании каменных углей находится в диапазоне 11,8 – 34,3 %.

Полученные в результате исследования результаты могут быть использованы энергетическим и предприятиями для установления технологических показателей выбросов парниковых газов в атмосферу котельных установок на этапе сбора экологической информации, при обосновании участия в государственном эксперименте по квотированию выбросов и разработки ППЭЭ, подготовке углеродной отчетности ТЭС.

#### **Литература**

1. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Дмитренко В.В., и др. Особенности актуализированного информационно-технического справочника ИТС 38-2022 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Электрические станции. 2022. № 12 (1097). С. 42 – 50.
2. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Гусева Т.В. Проблемы адаптации действующего оборудования ТЭС к технологическим показателям выбросов ИТС 38-2022 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Теплоэнергетика. 2023. № 10. С. 115 – 123.
3. Власенко С.А., Росляков П.В., Сердюков В.А. Методические подходы к определению технологических показателей наилучших доступных технологий при актуализации информационно-технического справочника ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 55. С. 31 – 39.
4. Росляков П. В., Черкасский Е. В., Гусева Т. В., и др. Технологическое нормирование объектов теплоэлектроэнергетики: наилучшие доступные технологии и нормы общего действия // Теплоэнергетика. 2021. № 10. С. 1 – 13.
5. Росляков П.В., Рыбаков Б.А., Савитенко М.А., и др. Оценки возможностей снижения выбросов парниковых газов при сжигании топлив в котлах ТЭС и котельных // Теплоэнергетика. 2022. № 9. С. 97– 106.
6. Росляков П.В., Гуреев А.Н., Гусева Т.В., и др. Индикативные показатели выбросов парниковых газов при сжигании топлива на ТЭС и в котельных // Энергетик. 2023. № 5. С. 40 – 48.
7. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., и др. Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Том 22. № 1. С. 3– 9.

8. Зверева Э.Р., Макарова А.О., Бахтиярова Ю.В., и др. Вторичное использование малосернистых нефтяных остатков в качестве основы для котельного и судового топлива // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Том 24. №1. С. 16– 28.
9. Кудряшов А.Н., Коваль Т.В., Ижганайтис М.И. Опыт сжигания композиционного топлива на основе угольного шлама на ТЭЦ Иркутской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Том 23. №1. С. 33– 45.
10. Иваницкий М.С. Прогнозирование затрат угольных электростанций на компенсации за выбросы углекислого газа в атмосферу // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. №5. С. 9 – 13.
11. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. На пути к климатической нейтральности: выстоит ли русский лес против энергетики? // Теплоэнергетика. 2024. № 1. С. 5– 20.
12. Клименко А.В., Терешин А.Г., Прун О.Е. Перспективы России в снижении выбросов парниковых газов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2023. № 2. С. 3– 15.
13. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Борьба за спасение климата: эйфория от планов против холодной реальности // Теплоэнергетика. 2023. № 3. С. 5– 19.
14. Зажигалкин А.В., Доброхотова М.В., Черкасская С.В. Парниковые газы и наилучшие доступные технологии. Инфраструктура стандартизации // Стандарты и качество. 2023. № 5. С. 44 – 48.
15. Иваницкий М.С. Технологическое нормирование выбросов ТЭС в атмосферу // Энергобезопасность и энергосбережение. 2022. № 1. С. 5 – 9.
16. Ponkratov V.V., Kuznetsov A.S., Muda I., et al. Investigating the index of sustainable development and reduction in greenhouse gases of renewable energies // Sustainability. 2022. V. 14. № 22. pp. 14829.
17. Wang Q., Xiong H., Ming T. Methods of large-scale capture and removal of atmospheric greenhouse gases // Energies. 2022. V. 15. № 18. pp. 6560.
18. Lin J., Khanna N., Liu Xu., et al. Opportunities to tackle short-lived climate pollutants and other greenhouse gases for China // Science of the Total Environment. 2022. V. 842. pp. 156842.
19. Kulmala M., Kokkonen T., Ezhova E., et al. Aerosols, clusters, greenhouse gases, trace gases and boundary-layer dynamics: on feedbacks and interactions // Boundary-Layer Meteorology. 2023. V. 186. № 3. pp. 475-503.

#### Автор публикации

**Иваницкий Максим Сергеевич** – докт. техн. наук, профессор кафедры Энергетики филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: [mseiv@yandex.ru](mailto:mseiv@yandex.ru).

#### References

1. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Dmitrenko VV, et al. Osobennosti aktualizirovannogo informatsionno-tekhnicheskogo spravochnika ITS 38-2022 «Szhiganiye toplivanakrupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii». *Elektricheskie stantsii*. 2022;12 (1097):42-50.
2. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Guseva TV. Problemy adaptatsii deistvuyushchego oborudovaniya TES k tekhnologicheskim pokazatelyam vybrosov ITS 38-2022 «Szhiganiye toplivanakrupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii». *Teploenergetika*. 2023;10:115-123.
3. Vlasenko SA, Roslyakov PV, Serdyukov VA. Metodicheskie podkhody k predeleniyu tekhnologicheskikh pokazateley i nailuchshikh dostupnykh tekhnologiy pri aktualizatsii informatsionno-tekhnicheskogo spravochnika ITS 38-2017 «Szhiganiye toplivanakrupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii». *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*. 2022;55:31-39.
4. Roslyakov PV, Cherkasskii EV, Guseva TV, et al. Tekhnologicheskoe normirovaniye ob"ektov teploelektroenergetiki: nailuchshie dostupnyye tekhnologii i normy obshchego deistviya. *Teploenergetika*. 2021;10:1-13.

5. Roslyakov PV, Rybakov BA, Savitenko MA, et al. Otsenkivozmozhnosteisnizheniyavybrosovparnikovyykhgazovpriszhiganiitopliv v kotlakh TES i kotel'nykh // *Teploenergetika*. 2022;9:97-106.
6. Roslyakov PV, Gureev AN, Guseva TV, et al. Indikativnyepokazatelivybrosovparnikovyykhgazovpriszhiganiitoplivana TES i v kotel'nykh // *Energetik*. 2023;5:40-48.
7. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, et al. Ochistkagazovyykhvybrosovkotel'nykhustanovokottverdykhchastits. *Izvestiyavysshikhkhuhebnyykhzavedenii. Problemyenergetiki*. 2020;22(1):3-9.
8. ZverevaER, MakarovaAO, BakhtiyarovaYuV, et al. Vtorichnoeispol'zovaniemaloseristykhneftyanykhostatkov v kachestveosnovdyakotel'nogo i sudovogotopliva. *Izvestiyavysshikhkhuhebnyykhzavedenii. Problemyenergetiki*. 2022;24(1):16-28.
9. KudryashovAN, KovalTV, IzhganaitisMI. Opytzhiganiyakompozitsionnogotoplivanaosnoveugol'nogoshlamana TETs Irkutskoioblasti. *Izvestiyavysshikhkhuhebnyykhzavedenii. Problemyenergetiki*. 2021;23(1):33-45.
10. Ivanitskii MS. Prognozirovaniezatrategol'nykhelektrostantsiinakompensatsiizavybrosoyuglekislogaza v atmosferu // *Energobezopasnost' i energoberezhenie*. 2016;5:9-13.
11. Klimenko VV, Klimenko AV, Tereshin AG. Na puti k klimaticheskoinetral'nosti: vystoit li russkii les protivenergetiki? *Teploenergetika*. 2024;1:5-20.
12. Klimenko AV, Tereshin AG, Prun OE. PerspektivyRossii v snizheniiivybrosovparnikovyykhgazov. *IzvestiyaRossiiskoiakademiinauk. Energetika*. 2023;2:3-15.
13. Klimenko VV, Klimenko AV, Tereshin AG, Mikushina O.V. Bor'bazaspaseniieklimata: eiforiyaotplanovprotivkholodnoireal'nosti. *Teploenergetika*. 2023;3:5-19.
14. Zazhigalkin AV, Dobrokhotova MV, Cherkasskaya SV. Parnikovyegazy i nailuchshiedostupnyetekhnologii. Infrastrukturastandardizatsii. *Standarty i kachestvo*. 2023;5:44-48.
15. Ivanitskii MS. Tekhnologicheskoenormirovanieivybrosov TES v atmosferu // *Energobezopasnost' i energoberezhenie*. 2022;1:5-9.
16. Ponkratov VV, Kuznetsov AS, Muda I, et al. Investigating the index of sustainable development and reduction in greenhouse gases of renewable energies // *Sustainability*. 2022; 14(22):14829.
17. Wang Q, Xiong H, Ming T. Methods of large-scale capture and removal of atmospheric greenhouse gases // *Energies*. 2022;15(18):6560.
18. Lin J, Khanna N, Liu Xu, et al. Opportunities to tackle short-lived climate pollutants and other greenhouse gases for China // *Science of the Total Environment*. 2022;842:156842.
19. Kulmala M, Kokkonen T, Ezhova E, et al. Aerosols, clusters, greenhouse gases, trace gases and boundary-layer dynamics: on feedbacks and interactions // *Boundary-Layer Meteorology*. 2023;186(3):475-503.

#### Author of the publication

**Maxim Sergeevich Ivanitskiy** – Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI).

*Шифр научной специальности: 2.10.2. Экологическая безопасность (технические науки)*

*Смежные специальности в рамках группы научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки); 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)*

**Получено** 09.03.2024 г.

**Отредактировано** 03.05.2024 г.

**Принято** 16.05.2024 г.

# МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.315.1

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-3-16-32

## СПОСОБЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ АППАРАТУРЫ ЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА К ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Минуллин Р.Г., Гранская А.А., Абдуллазянов Э.Ю., Ахметова И.Г., Мустафин Р.Г., Касимов В.А.

Казанский государственный энергетический университет  
г. Казань, Россия  
minullin@mail.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ* исследования заключается в расширении технических возможностей локационного мониторинга воздушных линий электропередачи путем разработки способа подключения к ним локационной аппаратуры при отсутствии стандартной высокочастотной обработки линий.

**ЦЕЛЬ.** Рассмотреть проблемы подключения аппаратуры локационного мониторинга к грозотросу воздушной линии электропередачи для ввода зондирующего импульсного сигнала в высокочастотный тракт линий электропередачи, обеспечивая при этом условия электробезопасности системы. Провести сравнение эффективности работы локационного мониторинга при стандартном подключении локатора к фазному проводу через высокочастотную обработку линии и при подключении к грозотросу линии. Выполнить исследования условий локационного мониторинга линий электропередачи в различных режимах заземления грозотроса. Исследовать возможность работы локатора через грозотрос для обнаружения повреждений на линии, наблюдая сигнал, отраженный от места повреждения.

**МЕТОДЫ.** Поставленные задачи решались путем моделирования. Использовалась имитационная модель стандартной высокочастотной обработки воздушных линий электропередачи напряжением 35–750 кВ в программной среде PSCAD, в которой имеется возможность подключать аппаратуру локационного мониторинга к фазным проводам и к грозотросу. Это позволяет изучать распространение импульсных сигналов локатора по проводам и грозотросу линий электропередачи, наблюдая при этом взаимонаведенные сигналы на всех фазных проводах и на грозотросе.

**РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье обоснована актуальность темы, рассмотрены особенности влияния различных режимов заземления грозотроса на эффективность локационного мониторинга линии. Произведено сравнение экспериментальных сигналов локационного мониторинга линий электропередачи при стандартном подключении локатора к фазному проводу через высокочастотную обработку линии с сигналами имитационной модели при подключении локатора к фазным проводам и к грозотросу.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Внедрение технологии локационного мониторинга линий электропередачи с использованием грозотроса повысит надежность подстанций России и подстанций стран ближнего зарубежья. При этом за счет дополнительной организации локационного мониторинга на линиях электропередачи, не имеющих высокочастотной обработки, количество контролируемых подстанций будет значительно увеличено. Подстанции будут оснащены современной диагностической аппаратурой, не имеющей аналогов в мировой практике, в виде интеллектуальной локационной системы мониторинга линий электропередачи, повышающей бесперебойность их функционирования в экстремальных условиях, обеспечивая эффективное энерго-ресурсосбережение.

**Ключевые слова:** Воздушные линии электропередачи; локационный мониторинг линий; импульсное зондирование; высокочастотный тракт; локационный комплекс; подключение через грозотрос; электромагнитная связь; обнаружение места повреждения линии; обрыв провода; короткое замыкания провода.

**Для цитирования:** Минуллин Р.Г., Гранская А.А., Абдуллазянов Э.Ю., Ахметова И.Г., Мустафин Р.Г., Касимов В.А. Способы подключения аппаратуры локационного мониторинга к воздушным линиям электропередачи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 16-32. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-16-32.

## CONNECTING METHODS OF LOCATION MONITORING EQUIPMENT TO OVERHEAD POWER LINES

**Minullin R.G., Granskaya A.A., Abdullazyanov E.Yu., Akhmetova I.G., Mustafin R.G., Kasimov V.A.**

**Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**  
minullin@mail.ru

**Abstract:** *THE RELEVANCE of the research lies in expanding the technical capabilities of location monitoring of overhead power lines by developing a method for connecting location equipment to them in the absence of standard high-frequency processing of lines. TARGET. Consider the problems of connecting location monitoring equipment to the lightning arrester cable of overhead power lines to input a probing pulse signal and observe reflected signals, while ensuring the electrical safety conditions of the system. Compare the efficiency of location monitoring with a standard connection of the locator to a phase wire through high-frequency processing of the line and when connected to a line lightning arrester cable. Carry out a study of the conditions for location monitoring of power lines in various grounding modes of the lightning arrester cable. Investigate the possibility of operating a locator through a lightning arrester cable to detect faults on the line by observing the signal reflected from the fault location. METHODS. The assigned tasks were solved by modeling. A simulation model of standard high-frequency processing of overhead power lines with a voltage of 35–750 kV was used in the PSCAD software environment. The model has the ability to connect location monitoring equipment to phase wires and lightning arrester cable, and record signals both at the beginning and at the end of the power line. By exciting a pulse signal in one wire of the line, due to inductive coupling, the signals propagate along all phase wires and the lightning arrester cable. RESULTS. The article substantiates the relevance of the topic and examines the features of the influence of various grounding modes of the lightning arrester cable on the efficiency of location monitoring of the line. A comparison was made of the experimental signals of location monitoring of power lines, with a standard connection of the locator to a phase wire through high-frequency processing of the line, with the signals of a simulation model when connecting the locator to phase wires and to a lightning arrester cable. CONCLUSION. The introduction of technology for location monitoring of power lines using lightning arrester cable will increase the reliability of substations in Russia and substations in neighboring countries. At the same time, due to the additional organization of location monitoring on power lines that do not have high-frequency processing, the number of controlled substations will be significantly increased. The substations will be provided with modern diagnostic equipment, in the form of an intelligent location system for monitoring power lines, which increases the uninterrupted operation of their operation under normal and extreme operating conditions.*

**Keywords:** *Overhead power lines; location monitoring of lines; pulse sensing; high frequency path; location complex; connection via lightning arrester cable; electromagnetic communication; detection of line fault location; wire break; wire short circuit.*

**For citation:** Minullin R.G., Granskaya A.A., Abdullazyanov E.Yu., Akhmetova I.G., Mustafin R.G., Kasimov V.A. Connecting methods of location monitoring equipment to overhead power lines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (3): 16-32. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-16-32.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время во многих странах мира ведутся исследования и разработки по созданию интеллектуальных электрических сетей (*Smart Grid*), которые автоматически обнаруживают опасные участки сети и принимают меры для предотвращения аварий и снижения материальных потерь. Интеллектуальная сеть представляет собой самоуправляемую энергетическую систему с минимальным участием человека. Основной проблемой в таких случаях для принятия решений является достоверность информации о режимах работы энергосистемы. Для этого используются различные методы и приборы для определения типа и места возможной аварии [1].

Высоковольтные воздушные линии электропередачи (ЛЭП), имеющие большую протяженность, являются наименее надежными элементами энергосистемы. Основная часть повреждений линий – это короткие замыкания и обрывы проводов из-за природных, техногенных и антропогенных воздействий [2].

Значительная часть повреждений ЛЭП в виде обрывов проводов и поломки опор обусловлена гололедно-ветровыми воздействиями, они составляют для России около 20 % от общего количества повреждений [3].

Если гололедно-ветровые аварии имеют редкий, но массовый характер, то повреждения проводов ЛЭП происходят довольно часто. Затраты средств на определение места повреждения (ОМП) составляют значительную часть эксплуатационных издержек в электросетях и приносят огромные финансовые потери. ОМП является наиболее сложной и относительно длительной технологической операцией при восстановлении поврежденных участков сети [3].

В этой ситуации мониторинг состояния ЛЭП и предупредительные меры по предотвращению возможных аварий на воздушных линиях становятся весьма актуальными. Поэтому подстанции воздушных ЛЭП оснащаются системами их мониторинга, повышающими надежность ЛЭП и обеспечивающими бесперебойность энергоснабжения промышленных предприятий, а также населения.

Применяемые в настоящее время метод обнаружения повреждений проводов ЛЭП по параметрам аварийного режима (ПАР) и волновой метод являются сложными и не очень надежными методами контроля состояния проводов ЛЭП [4, 5].

Прекращение их функционирования из-за отключения сетевого напряжения во время аварии в течение 0,2 с не дает возможности осуществлять непрерывный мониторинг технического состояния ЛЭП, что крайне важно, особенно при аварийных случаях. Кроме того, если измерения методом ПАР или волновыми методами в течение 0,2 с до отключения сетевого напряжения системами релейной защиты оказались неудачными, то повторить эти измерения уже невозможно [6, 7].

Разрабатываемый в течение 28 лет в Казанском государственном энергетическом университете (КГЭУ) локационный метод мониторинга ЛЭП позволяет в настоящее время решить озвученные выше проблемы [8].

Локационный метод мониторинга обеспечивает надежный автоматический контроль состояния всех фазных проводов и грозозащитных тросов ЛЭП, отходящих с одной подстанции, при существовании рабочего напряжения на проводах линии и при его отсутствии благодаря наличию собственного генератора зондирующих импульсов [8, 9].

Метод обеспечивает оперативное обнаружение обрывов и всех видов коротких замыканий (КЗ) проводов с указанием расстояния до места повреждения и его вида. Обнаружение повреждений проводов ЛЭП определяется по появлению дополнительного отраженного импульса: с сохранением полярности при обрыве проводов и при изменении полярности при их коротком замыкании [10, 11].

Исследования и разработки многофункциональной системы локационного панорамно-визуального мониторинга состояния проводов воздушных ЛЭП, которые ведутся в КГЭУ, уникальны и не имеют аналогов в мире согласно информационному поиску глубиной в 50 лет.

### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Локационное зондирование заключается в подаче в линию импульсного сигнала и определении суммарного времени, затраченного на его распространение вдоль провода в прямом и обратном направлениях после отражения от конца линии или от места возникшего повреждения линии [8, 12, 13].

Метод локационного зондирования технически реализуется с помощью прибора, который называется рефлектометром, функциональная схема которого представлена на рисунке 1 [8, 14, 15].

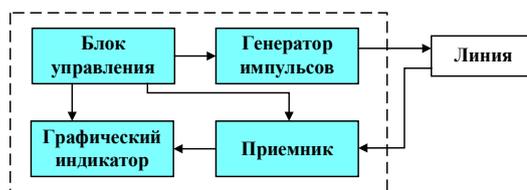


Рис. 1. Функциональная схема импульсного рефлектометра *Fig.1. Functional diagram of a pulse reflectometer*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Во время зондирования импульсы с генератора импульсов рефлектометра подаются в контролируемую линию. Отраженные импульсы поступают с линии в приемник. С выхода приемника преобразованные сигналы поступают на графический индикатор. Все блоки рефлектометра функционируют по сигналам блока управления [8].

На графическом индикаторе воспроизводится рефлектограмма линии – изображения отраженных импульсов на временной оси как реакция неоднородностей линии на зондирующий импульс. Локационный мониторинг ЛЭП позволяет в дистанционном режиме отслеживать (как бы «видеть») состояние контролируемых линий с рабочего места диспетчера без выезда на трассу за счет визуализации существующей ситуации на мониторе диспетчерского пункта [16, 17]. Осуществляется своеобразное «Дистанционное зрение».

Для локационного зондирования ЛЭП используется его высокочастотный тракт, предназначенный для передачи технологической информации в виде сигналов аппаратуры релейной защиты, телемеханики, противоаварийной автоматики и телефонии (аппаратура связи) [18].

Схема подключения локатора (локационного устройства) с аппаратурой связи (АС) к фазному проводу ЛЭП через фильтр присоединения (ФП) с конденсатором связи (КС) и состав оборудования высокочастотной (ВЧ) обработки тракта в виде высокочастотного заградителя (ВЗ) показаны на рисунке 2 [18].

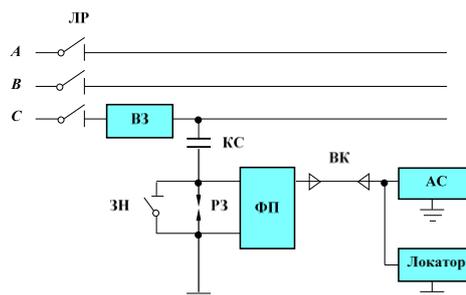


Рис. 2. Схема подключения аппаратуры связи и локационного устройства к проводам линии электропередачи по схеме «фаза-земля»: ЛР – линейный разъединитель; ВЗ – высокочастотный заградитель; КС – конденсатор связи; ЗН – заземляющий нож; РЗ – разрядник; ФП – фильтр присоединения; ВК – высокочастотный кабель; АС – аппаратура связи; локатор – локационное устройство; А, В, С – фазные провода ЛЭП

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Были выполнены локационные измерения на действующей ЛЭП «Рыбная Слобода – Камская» по обнаружению короткого замыкания проводов при подаче зондирующего импульса в линию через систему высокочастотной обработки.

Реализованная в настоящее время система локационного мониторинга ЛЭП с подключением локатора (рефлектометр РЕЙС-205) к линии «Рыбная Слобода – Камская» при использовании стандартной ВЧ обработки линии условно представлена на рисунке 3, а [8].

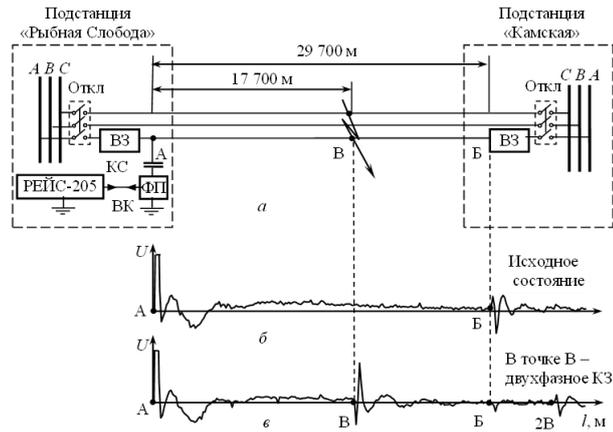


Рис. 3. Подключение рефлектометра к линии через ВЧ канал к проводу фазы А: а – схема линии с ВЧ обработкой; б – реальная рефлектограмма линии в исходном состоянии; в – реальная рефлектограмма линии при двухфазном КЗ на расстоянии 17 700 м

Fig.3. Connecting the reflectometer to the line through the HF channel to the wire of phase A: a – diagram of the line with HF processing; b – real reflectogram of the line in the initial state; c – real reflectogram of the line with two-phase short circuit at a distance of 17,700 m

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При этом зондирующий импульс рефлектометра подается через фильтр присоединения и конденсатор связи на провод фазы А и отражается в конце линии в точке В. Рефлектограмма, соответствующая этому случаю, показана на рис. 3, б.

Как видно на рис. 3, в, созданное повреждение линии в виде двухфазного замыкания проводов фаз А и С было обнаружено при локационном зондировании по отраженному импульсу на проводе фазы А на расстоянии 17 700 м в точке В, причем в точке 2В на расстоянии 35 400 м был виден импульс кратного отражения.

Сигнал, отраженный от места замыкания в точке В, был меньше исходного сигнала рефлектометра РЕЙС-205 на 40 дБ и надежно обнаруживался на рефлектограмме рис. 3, в.

Измерения выполнялись на действующей линии «Рыбная Слобода – Камская», поэтому провода линии на подстанциях были согласно требованиям правил техники безопасности отключены от сетевого напряжения с помощью линейных разъединителей (рис. 3, а).

Выполненные модельные исследования на ЛЭП 35 – 750 кВ [8] показывают, что чувствительность современных рефлектометров РЕЙС-405 [15] достаточна для обнаружения импульсов, отраженных от места повреждения проводов, на линиях длиной до 150 км при их затухании за счет расстояния и гололедных отложений до 100 дБ.

К сожалению, не все ЛЭП имеют ВЧ обработку. Ее отсутствие не позволяет организовать локационный мониторинг состояния проводов ЛЭП.

В связи с этим предлагается осуществлять локационные измерения на воздушных ЛЭП путем подключения локатора (рефлектометра) к грозозащитному тросу для ввода в провод ЛЭП зондирующего импульсного сигнала.

На воздушных ЛЭП 35–750 кВ основным назначением грозозащитных тросов является защита фазных проводов от прямых разрядов молнии, способных привести к перекрытию изоляции и возникновению коротких замыканий (КЗ).

Предлагаемый метод не является всеобъемлющим. Он может применяться в случае, если грозотросы используются для устройства каналов ВЧ связи или для плавки гололеда.

Согласно ПУЭ<sup>1</sup> «При использовании тросов для устройства каналов высокочастотной связи они изолируются от опор на всем протяжении каналов высокочастотной связи и заземляются на подстанциях и усилительных пунктах через высокочастотные заградители. Если на тросах ВЛ предусмотрена плавка гололеда, то изолированное крепление тросов выполняется по всему участку плавки. В одной точке участка плавки тросы заземляются с помощью специальных перемычек».

«Как видно, в случаях использования троса для ВЧ связи или плавки гололеда ПУЭ разрешают не делать заземление троса. При этом не говорится о каком-либо «ухудшении грозоупорности» самой ВЛ или концевых распределительных устройств (РУ), не требуется никаких мероприятий, которые позволили бы компенсировать «ухудшение грозоупорности» ВЛ или концевых РУ, например за счет установки дополнительных ограничителей перенапряжений (ОПН) на входе в РУ или на сборные шины РУ» [19].

<sup>1</sup> Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. п. 2.5.122. Утверждены Приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204.

Рассматриваемые в статье технические решения применяются для ВЧ трактов, выполненных по схеме «трос-земля» и «трос-трос», должны быть экономически обоснованы и используются для облегчения электромагнитной обстановки. При этом ЛЭП предполагают наличие проводящего грозозащитного троса, а на таких линиях не предусматривается прокладка волоконно-оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос.

Еще одним документом, в котором затронуты вопросы крепления грозозащитных тросов, является стандарт<sup>2</sup>, согласно которому необходимо выполнять следующее условие: «Проектирование подвеса оптического кабеля, встроенного в грозозащитный трос (ОКГТ) на ВЛ 110 кВ и выше должно проводиться с заземлением ОКГТ на каждой опоре. По требованию заказчика (либо эксплуатирующей организации) крепление ОКГТ может быть выполнено через изолятор и с заземлением через шунтирующий проводник. Возможно использование следующей схемы: в анкерном пролете на одной анкерной опоре с заземлением, на второй анкерной опоре и на всех промежуточных – с изолированным креплением ОКГТ и заземлением через искровые промежутки; при плавке гололеда на ЛЭП – с изолированным креплением ОКГТ».

Для проверки предложения о возможности использования грозотроса при зондировании ЛЭП было выполнено имитационное моделирование высокочастотного тракта воздушных линий электропередачи напряжением 35–750 кВ в программной среде PSCAD.

При этом в первую очередь было необходимо установить достаточность энергетики зондирующего импульса, наведенного с грозотроса в ВЧ тракт линии электропередачи, для его обнаружения современной измерительной аппаратурой после отражения от места повреждения провода линии и последующего электромагнитного наведения на грозотрос.

При моделировании ВЧ тракта ЛЭП были использованы следующие основные компоненты:

- резисторы, индуктивности, конденсаторы (вкладка Passive Elements);
- трансформаторы (вкладка Transformes);
- частотнозависимые кабельные линии электропередачи (вкладка Cables);
- генераторы сигналов (вкладка Sources);
- осциллографы (вкладка I/O devices).

В качестве имитационной модели был выбран ВЧ тракт, организованный по фазным проводам ЛЭП напряжением 110 кВ «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» с соответствующим грозотросом. На рис. 4 изображена модель этой линии в среде PSCAD.

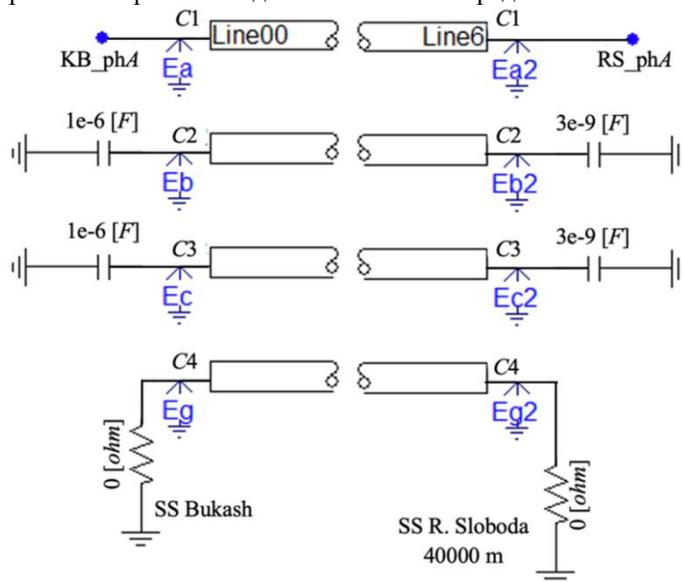


Рис. 4. Модель линии электропередачи «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» в среде PSCAD

Fig.4. Model of the power transmission line “Kutlu Bukash – Rybnaya Sloboda” in the PSCAD environment

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Схема высокочастотного тракта начинается с генератора прямоугольных видеоимпульсов и кончается «устройством присоединения», смоделированным нагрузкой величиной 75 Ом.

<sup>2</sup> СТО 56947007-33.180.10.172-2014. Технологическая связь. Правила проектирования, строительства и эксплуатации ВОЛС на воздушных линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше. М., 2014.

Модель линии электропередачи «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» в среде PSCAD содержит емкости  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  у проводов фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и емкость  $C4$  – у грозотроса, который заземлен на каждой анкерной опоре. К ВЧ кабелю в точках  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$ ,  $C4$  подключены виртуальные осциллографы  $Ea$ ,  $Eb$ ,  $Ec$ ,  $Eg$ , которые позволяют записывать зондирующий и отраженные сигналы с заданным временным шагом для построения рефлектограммы. Аналогично виртуальные осциллографы  $Ea2$ ,  $Eb2$ ,  $Ec2$ ,  $Eg2$  подключены в конце линии. Виртуальные осциллографы при моделировании позволяют выполнить «измерение» в любой точке электрической схемы. Точка  $KB\_phA$  является точкой подключения рефлектометра через ВЧ обработку. Точка  $RS\_phA$  является точкой подключения ВЧ обработки в конце линии.

Рефлектометр смоделирован в виде генератора импульсов (Range Comparator), который является стандартным компонентом из библиотеки компонентов PSCAD – однофазный источник (single phase sources). Данный генератор позволяет получать одиночный видеосигнал заданной длительности и амплитуды.

В нашем случае заданы следующие основные параметры генератора импульсов: время начала генерации импульса – 0 с; длительность импульса – 2 мкс; амплитуда импульса – 1 В; выходное сопротивление – 100 Ом.

Для упрощения модельных расчетов амплитуда генератора импульсов принята равной 1 В, так как в данном случае важны величины ослабления отраженных сигналов и их соотношения между собой. В реальных ситуациях выходные сигналы рефлектометров в условиях помех на проводах ЛЭП достигают 100 В, а усиление сигналов составляет 80 дБ.

Электрическая схема подключения рефлектометра через ВЧ кабель к устройству присоединения в среде PSCAD представлена на рис. 5.

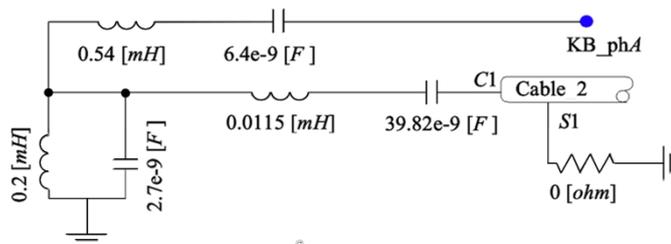


Рис. 5. Электрическая схема подключения ВЧ кабеля к фильтру присоединения в среде PSCAD Fig. 5. Electrical diagram for connecting the RF cable to the connection filter in the PSCAD environment

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Устройство присоединения, как было показано выше (рис. 2), состоит из высокочастотного кабеля, фильтра присоединения и конденсатора связи. Высокочастотный кабель РК-75 (Cable\_2 на рис. 5) является стандартным компонентом из библиотеки кабелей (cables) в виде коаксиального кабеля.

Основными параметрами, задаваемыми при модельном расчете для данного компонента, являются:

- 1) длина высокочастотного кабеля – 250 м;
- 2) радиус токоведущей жилы – 0,75 мм;
- 3) радиус изоляционного слоя – 5 мм;
- 4) радиус защитной оболочки – 6,5 мм;
- 5) удельное сопротивление жилы  $1,68 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;
- 6) удельное сопротивление земли 100 Ом·м;
- 7) частотный диапазон до  $10^8$  Гц.

Высокочастотный кабель подключается к фильтру присоединения в среде PSCAD, как показано на рисунке 5.

Фильтр присоединения выполняет следующие функции: компенсирует реактивное сопротивление конденсатора связи на рабочих частотах; заземляет нижнюю обкладку конденсатора связи на частоте 50 Гц; служит согласующим элементом между ВЧ кабелем и линейным трактом ЛЭП.

На проводе фазы  $C$  ЛЭП 110 кВ «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» установлен фильтр присоединения ФП 6 400/36-255 кГц, схема замещения которого представлена на рисунке 6.

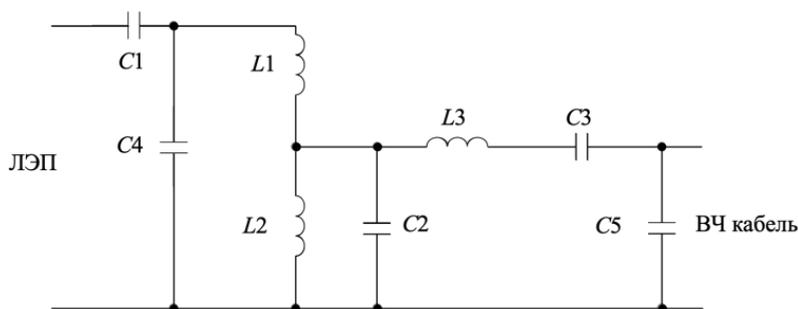


Рис. 6. Электрическая схема фильтра присоединения ФП 6400/36-255 кГц  
 Fig. 6. Electrical circuit of the FP connection filter 6400/36-255 kHz

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Параметры элементов схемы замещения фильтра присоединения приведены в таблице, они используются из базы данных программы WinTrakt. Конденсатор связи СМВ-110/√3-6.4 У1 представлен емкостью  $C_1 = 6\ 400$  пФ.

Таблица  
 Table

Параметры элементов электрической схемы фильтра присоединения ФП 6 400/36-255 кГц  
 Parameters of the circuit diagram elements of the connection filter FP 6 400/36-255 kHz

Емкости (пФ)		Индуктивности (мГн)	
C1	64 00	L1	2,27
C2	1 500	L2	0,24
C3	69 000	L3	0,036

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Фазные провода ЛЭП и грозотрос образуют линейный ВЧ тракт. Если ЛЭП является двухцепной, то учитываются фазные провода и второй цепи.

Провода линии электропередачи представлены в виде коаксиального кабеля с нулевой толщиной изоляционного слоя и защитной оболочки, хотя программная среда PSCAD имеет стандартные библиотеки для воздушных линий Tline (Line00, Line6 на рис. 4).

Такой выбор модели обусловлен следующими соображениями: во-первых, это позволяет моделировать гололёдные отложения на проводе линии, добавив диэлектрик гололёдного отложения; во-вторых, в данной модели можно отдельно задавать сечение сердечника по стали и по алюминию для стале-алюминиего провода.

ЛЭП 110 кВ «Кутлу Букаш – Рыбная Слобода» в рассматриваемой модели представлена элементом Line00 (рис. 4).

Основными параметрами, задаваемыми для данного компонента, являются:

- 1) длина воздушной линии – 40 000 м;
- 2) расположение проводов по вертикали относительно земли и по горизонтали;
- 2) радиус стального сердечника – 3,45 мм;
- 3) радиус алюминиевого повива – 12,4 мм;
- 4) радиус изоляционного слоя – 12,4 мм;
- 5) удельное сопротивление провода и грозотроса –  $2,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;
- 6) удельное сопротивление земли 100 Ом·м;
- 7) частотный диапазон до  $10^8$  Гц.

Входное сопротивление подстанции по концам ВЧ тракта на фазных проводах, к которым не подключены элементы ВЧ обработки и локатор, задается эквивалентной емкостью, величина которой определяется в соответствии с рекомендациями, изложенными в [20].

На всех последующих рисунках рефлектограмм, полученных при модельных расчетах в программной среде PSCAD, по горизонтальной оси отложены расстояния в метрах до неоднородностей, которые создают отраженные импульсы. Расстояния определены с использованием скорости распространения электромагнитной волны  $C=3 \cdot 10^8$  м/с без корректировки на реальную скорость электромагнитной волны вдоль проводов воздушных ЛЭП. По вертикали на рисунках рефлектограмм отложены амплитуды измеренных сигналов в вольтах.

### Результаты (Results)

**Первый модельный эксперимент** был поставлен для определения с использованием имитационной модели ЛЭП в среде PSCAD степени электромагнитного влияния на фазные провода ЛЭП неоднородности волнового сопротивления грозотроса при локационном зондировании фазного провода через систему ВЧ обработки.

Схема подключения рефлектометра и полученные при этом рефлектограммы представлены на рисунке 7.

Для «измерений» на грозотросе была создана неоднородность путем замыкания грозотроса на землю на расстоянии 3 300 м от начала линии через первую анкерную опору в точке В. Рефлектометр к грозотросу не был подключен, он был подключен к проводу фазы А через стандартную ВЧ обработку. Входное сопротивление подстанции на конце подключенного провода фазы А было задано эквивалентной емкостью С1. Для ввода зондирующих импульсов в ЛЭП использовался участок линии менее 10% от существующей линии в 40 000 м.

Были рассчитаны рефлектограммы на проводах фаз А, В, С при подключении рефлектометра к проводу фазы А.

При зондировании импульс на проводе фазы А отразился от ее конца в точке Б на расстоянии 40 000 м (рис. 7, б) и был равен 0,08 В. Зондирующий импульс с провода фазы А за счет электромагнитной связи навелся на провода фаз В и С, отразившись от их концов в точках Б (рис. 7, в и г). Сигналы, которые отразились на концах проводов фаз В и С в точках Б имеют большую амплитуду, чем их исходные сигналы в точках А, т. к. являются результатом сложения импульсов, отраженных от эквивалентных емкостей, и наведенных переотраженных импульсов со всей линии.

Часть энергии зондирующего импульса А навелась на грозотрос и, распространяясь по нему, отразилась от места его замыкания на землю через анкерную опору в точке В на расстоянии 3 300 м (описываемый процесс на схеме не показан). Отраженный импульс В на грозотросе вернулся к его началу, отразился от его разомкнутого конца и опять распространяясь к месту замыкания грозотроса на землю в точке В, отразился там в виде импульса 2В (образовался первый кратный импульс). Затем этот импульс 2В снова направился к началу грозотроса, отразился там и распространялся опять к месту замыкания грозотроса на землю в точке В, отразился там в виде импульса 3В (образовался второй кратный импульс). Таким образом этот сигнал многократно переотражался при его распространении по грозотросу на участке АВ в виде кратников 2В, 3В и т. д., уменьшаясь по амплитуде до полного затухания импульса.

Электромагнитное поле, создаваемое на грозотросе кратными импульсами В, 2В, 3В, наводило на фазные провода А, В, С с соответствующими импульсами, обозначенными пунктирными контурами на рисунках 7, б, в, г, которые регистрировались виртуальными осциллографами Еа, Еб, Ес.

Наведенные импульсы на фазных проводах В и С (рис. 7, в и г) были не велики по амплитуде и составляли сотые доли милливольт. При этом выходной зондирующий импульс рефлектометра был равен 1 В (на рис. 7, б импульс по амплитуде ограничен графически). Ослабление наведенных переотраженных импульсов В при регистрации их на фазных проводах В и С достигло 80 дБ. Но импульсы могли быть явно и надежно обнаружены современными рефлектометрами, имеющими диапазон усиления в пределах до 100 дБ [15].

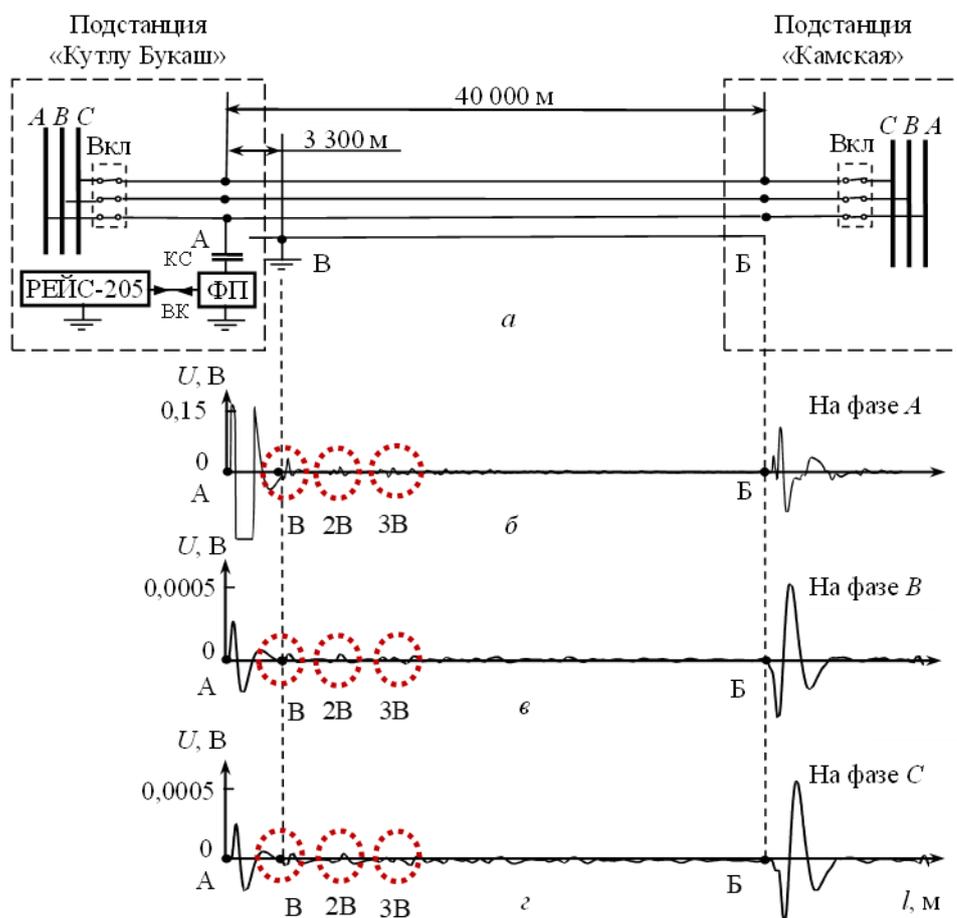


Рис. 7. Результаты моделирования при подключении рефлектометра к проводу фазы А штатным способом через ВЧ обработку линии; а – схема подключения рефлектометра к линии; б, в, г – напряжения на проводах фаз А, В и С соответственно

Fig.7. Simulation results when connecting the reflectometer to the phase A wire in the standard way through RF processing of the line; a – diagram of connecting the reflectometer to the line; b, c, d – voltages on the wires of phases A, B and C, respectively

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, видно, что при локационном мониторинге ЛЭП состояние грозотроса (наличие замыкания на землю) влияет на фазные провода, находящиеся рядом с ним, в виде наведенных и переизлученных импульсов, которые могут быть обнаружены современной измерительной аппаратурой. Следовательно, зондирующие импульсы могут быть введены с грозотроса в фазные провода для контроля их состояния с регистрацией обратных переизлученных импульсов, указывающих место повреждения на линии.

**Второй модельный эксперимент** был посвящен анализу работы схемы мониторинга состояния проводов ЛЭП при их локационном зондировании с использованием грозотроса. В этом случае зондирующий импульс подается через фильтр присоединения и конденсатор связи непосредственно в провод грозотроса, как это представлено на рисунке 8.

Фильтр присоединения и конденсатор связи присутствуют в данном случае для обеспечения техники безопасности обслуживающему персоналу и уменьшения диапазона ВЧ помех.

Грозотрос, как и в первом эксперименте, заземлен на расстоянии 3 300 м через анкерную опору в точке В (рис. 8, а).

При зондировании исходный импульс через грозотрос наводится на провода фаз А, В, С с отражением в точках Б на концах линий на расстоянии 40 000 м, что хорошо видно на соответствующих рефлектограммах рис. 8, б, в, г.

В то же время заземление грозотроса в точке В на расстоянии 3 300 м, как и в первом эксперименте, порождает на грозотросе отраженный импульс в точке В с кратными импульсами 2В, 3В и так далее (рис. 8, д). Амплитуды первых трех отраженных импульсов, регистрируемых на расстояниях до 10 000 м, на графике (рис. 8, д) ограничены графически для соразмерности с амплитудами других импульсов.

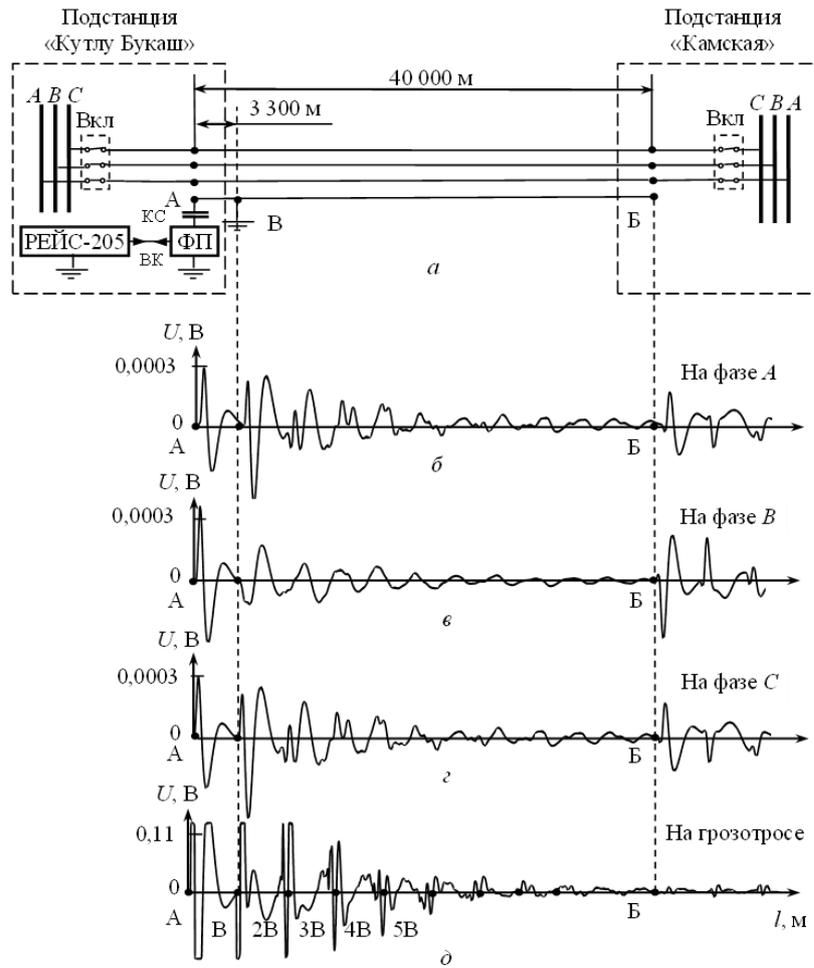


Рис. 8. Результаты моделирования при подключении рефлектометра к грозотросу в начале линии при заземлении грозотроса на первой анкерной опоре: а – схема подключения рефлектометра через фильтр присоединения к грозотросу; б, в, г – напряжения на проводах фаз А, В и С соответственно; д – напряжение на грозотросе

Fig. 8. Simulation results when connecting the reflectometer to the lightning arrester cable at the beginning of the line when the lightning arrester cable is grounded on the first anchor support: а – diagram of connecting the reflectometer through the connection filter to the lightning arrester cable; b, c, d – voltages on the wires of phases A, B and C, respectively; d – voltage on the lightning arrester cable

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В данном случае при непосредственном присоединении рефлектометра к грозотросу амплитуды кратных импульсов 2В, 3В и других на грозотросе на несколько порядков выше, чем при первом эксперименте, как это показано на рисунке 8, д. Поэтому наведенные ими импульсы на проводах фаз А, В, С также значительно выше, чем в первом эксперименте, как это видно на соответствующих рефлектограммах (рис. 8, б, в, г) при сравнении с рефлектограммами рис. 7, б, в, г. Согласно рефлектограммам (рис. 8, б, в, г) наведенные импульсы соразмерны по амплитуде с импульсами, отраженными от концов фазных проводов в точках Б и используемых при процедуре мониторинга ЛЭП.

Ослабление переотраженных импульсов, наведенных на фазные провода А, В, С (рис. 8, б, в, г) составляет примерно 60 дБ, что соизмеримо с затуханием отраженных импульсов при локационном мониторинге ЛЭП с использованием для зондирования ВЧ тракта [8].

Поэтому можно считать, что импульсы на фазных проводах А, В, С, переотраженные при замыкании грозотроса на землю, вполне энергообеспечены при его использовании для ввода зондирующих импульсов в линию при локационном мониторинге.

Но при использовании для зондирования только небольшого участка линии с заземлением в начале грозотроса исчезает возможность контроля участков линии, которые находятся далее места заземления. Ибо при этом импульс на грозотросе, многократно отражаясь на этом участке, постепенно затухает, не достигая конца линии (рис. 8, д). То же самое происходит с наведенными импульсами на фазных проводах А, В, С (рис. 8, б, в, г).

**Третий модельный эксперимент** проводился в исполнении схемы линий, при котором грозотрос контролировался по всей длине при заземлении его конца на последней опоре линий, как это показано на рис. 9, а.

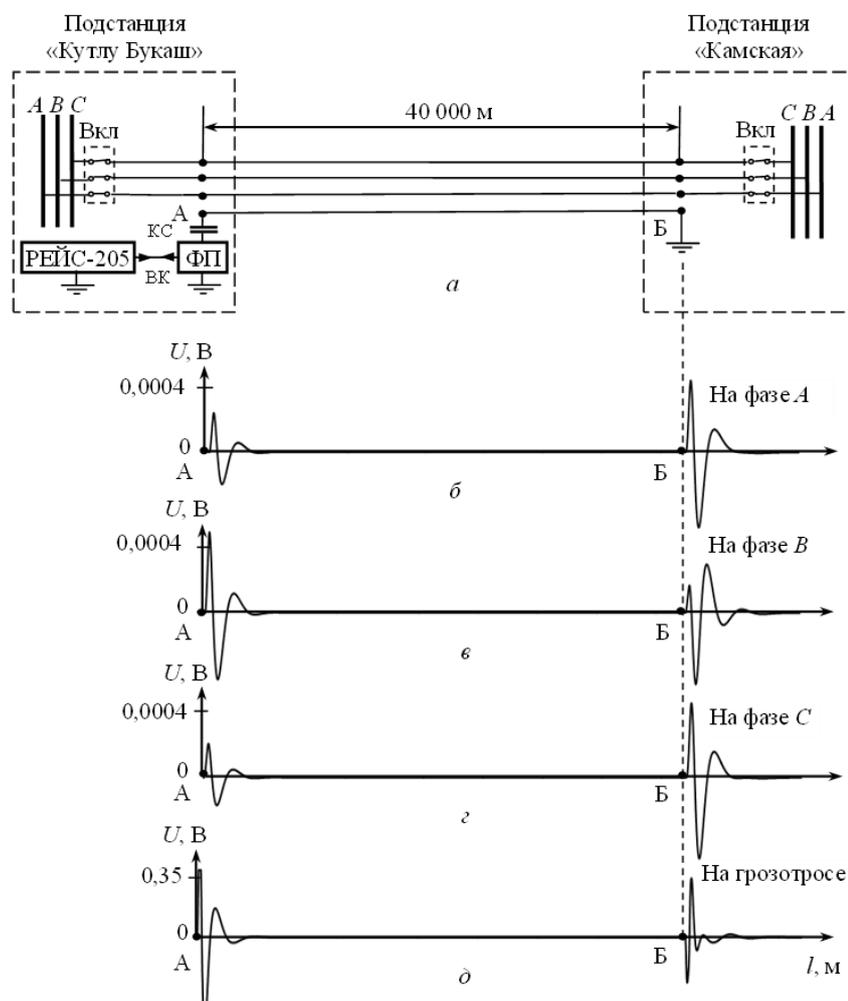


Рис. 9. Результаты моделирования при подключении рефлектометра к грозотросу в начале линии и заземлении грозотроса в конце линии: а – схема подключения рефлектометра через фильтр присоединения к грозотросу; б, в, г – напряжения на проводах фаз А, В и С соответственно; д – напряжение на грозотросе

Fig.9. Simulation results when connecting the reflectometer to the lightning arrester cable at the beginning of the line and grounding the lightning arrester cable at the end of the line: а – diagram of connecting the reflectometer through the connection filter to the lightning arrester cable; b, c, d – voltages on the wires of phases A, B and C, respectively; d – voltage on the lightning arrester cable

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Амплитуда исходного зондирующего импульса в этом случае в начале грозотроса была равна примерно 0,35 В (рис. 9, д). В начале фазных проводов амплитуды наведенных импульсов находились в интервале 0,0002 – 0,0004 В. Амплитуды наведенных импульсов, отраженных от концов фазных проводов линии на расстоянии 40 000 м в точках Б, превышали эти значения, как это следует из рис. 9, б, в, г.

Величина наведенных исходных зондирующих импульсов вполне достаточна для контроля состояния фазных проводов ЛЭП с использованием современной измерительной аппаратуры, как было показано выше в предыдущем эксперименте. При этом импульсы с первым положительным всплеском, отраженные от концов линий в точках Б на проводах фаз А, В, С, наблюдаются явно и однозначно регистрируются современным рефлектометром РЕЙС-205 на емкостных нагрузках фазных проводов (рис. 9, б, в, г). Импульс, отраженный от конца заземленного грозотроса, имеет первый всплеск отрицательной полярности.

**Четвертый модельный эксперимент** был проведен для обнаружения места повреждения в виде однофазного замыкания провода на землю. Рефлектометр РЕЙС-205

был подключен к началу грозотроса через фильтр присоединения и конденсатор связи, как представлено на рис. 10, а.

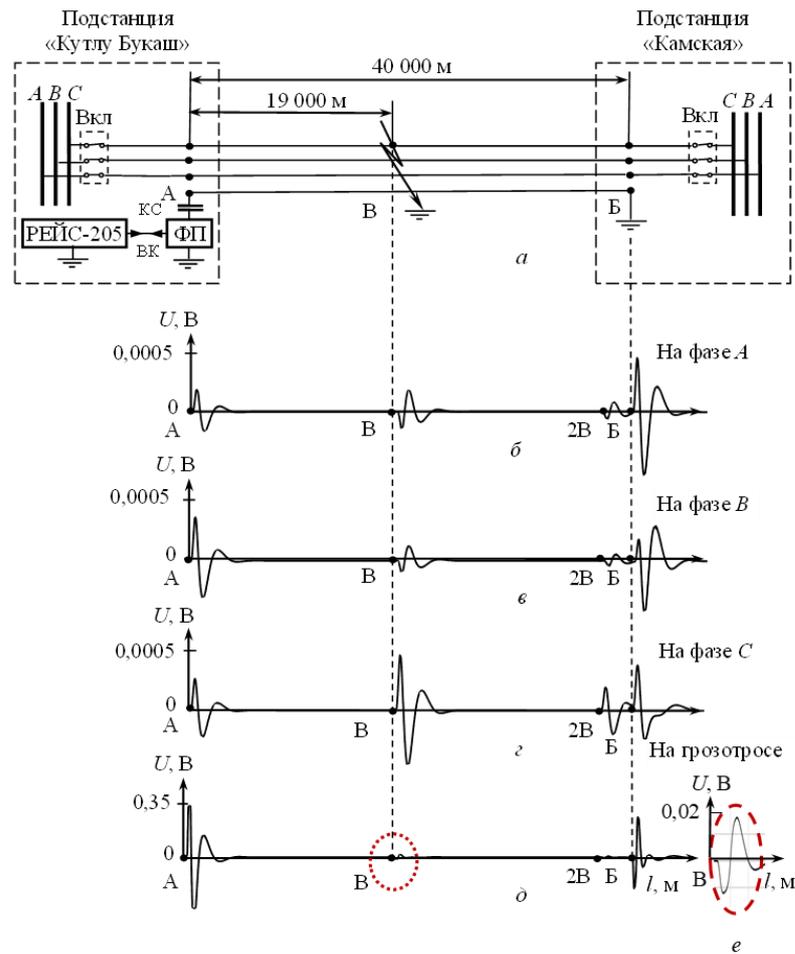


Рис. 10. Результаты моделирования при подключении рефлектометра к грозотросу в начале линии при замыкании провода фазы С на землю: а – схема подключения рефлектометра к грозотросу; б, в, г – напряжения на проводах фаз А, В и С соответственно; д – напряжения на грозотросе; е - растяжка импульса с грозотроса, соответствующего месту короткого замыкания провода фазы С на землю в середине линии в точке В

Fig.10. Simulation results when connecting the reflectometer to the lightning arrester cable at the beginning of the line when the phase C wire is shorted to ground: а – diagram of connecting the reflectometer to the line through the HF channel to the lightning arrester cable; b, c, d – voltages on the wires of phases A, B and C, respectively; d – voltage on the lightning arrester cable; e - signal stretching from the lightning arrester cable reflected from the short circuit of the phase C wire to the ground in the middle of the line at point B

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Грозотрос в конце линии в точке В был заземлен, что обусловило отраженный импульс с первым всплеском отрицательной полярности (рис. 10, д). Фазные провода на концах имели емкостную нагрузку (рис. 10, б, в, г), как во время третьего эксперимента (рис. 9, б, в, г).

Во время данного эксперимента провод фазы С был заземлен в точке В на расстоянии 19 000 м от начала линии, как показано на рисунке 10, а.

Амплитуда исходного зондирующего импульса в начале грозотроса была равна 0,35 В (рис. 10, д). Амплитуда импульса на грозотросе при отражении от места замыкания в точке В, составила 0,02 В (на рис. 10, е обозначено штриховым овалом). Затухание отраженного импульса при этом равнялось примерно 40 дБ относительно импульса рефлектометра с амплитудой в 1 В. Это соответствует уровню затухания отраженного импульса при подобном локационном зондировании линии с использованием ВЧ обработки (рис. 3). Импульс, отраженный от места замыкания провода линии, при регистрации его рефлектометром РЕЙС-205 (рис. 10, е) обнаруживается также явно и надежно, как при такой же регистрации в случае использования ВЧ обработки для ввода импульса в линию (рис. 3, в).

Значительно меньшие сигналы, соответствующие месту замыкания, были наведены в точках В на проводах фаз А и В (рис. 10, б и в). Причем отраженный от места замыкания сигнал на проводе фазы С был больше их (рис. 10, г). Около конца линии на расстоянии 38 000 м на фазных проводах А и В наблюдались кратные импульсы 2В, соответствующие по отрицательной полярности первого всплеска основным отраженным импульсам в точках В (рис. 10, б и в).

Таким образом, подключая локаатор к грозотросу в начале линии, можно наблюдать устойчивые отраженные сигналы, как от конца линии, так и от места повреждения на фазном проводе с помощью современных рефлектометров [15].

#### **Обсуждение (Discussions)**

Сравнение эффективности обнаружения повреждения провода ЛЭП предлагаемым методом ввода зондирующего импульса в ВЧ тракт через грозотрос (рис. 10) и методом его ввода с использованием ВЧ обработки ЛЭП (рис. 3) показывает их сопоставимую чувствительность. Поэтому метод ввода зондирующего импульса через грозотрос может успешно использоваться при мониторинге воздушных высоковольтных линий электропередачи.

Назначением грозотроса, согласно его названию, является защита фазных проводов ЛЭП от поражения молнией. Поэтому при подключении локаатора к грозотросу всегда потребуется какой-то аналог ВЧ обработки, направленный на защиту локаатора уже не от высокого напряжения фазных проводов, а от перенапряжений, появляющихся при попадании молнии на грозотрос. И кроме заземления грозотроса в конце линии будет необходимо установка в точках подвеса грозотроса разрядников, основной функцией которых будет являться рассеивание энергии перенапряжений, вызванных прямыми ударами молнии в грозотрос.

#### **Заключение (Conclusions)**

Модельные исследования показывают, что при локационном мониторинге воздушных ЛЭП методы ввода зондирующих импульсов в провода с использованием грозотроса и высокочастотной обработки имеют примерно одинаковую результативность.

Таким образом, при отсутствии стандартной ВЧ обработки на ЛЭП имеется реальная возможность их зондирования с использованием грозотроса. Это значительно увеличивает количество ЛЭП, на которых можно осуществить локационный мониторинг их состояния. Это дает возможность организации надежного мониторинга существующих воздушных высоковольтных ЛЭП с использованием современных рефлектометров.

Внедрение методики локационного зондирования ЛЭП с использованием грозотроса позволит оснастить подстанции России и подстанции стран ближнего зарубежья надежной диагностической аппаратурой в виде интеллектуальной локационной системы мониторинга воздушных ЛЭП 35–750 кВ, повышающей бесперебойность их функционирования в условиях эффективного энерго-ресурсосбережения в экстремальных ситуациях.

#### **Литература**

1. Shilin A.N. et al. Intelligent Reflectometer for Diagnostics of Air Transmission Lines // Smart Electromechanical Systems: Group Interaction. 2019. pp. 313–326.
2. Тимашева Л.В., Ефимов Е.Н., Ясинская Н.В. Причины и характер повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110–750 кВ в 1997–2007 гг. // Энергия единой сети. 2012. № 5. С. 32–41.
3. Ратушняк В.С., Ратушняк В.С., Ильин Е.С. и др. Статистический анализ аварийных отключений электроэнергии из-за гололедообразования на проводах ЛЭП на территории РФ // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. 2018. № 1. Доступно по: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018>. Ссылка активна на 11.01.2023.
4. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А. и др. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. 445 с
5. Башкевич В.Я., Угаров Г.Г., Кузнецов П.А. и др. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеоусловиях: монография. Саратов: СГТУ. 2013. 244 с.
6. Лачугин В.Ф., Платонов П.С., Смирнов А.Н. Новые технологии и оборудование (методы и устройства) для определения мест повреждения // Сети России. 2016. № 5 (38). С. 108–116.
7. Минуллин Р.Г., Абдуллазянов Э.Ю., Касимов В.А., Яруллин М.Р. Современные методы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи. Часть 1. Методы прогнозирования и взвешивания проводов. // Известия ВУЗ. Проблемы энергетики. 2013. № 7–8. С. 68–78.
8. Минуллин Р.Г. Локационный мониторинг гололеда и повреждений на линиях электропередачи. Монография. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2022. 440 с.

© Минуллин Р.Г., Гранская А.А., Абдуллазянов Э.Ю., Ахметова И.Г., Мустафин Р.Г., Касимов В.А.

9. Минуллин Р.Г., Ахметова И.Г., Касимов В.А. и др. Локационный мониторинг с определением места повреждения и текущей работоспособности воздушных линий электропередачи. Часть 1. // Электрические станции. 2022. № 11. С. 30–38.

10. Minullin R.G., Akhmetova I.G., Kasimov V.A. et al. Location monitoring with determining the location of damage and the current performance of overhead power lines. //Power Technology and Engineering. 2023. Vol. 57, N1. pp. 145–152.

11. Minullin R.G., Akhmetova I.G., Kasimov V.A. et al. Location monitoring of overhead power lines with determining the location of ice deposits and visualization of sounding results. // Power Technology and Engineering. 2023. Vol. 57, N1. pp. 153–162.

12. Bi T., Wang S., Jia K. Single pole-to-ground fault location method for MMC-HVDC system using active pulse //IET Generation, Transmission & Distribution. 2018. Vol. 12. N2. pp. 272–278.

13. Budi Rahayu Widodo M. et al. Fault Location Detection Using Impedance and Impulse Injection on 20 kV Distribution System Wonokromo Base on Geographic Information System // 2021 The 4th International Conference on Software Engineering and Information Management. 2021. pp. 184–192.

14. de Oliveira L. G. et al. Fault detection and location in power distribution systems: The usefulness of the HS-OFDM scheme for time-domain reflectometry // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 203. pp. 107600.

15. Рефлектометр компьютерный РЕЙС-405: техническое описание // СТЭЛЛ. Доступно по: <https://www.eurostell.com/products/reis-405/>. Ссылка активна на 11.01.2023.

16. Minullin R.G. Electromagnetic Compatibility Between Power-Line Location Monitoring Equipment and High-Frequency Power-Line Communication Equipment // Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 53. N2. pp. 217–226. DOI: 10.1007/s10749-019-01063-3.

17. Minullin R.G. The Effect of Interference in Location Monitoring of Overhead Power Transmission Lines // Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 53. N3. pp. 366–375. DOI: 10.1007/s10749-019-01086-w.

18. Минуллин Р.Г., Петрущенко Ю.Я., Фардиев И.Ш. и др. Особенности подключения локационной аппаратуры к линиям электропередачи для определения места повреждения. //Известия ВУЗ. Проблемы энергетики. 2008. № 7–8. С. 60–69.

19. Дмитриев М.В., Родчихин С.В. Грозозащитные тросы ВЛ 35 – 750 кВ. Выбор мест заземления. // Новости электротехники. 2017. №2 (104). С. 2–5.

20. Troppauer W., Lovrenčić V., Gubelj N. et al. Advanced monitoring of icing and prevention against icing on overhead power lines // Proceedings 18th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS-2019, Iceland, Reykjavik). 2019. Abstr. 6. pp. 1–9.

### Авторы публикации

**Минуллин Ренат Гизатулович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Локационная диагностика состояния линий электропередачи» (ЛДС ЛЭП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *E-mail:* [minullin@mail.ru](mailto:minullin@mail.ru).

**Гранская Анна Андреевна** – ассистент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *E-mail:* [annamiss35@gmail.com](mailto:annamiss35@gmail.com).

**Абдуллазянов Эдвард Юнусович** – канд. техн. наук., ректор Казанского государственного энергетического университета.

**Ахметова Ирина Гареевна**, – д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *E-mail:* [irina\\_akhmetova@mail.ru](mailto:irina_akhmetova@mail.ru).

**Мустафин Рамиль Гамилович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *E-mail:* [ramil.mustafin@gmail.com](mailto:ramil.mustafin@gmail.com).

**Касимов Василь Амирович** – д-р техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *E-mail:* [vasilkasimov@yandex.ru](mailto:vasilkasimov@yandex.ru).

### References

1. Shilin AN et al. Intelligent Reflectometer for Diagnostics of Air Transmission Lines // Smart Electromechanical Systems: Group Interaction. 2019. P. 313–326.

2. Timasheva LV, Yefimov YeN, Yasinskaya NV. Prichiny i kharakter povrezhdayemosti komponentov vozdushnykh liniy elektropredachi napryazheniyem 110–750 kV v 1997–2007 gg. // Energiya yedinoi seti. 2012; 5: 32–41. (In Russ).

3. Ratushnyak VS, Ratushnyak VS, Il'in YeS et al. Statisticheskiy analiz avariynykh otklyucheniya elektroenergii iz-za gololedoobrazovaniya na provodakh LEP na territorii RF // Molodaya nauka Sibiri: elektron. nauch. zhurn. 2018; 1 Available at: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018>. Accessed: 11 Jan 2024. (In Russ).
4. Levchenko II, Zasyupkin AS, Alliluyev AA et al. Diagnostika, rekonstruktsiya i ekspluatatsiya vozdushnykh liniy elektroperedachi v gololednykh rayonakh: Moskva: MEI; 2007. (In Russ).
5. Bashkevich VYa, Ugarov GG, Kuznetsov PA et al. Monitoring vozdushnykh liniy elektroperedachi, ekspluatiruyemykh v ekstremal'nykh meteousloviyakh: monografiya. Saratov: SGTU; 2013. (In Russ).
6. Lachugin VF, Platonov PS, Smirnov AN. Novyye tekhnologii i oborudovaniye (metody i ustroystva) dlya opredeleniya mest povrezhdeniya // Seti Rossii. 2016; 5(38): 108–116. (In Russ).
7. Minullin RG, Abdullazyanov EYu, Kasimov VA, Yarullin MR. Sovremennyye metody obnaruzheniya gololeda na provodakh vozdushnykh liniy elektroperedachi. Chast' 1. Metody prognozirovaniya i vzhivaniya provodov. //Izvestiya VUZ. Problemy energetiki. 2013; 7–8: 68–78. (In Russ).
8. Minullin RG. Lokatsionnyy monitoring gololeda i povrezhdeniy na liniyakh elektroperedachi. Monografiya. Kazan: Kazan. gos. energ. un-t, 2022. (In Russ).
9. Minullin RG, Akhmetova IG, Kasimov VA et al. Lokatsionnyy monitoring s opredeleniyem mesta povrezhdeniya i tekushchey rabotosposobnosti vozdushnykh liniy elektroperedachi. Chast 1. // Elektricheskiye stantsii. 2022; 11: 30–38. (In Russ).
10. Minullin RG, Akhmetova IG, Kasimov VA et al. Location monitoring with determining the location of damage and the current performance of overhead power lines. //Power Technology and Engineering. 2023; 57(1): 145–152.
11. Minullin RG, Akhmetova IG, Kasimov VA et al. Location monitoring of overhead power lines with determining the location of ice deposits and visualization of sounding results. // Power Technology and Engineering. 2023; 57(1): 153–162.
12. Bi T, Wang S, Jia K. Single pole-to-ground fault location method for MMC-HVDC system using active pulse //IET Generation, Transmission & Distribution. 2018; 12(2): 272–278.
13. Budi Rahayu Widodo M et al. Fault Location Detection Using Impedance and Impulse Injection on 20 kV Distribution System Wonokromo Base on Geographic Information System // 2021 The 4th International Conference on Software Engineering and Information Management. 2021; 184–192.
14. de Oliveira LG et al. Fault detection and location in power distribution systems: The usefulness of the HS-OFDM scheme for time-domain reflectometry // Electric Power Systems Research. 2022; 203: 107600.
15. Reflektometr kompyuternyy REYS-405: tekhnicheskoye opisaniye // STELL. Available at: <https://www.eurostell.com/products/reis-405/>. Accessed: 11 Jan 2024. (In Russ).
16. Minullin RG. Electromagnetic Compatibility Between Power-Line Location Monitoring Equipment and High-Frequency Power-Line Communication Equipment // Power Technology and Engineering. 2019; 53(2): 217-226. DOI: 10.1007/s10749-019-01063-3.
17. Minullin RG. The Effect of Interference in Location Monitoring of Overhead Power Transmission Lines // Power Technology and Engineering, 2019; 53(3): 366-375. DOI: 10.1007/s10749-019-01086-w.
18. Minullin RG, Petrushenko YuYa, FardiyeV ISh et al. Osobennosti podklyucheniya lokatsionnoy apparatury k liniyam elektroperedachi dlya opredeleniya mesta povrezhdeniya. //Izvestiya VUZ. Problemy energetiki. 2008; 7–8: 60–69. (In Russ).
19. Dmitriev M.V., Rodchikhin S.V. Grozozashchitnye trosy VL 35-750 kV. Vybór mest zazemleniya // Novosti ehlektrotekhniki. 2017. No. 2 (104). pp. 2–5. (In Russ).
20. Troppauer W, Lovrenčić V, Gubelj N et al. Advanced monitoring of icing and prevention against icing on overhead power lines // Proceedings 18th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS-2019, Iceland, Reykjavik). 2019: 1–9.

### Authors of the publication

**Renat G. Minullin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: [minullin@mail.ru](mailto:minullin@mail.ru).

**Anna A. Granskaya** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: [annamiss35@gmail.com](mailto:annamiss35@gmail.com).

**Edvard YU. Abdullazyanov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Irina G. Akhmetova** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: [irina\\_akhmetova@mail.ru](mailto:irina_akhmetova@mail.ru).

**Ramil G. Mustafin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: [ramil.mustafin@gmail.com](mailto:ramil.mustafin@gmail.com).

**Vasil A. Kasimov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: [vasilkasimov@yandex.ru](mailto:vasilkasimov@yandex.ru).

© Миңуллин Р.Г., Гранская А.А., Абдуллазянов Э.Ю., Ахметова И.Г., Мустафин Р.Г.,  
Касимов В.А.

Шифр научной специальности: 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов,  
изделий, веществ и природной среды»

**Получено** 20.02.2024 г.

**Отредактировано** 14.03.2024 г.

**Принято** 06.05.2024 г.

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 62-523

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-3-33-49

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АППАРАТА НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГИБКОПОДВЕШЕННОГО ГРУЗА

Синюков А.В.<sup>1</sup>, Абдуллазянов Э.Ю.<sup>2</sup>, Заруцкий Н.Н.<sup>1</sup>, Синюкова Т.В.<sup>1</sup>, Грачева Е.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

stw0411@mail.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в необходимости усовершенствования действующих систем управления промышленными механизмами с минимальными вложениями на реконструкцию, а также в востребованности надежных систем управления, использование которых позволяет повысить срок эксплуатации устройства в целом. ЦЕЛЬ. Разработать простую и одновременно эффективную систему управления промышленным объектом, позволяющую демпфировать колебания гибкоподвешенного груза. На мостовых кранах одним из механизмов для перемещения груза по территории цеха является механизм тележки. Тележка мостового крана служит для перемещения груза вдоль пролета моста, при этом перемещаемый груз может иметь как жесткий, так и гибкий подвес. Использование гибкого подвеса приводит к появлению колебаний в виде раскачивания перемещаемого груза. Данные колебания являются негативным явлением, оказывающим отрицательное воздействие на механическую конструкцию крана и на электрическую систему управления электроприводом тележки. На рассматриваемом механизме установлен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, на основании проведенных исследований для управления им выбрана векторная система, в которую, для подавления колебаний груза предложено внедрение регулятора, функционирующего на базе нечеткой логики. Предлагаемый нечеткий регулятор производит корректировку скорости двигателя в зависимости от угла отклонения гибкоподвешенного груза, его уникальность заключается в простоте реализации и минимальном количестве сигналов управления. Регуляторы данного типа хорошо зарекомендовали себя, так как обладают высоким быстродействием, хорошим откликом в динамике, позволяют оптимизировать систему управления при косвенном определении параметров. МЕТОДЫ. В ходе исследования, для решения обозначенных задач, была использована методика математического моделирования. Исследование системы управления проводилось в среде моделирования MATLAB в подсистеме Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье отражена значимость темы исследования, рассмотрены имеющиеся методы гашения колебаний гибкоподвешенного груза. Для исследования была разработана система, содержащая подсистему, в функции которой входит отслеживание динамики перемещения тележки и груза. В данной статье предложен контроллер управления, работающий на базе правил нечеткой логики. Регулятор прост в реализации, имеет один сигнал управления, при этом нечеткая логика позволяет гибко настроить систему управления, что дает возможность получить требуемые характеристики управления. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Моделирование процесса работы тележки в среде MATLAB Simulink происходило с изменением массы груза и длины подвеса, анализ всех вариантов моделирования привел к выводу, предлагаемый контроллер на базе нечеткой логики позволяет погасить колебания груза при различных исходных параметрах.

**Ключевые слова:** демпфирование колебаний; векторное управление; гибкий подвес; электрический привод; нечеткий регулятор.

**Для цитирования:** Синюков А.В., Абдуллазянов Э.Ю., Заруцкий Н.Н., Синюкова Т.В., Грачева Е.И. Использование аппарата на базе нечеткой логики для демпфирования

колебаний гибкоподвешенного груза // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 33-49. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-33-33-49.

## USING A FUZZY LOGIC-BASED APPARATUS FOR DAMPING VIBRATIONS OF A FLEXIBLE LOAD

Sinyukov <sup>1</sup> AV., Abdullazyanov <sup>2</sup> E.YU., Sinyukova <sup>1</sup> TV., Zaruckiy <sup>1</sup> N.N., Gracheva <sup>2</sup> EI.

<sup>1</sup>Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

stw0411@mail.ru

**Abstract:** THE RELEVANCE of the research lies in the need to improve existing control systems for industrial mechanisms with minimal investment in reconstruction, as well as the demand for reliable control systems, the use of which can increase the service life of the device as a whole. THE PURPOSE. To develop a simple and at the same time effective control system for an industrial facility that allows damping vibrations of a flexible load. On overhead cranes, one of the mechanisms for moving cargo around the workshop is the trolley mechanism. The overhead crane trolley is used to move cargo along the bridge span, and the transported cargo can have either a rigid or flexible suspension. The use of a flexible suspension leads to vibrations in the form of rocking of the moved load. These vibrations are a negative phenomenon that has a negative impact on the mechanical structure of the crane and on the electrical control system of the electric drive of the trolley. An asynchronous motor with a squirrel-cage rotor is installed on the mechanism under consideration; based on the research carried out, a vector system was selected to control it, into which, in order to suppress load fluctuations, it was proposed to introduce a controller operating on the basis of fuzzy logic. The proposed fuzzy controller adjusts the engine speed depending on the angle of deflection of the flexible load; its uniqueness lies in its ease of implementation and the minimum number of control signals. Regulators of this type have proven themselves well, as they have high speed, good response in dynamics, and allow optimization of the control system by indirectly determining parameters. METHODS. During the study, mathematical modeling techniques were used to solve the identified problems. The study of the control system was carried out in the MATLAB modeling environment in the Simulink subsystem. RESULTS. The article reflects the significance of the research topic and discusses the available methods for damping vibrations of a flexible load. For the study, a system was developed containing a subsystem whose functions include tracking the dynamics of the movement of the cart and cargo. This article proposes a control controller operating on the basis of fuzzy logic rules. The controller is simple to implement, has one control signal, while fuzzy logic allows you to flexibly configure the control system, which makes it possible to obtain the required control characteristics. CONCLUSION. Simulation of the trolley operation process in the MATLAB Simulink environment took place with a change in the mass of the load and the length of the suspension; the analysis of all modeling options led to the conclusion that the proposed controller based on fuzzy logic makes it possible to dampen load fluctuations for various initial parameters.

**Keywords:** vibration damping; vector control; flexible suspension; electric drive; fuzzy controller.

**Acknowledgments:** The study was carried out with the support of the Fund for Assistance to the Development of Small Innovative Enterprises in the Scientific and Technical Sphere (Innovation Promotion Fund) on the basis of agreement No. 17227GU/2021 dated December 22, 2021.

**For citation:** Sinyukov AV., Abdullazyanov E.YU., Sinyukova TV., Zaruckiy N.N., Gacheva EI. Using a fuzzy logic-based apparatus for damping vibrations of a flexible load. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (3): 33-49. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-33-49.

### **Введение (Introduction)**

Цель исследования заключается в разработке простой и надежной системы

управления действующим объектом, содержащей блок коррекции, реализованный с использованием правил нечеткой логики, позволяющей гасить колебания гибкоподвешенного груза.

Процесс автоматизации производственных систем и их отдельных агрегатов на действующих предприятиях играет весомую роль. Данные мероприятия влияют на повышение уровня надежности объектов, задействованных в технологических процессах, увеличивают производительность труда, обеспечивают создание максимально безопасной среды, в которой происходит выполнение работ по обслуживанию объектов. Оборудование, используемое для подъема и перемещения груза, в данных технологических системах, играет значимую роль. Безупречное функционирование всех механизмов, установленных на мостовых кранах, напрямую зависит от состояния системы управления данными объектами. На текущий момент наметились тенденции на использование на крановых механизмах принципиально новых, регулируемых систем с обратными связями. Это стало возможно благодаря автоматизации систем управления и постоянно ведущимся разработкам в области электроники и микропроцессорной техники. Использование усовершенствованных систем управления позволило контролировать и корректировать происходящие внутри объекта процессы [1-3].

Системы управления для крановых механизмов, по мере их усовершенствования, прошли путь от систем с двигателями постоянного тока, которые хорошо зарекомендовали себя с позиций обеспечения широкого диапазона регулирования скорости, но при этом, были не лишены недостатков, в виде присутствия в устройстве двигателя щеточно-коллекторного узла, который нуждался в постоянном обслуживании, до использования частотно-регулируемого электропривода [4].

На промышленных предприятиях для механизмов кранового электропривода используются специализированные крановые трехфазные асинхронные электродвигатели переменного тока, которые получили широкое применение на механизмах, режим работы которых является легким или средним. В случае тяжелых условий работы использование асинхронных электродвигателей имело ограничение из-за небольшого допустимого числа включений и сложности регулирования происходящих в электроприводе процессов. Если сравнивать асинхронные двигатели с двигателями постоянного тока, то первые, несомненно, выигрывают, в связи с тем, что они просты в обслуживании, имеют невысокие показатели по стоимости, их ремонт менее трудоемкий [5- 7].

Для регулирования скорости без обеспечения плавности хода длительное время использовались на механизмах перемещения и подъема асинхронные двигатели с фазным ротором. В них изменению скорости способствовало введение или выведение из цепи ротора добавочных сопротивлений, которые, в процессе эксплуатации сильно грелись. На сопротивлениях наблюдались значительные потери энергии, а также возникала из-за описанных процессов постоянная необходимость в обслуживании блоков сопротивлений. Разработка частотного преобразователя позволила создать оптимальную систему управления, которая, при небольших габаритах, по сравнению с рассмотренными системами, обеспечивала плавность и широкий диапазон регулирования скорости [8].

Использование преобразователей частоты для регулирования скорости движения крановых механизмов дало возможность применять асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором при различных режимах технологического процесса, также привело к улучшению динамики работы крана в целом [9, 10]. На крановых механизмах используются как скалярные, так и векторные системы управления. Исследованию данных систем с блоками коррекции, позволяющими улучшить исходную систему управления и добиться энергосбережения, улучшения динамических и других показателей электропривода посвящено значительное количество работ [11, 12].

Объектом для исследования и анализа, происходящих на нем процессов, выбрана тележка мостового крана. Рабочий цикл имеет характерную для данных механизмов последовательность. Перед перемещением груза, он зацепляется грузозахватывающим элементом крана, затем крюк (механизм захвата) плавно начинают поднимать до достижения необходимой высоты, о которой свидетельствует момент натяга тросов. По окончании натяжения троса происходит подъём груза на заданную высоту. Из анализа исследований систем управления крановыми механизмами, было выявлено, что чем выше будет поднят груз, тем значительнее диапазон и частота его колебаний [13]. По завершении подъёма груза на необходимую высоту, его, посредством тележки,

перемещают в место складирования. По достижении заданного участка, механизм захвата с грузом опускают, отцепляют груз, поднимают механизм захвата на безопасную высоту, а затем тележка возвращается в исходное положение. На основании представленного рабочего цикла тележки можно говорить о том, что ее перемещение имеет повторно-кратковременный характер, с повторяющимися пусками и остановками, а при движении в обратном направлении наблюдается реверс.

Все механизмы мостового крана, при своей работе, подвергаются влиянию динамических нагрузок, вызванных массой перемещаемого груза (раскачивание груза) и воздействием ветровой или снеговой нагрузки. Так как выбранная для исследования тележка мостового крана расположена в цеху, следовательно, воздействие ветровой или снеговой нагрузки на нее не происходит и данный показатель, как воздействующий на систему управления не учитывается. При исследовании не учитывается присутствие неровностей на рельсовых путях, которые также могут стать дополнительным источником колебаний подвешенного на гибком подвесе груза. Влияние динамических нагрузок на механизмы крана сильнее проявляется в периоды неустановившегося движения, такие как пуск и торможение. Также повышаются колебания при остановке тележки по причине наезда на упор [4].

Во время выполнения производственного цикла металлическая конструкция крана и его электропривода подвергаются влиянию динамических нагрузок, показатели которых могут принимать, в отличие от статических нагрузок, большие значения, это связано с присутствием в механизмах весовых движущихся масс. Наибольшим моментом инерции на мостовых кранах обладают роторы двигателей и перемещающиеся части крана. Процесс перемещения тележки крана состоит из нескольких этапов, поле пуска механизма происходит его разгон до достижения необходимой скорости, далее характер движения приобретает установившийся вид, что продолжится до момента торможения. Этапы разгона и торможения механизма перемещения груза связаны с затратами кинетической энергии, которые накладывают отпечаток на показатели скорости перемещающихся масс [14, 15].

На показатели динамики движения механизма перемещения груза в горизонтальном направлении и самого груза влияет их приведенный момент инерции, так как он превосходит показатели момента инерции вращающихся частей электрического двигателя, следовательно, от его величины зависит продолжительность времени пуска и производительность крана. Величина оптимального значения ускорения согласно [16]  $0,2 \text{ м/с}^2$ . В процессе подбора значения ускорения, необходимо учитывать, что согласно [16] у асинхронных электрических двигателей с ротором короткозамкнутого типа время пуска должно быть более 3 секунд, при этом величина ускорения не должна принимать показателей, достижение которых приводит к возникновению нарушения сцепления колес с рельсами. Перечисленные явления могут быть предпосылками, способствующими появлению колебаний груза, которые, в свою очередь, будут дополнительной нагрузкой на все механизмы крана, что негативно скажется на его производительности. Величина угла отклонения элемента, служащего для подвеса груза, говорит о степени раскачивания груза.

Колебания, оказывают негативное влияние на точность выполнения его механизмами производственных задач, их появление приводит к нарушению корректности позиционирования. Путем снижения скорости, в работе [17], предлагается демпфировать колебания груза, но использование данной методики вызовет увеличение переходного процесса, что повлияет на производительность грузоподъемного механизма, а для многих объектов, задействованных в технологических процессах, где на каждую операцию выделено строго определенное время, это нежелательное явление.

В работе [18] описаны методы гашения колебаний груза, при которых в задачи оператора входит только выбор направления перемещения механизма передвижения, регулирование скорости перемещения и гашение колебаний обрабатывается автоматизированной системой, причем на устойчивость системы управления не оказывает влияние отсутствие или наличие колебаний груза в момент пуска тележки. Значительным недостатком предлагаемых систем является необходимость присутствия в них сложных и дорогостоящих датчиков, выполняющих определение параметров колебаний груза.

Автоматический метод управления исполнительными механизмами мостового крана, при котором происходит определение текущего места положения груза, в условиях исходной неизвестности параметров перемещаемого груза и внешних возмущающих воздействий, представлен в работе [19]. Предложен подход, который

совмещается в себе возможность определения текущего положения тележки и одновременно позволяет демпфировать колебания подвешенного груза. В основе предлагаемой методики лежит упрощенное адаптивное управление. В схеме присутствует эталонная модель, являющаяся колебательным звеном, которое имеет собственную частоту, показатели которой ниже частоты объекта, управление которым осуществляется. В системе управления задействованы датчики, фиксирующие местоположение и скорость механизма передвижения, данные по величине линейного ускорения груза и величину угла отклонения подвески груза от вертикальной плоскости. Несмотря на явно имеющиеся достоинства, система перегружена датчиками, которые имеют некоторую временную погрешность в измерениях.

В работе [20] предложен универсальный контроллер для демпфирования колебаний груза при установке на объекте, как двигателей переменного тока, так и постоянного тока, который может использоваться в системах управления механизмов передвижения кранов любого типа. Корректность функционирования предлагаемого контроллера проверялась на модели, имитирующей подвешенный на тележке груз, представляющей собой математический маятник, у которого точка подвеса является подвижной. Процесс ускорения или замедления механизма передвижения груза сопровождался ускорением движения груза, величина которого напрямую зависит от значения момента электродвигателя. Так как на перемещаемый груз оказывают воздействие силы инерции, то это явление приводит к отклонению груза от вертикальной оси. Отклонение происходит в противоположную относительно движения тележки сторону. После того, как движение тележки достигнет номинального значения скорости, ускорения будет иметь нулевой показатель, а колебания из-за воздействия сил сопротивления постепенно затухнут.

Использование адаптивного регулятора, работающего на базе нечетких правил для демпфирования колебаний, имеющих место при гибком подвесе транспортируемого груза, рассмотрено в работе [21]. Предлагаемый способ базируется на создании нечеткой модели, функционирующей с использованием параметров механизмов крана по принципу работы нейронной сети. После отладки модели в нее вводится адаптивный алгоритм, в функции которого входит корректировка параметров системы, в частности ее нечеткой части, функционирующей на базе машинного обучения. Предлагаемый метод требует значительных системных ресурсов, так как при таком подходе необходимо хранение информации, в связи с тем, что нейронная сеть постоянно обращается к ней для совершенствования полученных результатов.

Для гашения колебаний поднимаемого на гибком подвесе груза в данной работе предлагается использовать разработанный на основании минимального количества необходимых для функционирования системы параметров блок нечеткой логики, который отличается от рассмотренных выше методов простотой реализации, но при этом выполняет возложенные на него функции. Внедрение в систему управления механизмом перемещения груза нечеткого регулятора позволит значительно снизить показатели динамического момента раскачивающегося груза, также, применение предлагаемого регулятора приведет к повышению устойчивости системы управления при появлении случайного воздействия на перемещаемый груз извне.

Научная значимость исследования состоит в востребованности новых, легко реализуемых систем управления функционирующих в условиях не полной определенности. Величина угла отклонения груза является постоянно меняющимся значением, если в системе управления использовать показатели угла отклонения, полученные с использованием измерительных устройств прямым или косвенным способом, то будет присутствовать постоянно накапливающаяся ошибка по определению сигнала, так как информация приходит с задержкой и не всегда соответствует истинному значению.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предлагаемого решения на действующих механизмах с минимальными затратами, для функционирования предлагаемого решения необходим контроллер, в который программно прописывается нечеткий алгоритм, при недостаточных ресурсах контроллера реализовать предложенный метод гашения колебаний возможно путем реализации нечеткого регулятора с помощью внешней микросхемы.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

За основу, при разработке предлагаемого решения, была взята векторная система управления, которая обладает рядом значимых показателей, по сравнению со скалярной системой управления, важным ее достоинством является более простой математический

аппарат, необходимый для реализации векторного регулирования. Также, к положительной оставляющей векторного управления относится возможность регулирования переходных процессов. Создание предлагаемой системы управления механизмом перемещения тележки началось с разработки ее в среде MATLAB Simulink, на основании типовых зависимостей векторной системы управления и предварительного расчета параметров асинхронного двигателя. При расчетах и моделировании учитывался приведенный момент инерции тележки с грузом. Реализованная в Simulink компьютерная модель системы управления для электропривода тележки мостового крана приведена на рисунке 1.

В схеме, для управления процессами, происходящими в электрическом приводе, задействован трехфазный преобразователь частоты, в составе которого можно выделить инвертор, реализация которого выполнена на базе трехфазной мостовой схемы, содержащей IGBT транзисторы и обратные диоды. Роль выпрямителя в модели играет источник постоянного напряжения. Данная альтернативная замена позволяет несколько упростить процесс моделирования системы управления, но при этом, используемая методика, не отражается на актуальности происходящих при моделировании процессов и не влияет на его качество, это объясняется тем, что представленные на современном рынке частотные преобразователи, в звене постоянного тока обеспечивают стабильные показатели напряжения.

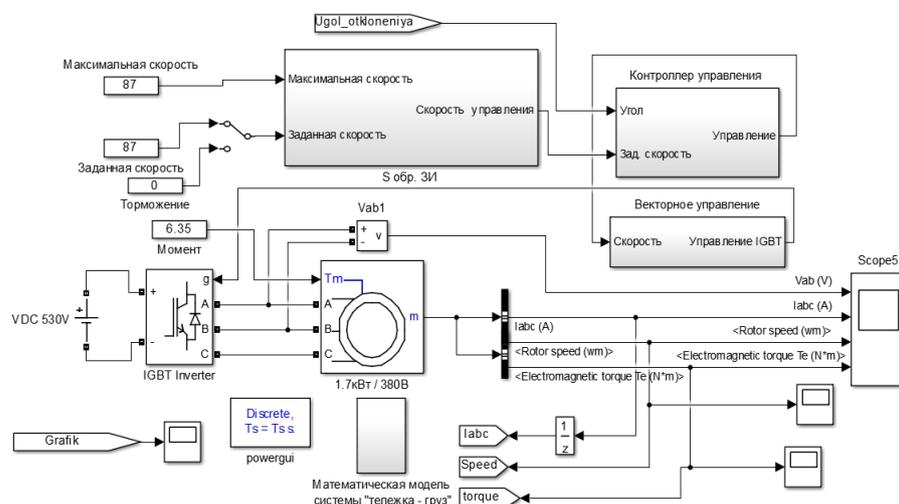


Рис. 1. Реализация в среде Matlab электропривода с векторной системой управления для крановой тележки

Fig. 1. Implementation in Matlab of an electric drive with a vector control system for a crane trolley

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На элементе VDC530V, являющимся в модели источником питания постоянного тока, задается фиксированное значение величины напряжения, которое формируется следующим образом, из линейного значения величины напряжения источника переменного тока (380 В) умноженного на  $\sqrt{2}$  вычитается величина падения напряжения в первом звене инвертора, обеспечивающем преобразование переменного тока в постоянный ток. Падение напряжения обычно составляет около 1,5 В.

В процессе моделирования параметры электрического двигателя, рассчитанные по его номинальным параметрам, введенные в блок 1,7кВт/380В, выполняющий функции асинхронного двигателя остаются неизменными. В качестве управляющего сигнала инвертора, выступает значение импульса, сформировавшегося в системе векторного управления. Поступающий на инвертор сигнал формирует команду на включение определенных ключей IGBT транзистора.

Собранная в среде Matlab векторная система управления, полученная на основании математического аппарата классического векторного управления, отображена на рисунке 2.

В процессе моделирования цикл работы электрического привода тележки формировался следующим образом, по окончании подъема груза механизмом подъема происходит пуск тележки с гибкоподвешенным грузом. Присутствие в схеме S-образного задатчика интенсивности (рис. 3) дает возможность обеспечить плавное

нарастание скорости тележки, а также позволяет избавиться от возникающего при начальном движении тележки удара. Использование датчика интенсивности дает возможность избежать резких ускорений в первоначальный момент пуска, так как на реальном объекте в редукторе и других узлах присутствуют зазоры между деталями, которые накладывают отпечаток на интенсивность разгона. Применение в системе управления датчика также позволит плавно продолжить движение тележке с заданным ускорением, которое напрямую будет зависеть от массы груза и длины подвеса. Время процесса разгона тележки соответствует времени, с момента пуска тележки, то есть с нулевого значения скорости до выхода ее номинальные показатели. На этапе разгона подключается к системе управления блок, осуществляющий гашение колебаний груза.

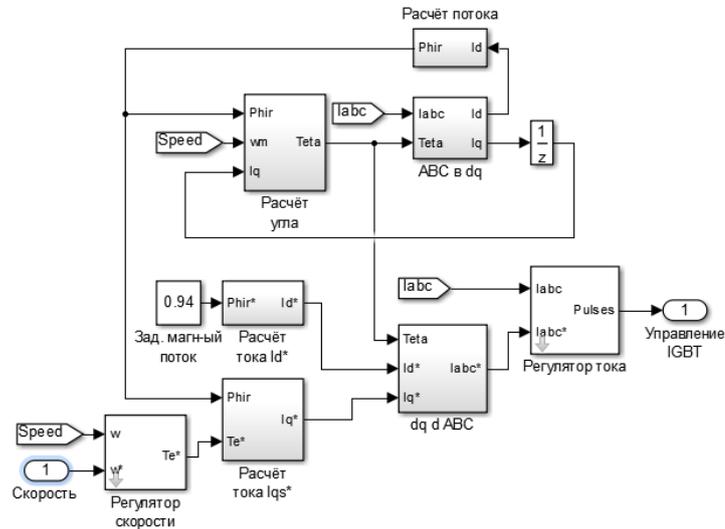


Рис. 2. Реализация блока Векторное управление Fig. 2. Implementation of the Vector control block

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

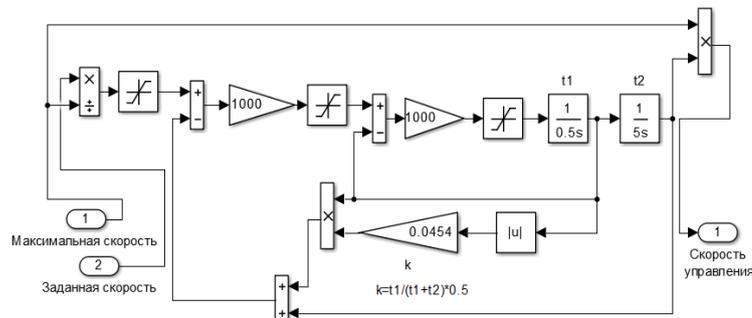


Рис. 3. Математический аппарат S-образного датчика интенсивности скорости движения тележки Fig. 3. Mathematical apparatus of an S-shaped speed controller for the movement of a trolley

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В математической модели описанный алгоритм реализуется контроллером, присутствующим в системе управления приводом перемещения тележки (рис. 4).

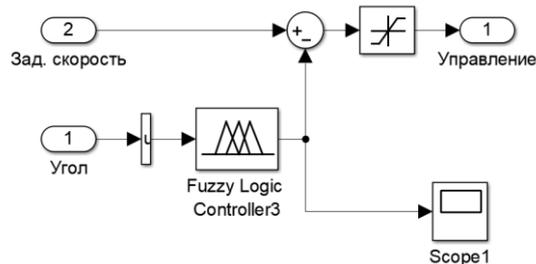


Рис. 4. Контроллер управления электроприводом тележки мостового крана с блоком Fuzzy Logic Fig. 4. Electric drive control controller for an overhead crane trolley with a Fuzzy Logic block

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В составе контроллера управления присутствует разработанный блок Fuzzy Logic Controller (рис. 5), функционирующий на базе правил нечёткой логики. Для корректной работы нечеткого контроллера требуются только показатели угла отклонения троса, на котором с помощью грузозахватывающего устройства подвешен груз.

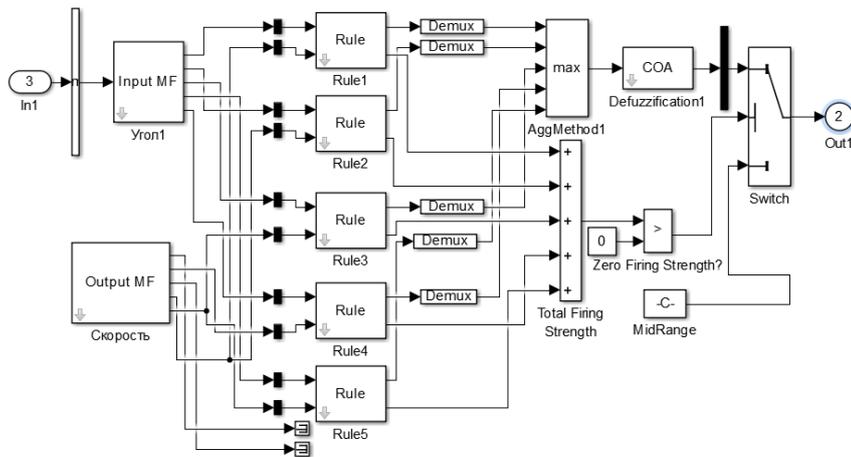


Рис. 5. Внутренне устройство блока Fuzzy Logic Controller *Fig. 5. Internal structure of the Fuzzy Logic Controller block*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании разработанных правил, которые отражены на рис. 6, происходит следующее, в виде выходного сигнала с контроллера выдаётся управляющее воздействие, являющееся одним из входных сигналов сумматора, которое вычитается из второго входного сигнала сумматора, сформированного на S-образном задатчике интенсивности. Полученное на сумматоре значение подаётся на вход блока, реализующего векторную систему управления.

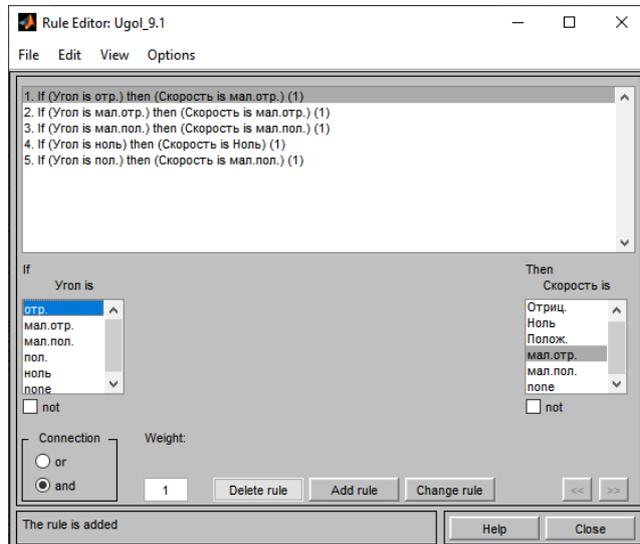


Рис. 6. Состав разработанных правил для контроллера на базе нечёткой логики *Fig. 6. Composition of developed rules for a controller based on fuzzy logic*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ разработанных правил показывает, что чем сильнее груз пытается отклониться от вертикального положения, тем выше значение управляющего воздействия сформированного на выходе контроллера, реализованного на базе представленных нечетких правил, и тем весомее будет значение сигнала, поступающего на сумматор, за которым происходит формирование сигнала управления.

Процесс разгона тележки, представляет собой две фазы. На первом этапе происходит процесс, когда тележка только начинает своё движение с заданной, через S-образный задатчик интенсивности, скоростью. В самом начале разгона механизма

перемещения происходит отклонение гибкоподвешенного груза на некоторый угол, при обнаружении данного явления, включается в работу нечеткий контроллер. При этом величина сигнала, сформированного на выходе нечеткого регулятора, подается со знаком минус на сумматор, где вторым сигналом будет значение задания на скорость, сформированное на выходе S-образного задатчика интенсивности, данные действия приводят к ограничению темпа набора скорости механизмом перемещения груза. При данном процессе перемещаемый гибкоподвешенный груз при движении тележки будет всегда находиться позади нее. Под следующим этапом принимается процесс, возникающий по окончании периода работы S-образного задатчика интенсивности. За время его функционирования в контроллере накопился скомпенсированный сигнал управления, который поступает в систему регулирования, чем вызывает возвращение груза под тележку, при этом, не давая его движению перейти в колебательный процесс. Теперь темп разгона, который ранее задавал задатчик интенсивности, будет зависеть исключительно от нечеткого контроллера. Механизму перемещения будет присущ более медленный характер набора скорости, то есть плавный её подход к заданному параметру. При происходящих явлениях груз начнёт догонять тележку и, если не будут предприняты меры, то движение подвешенного груза примет колебательный характер. По мере вхождения груза под тележку, контроллер начинает выдавать управляющие сигналы на вход блока, реализующего векторное управление, что приводит к гашению кинетической энергии груза. При этом разница между положением тележки и положением груза в пространстве постепенно компенсируется, и груз принимает вертикальное положение. Торможение тележки с подавлением колебаний груза происходят аналогично описанному принципу.

Процесс работы системы нечеткого ввода осуществляется в следующей последовательности:

- этап фаззификации – процесс, связанный с определением термов. В разработанной модели используются следующие лингвистические термы «отрицательный», «малый отрицательный», «ноль», «малый положительный», «положительный»;
- этап агрегатирования - процесс, направленный на определение весового коэффициента для каждого из перечисленных на предыдущем этапе термов. Для нахождения степени истинности терм выбраны треугольные функции принадлежности, в виду простоты их математического выражения;
- этап активизации – процесс, на котором происходит определение функции принадлежности для подзаключений;
- этап аккумуляирования – процесс функционирования базы правил. При «отрицательном» и «малом отрицательном» значении угла формируется сигнал «малая отрицательная» скорость. При «положительном» и «малом положительном» значении угла формируется сигнал «малая положительная» скорость. Если угол отклонения отсутствует, то сигнал коррекции также отсутствует. Диапазон термов задан в границах входных переменных;
- этап дефаззификации – процесс перевода нечетких значений в сигналы управления.

Устройство блока дефаззификации представлено на рисунке 7.

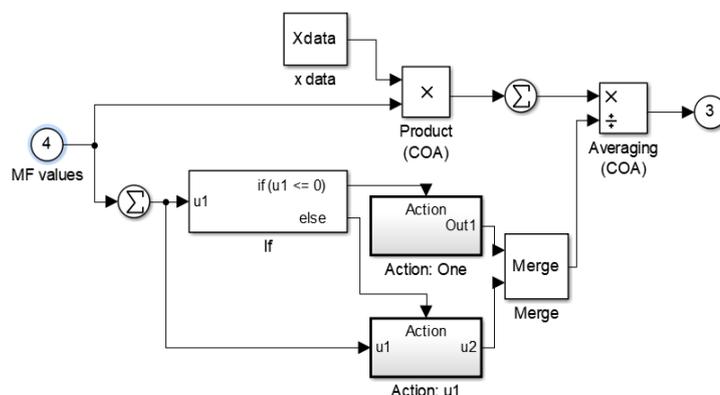


Рис. 7. Реализация блока Defuzzification

Fig. 7. Implementation of the Defuzzification block

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 8 представлена зависимость, демонстрирующая реакцию контроллера

на значение входного сигнала.

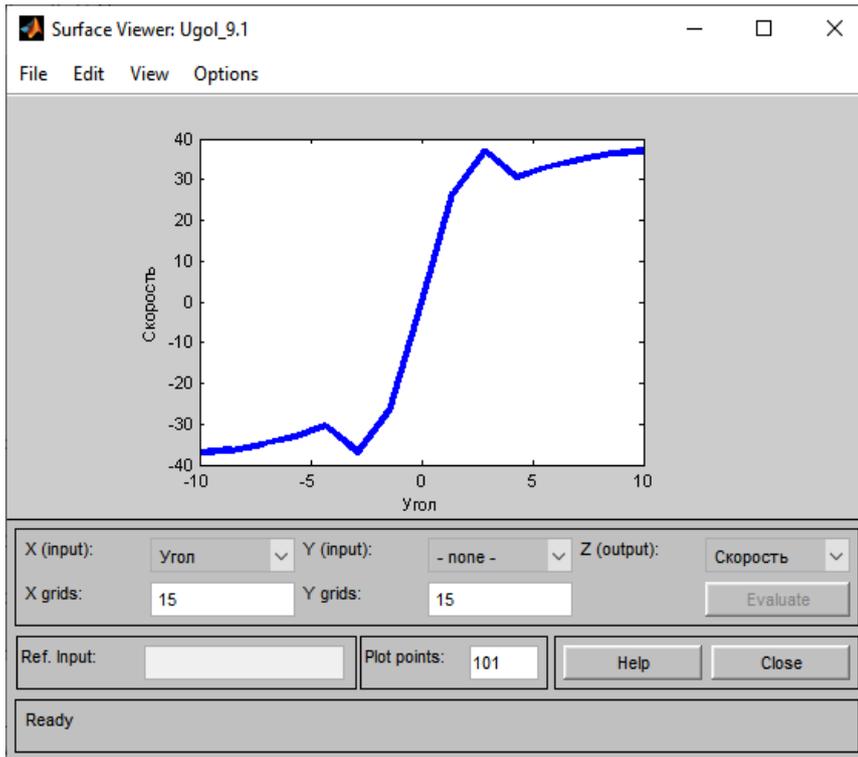


Рис. 8. Окно поверхности отклика выходного сигнала от входного сигнала  
\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Отображение происходящих в контроллере процессов, в виде графических зависимостей между сигналом управления и выходным сигналом, являющимся управляющим воздействием на систему управления можно увидеть на рисунке 9.

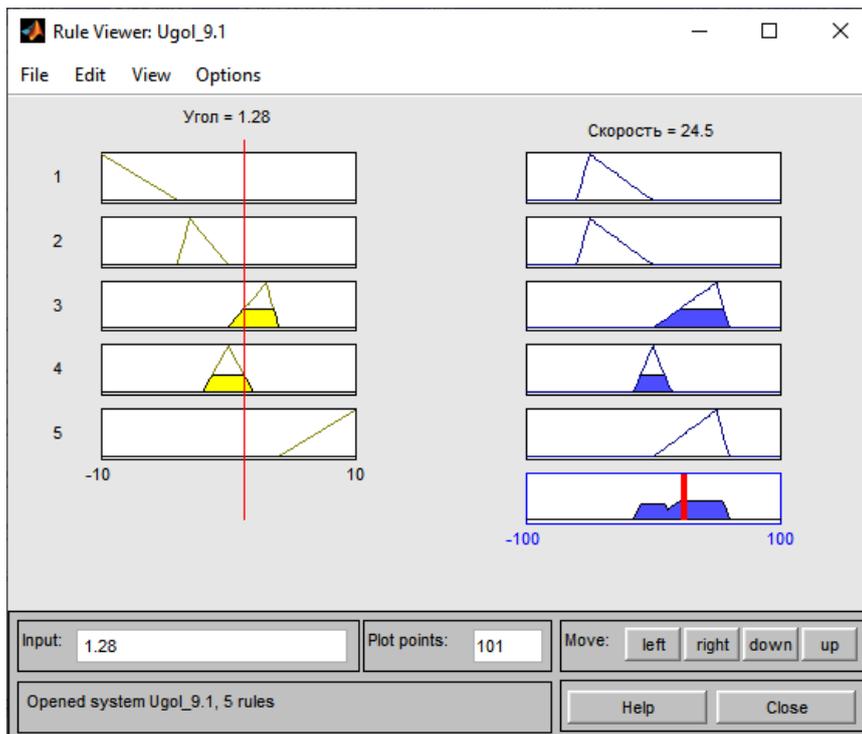


Рис. 9. Экран реализации правил нечеткой логики  
\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Модель блока «тележка-груз» в среде Simulink, необходимого для получения сигнала углового положения груза, представлена на рисунке 10. Данный блок позволяет отследить динамику перемещения тележки и груза. Схема дает наглядное представление о физических процессах, происходящих в системе при перемещении груза.

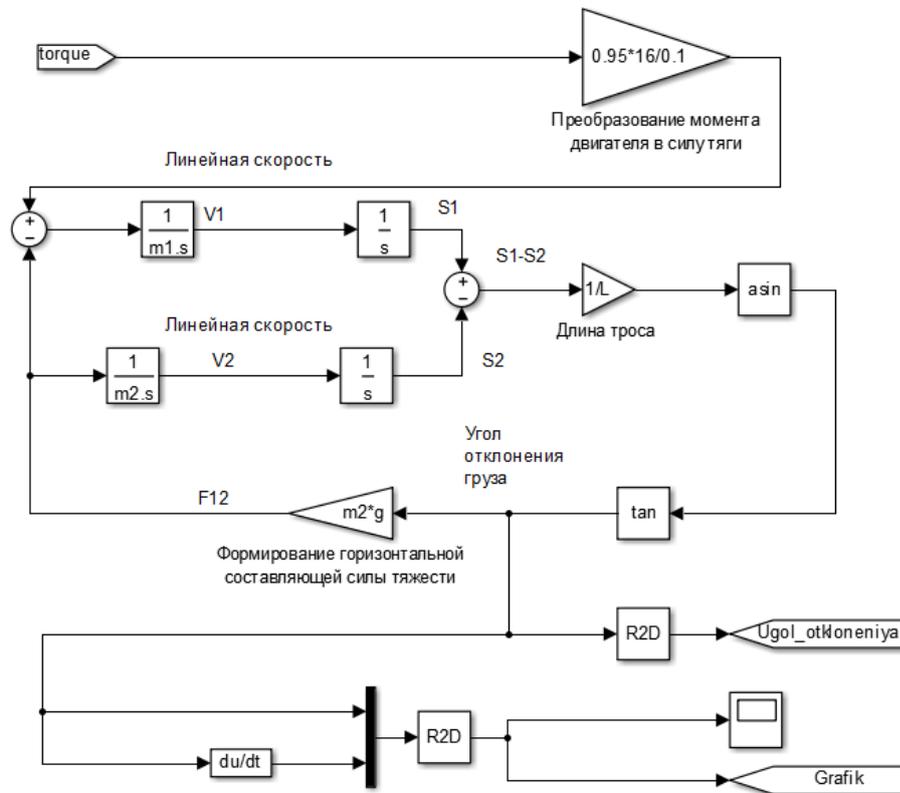


Рис. 10. Представление в виде модели системы «тележка-груз».  
Fig. 10. Representation in the form of a model of the “trolley-load” system.

При исследовании, процесс моделирования работы тележки происходил с изменением массы груза от 5 тонн, что соответствует максимально возможной величине загрузки тележки до 150 кг, под которыми понимается масса крюковой подвески и с регулированием длины подвески перемещаемого груза на высоту 10 м, 5 м, 1 м. Во всех случаях, при использовании одновременно с задатчиком интенсивности нечеткого контроллера процесс моделирования был однотипным, т.е. по окончании пуска тележка выходила на заданные показатели скорости, перемещалась на этой скорости некоторое время и потом начинается процесс торможения.

На рисунке 11 приведены полученные при моделировании работы электропривода механизма тележки переходные процессы отображающие угол отклонения груза при заданной массе груза 5 тонн и длине подвеса 10 м при использовании в системе управления блока нечеткой логики.

На рисунке 12 приведены характеристики с такими же исходными данными по массе груза и длине подвеса, как и в предыдущем исследовании, но система управления электроприводом перемещения груза содержит только задатчик интенсивности скорости.

На рисунке 13 приведены полученные при моделировании работы электропривода механизма тележки переходные процессы отображающие угол отклонения груза при заданной массе груза 5 тонн и длине подвеса 5 м при использовании в системе управления блока нечеткой логики.

На рисунке 14 приведены характеристики с такими же исходными данными по массе груза и длине подвеса, как и в предыдущем исследовании, но система управления электроприводом перемещения груза содержит только задатчик интенсивности скорости.

Моделирование с различными параметрами массы груза и длины подвеса процессов происходящих при торможении тележки без использования в системе управления нечёткой логики не актуально, так как колебания, как и при пуске являются

явлениями постоянными, и при отсутствии блока гашения колебаний в системе управления механизмом перемещения груза, они самостоятельно не исчезнут.

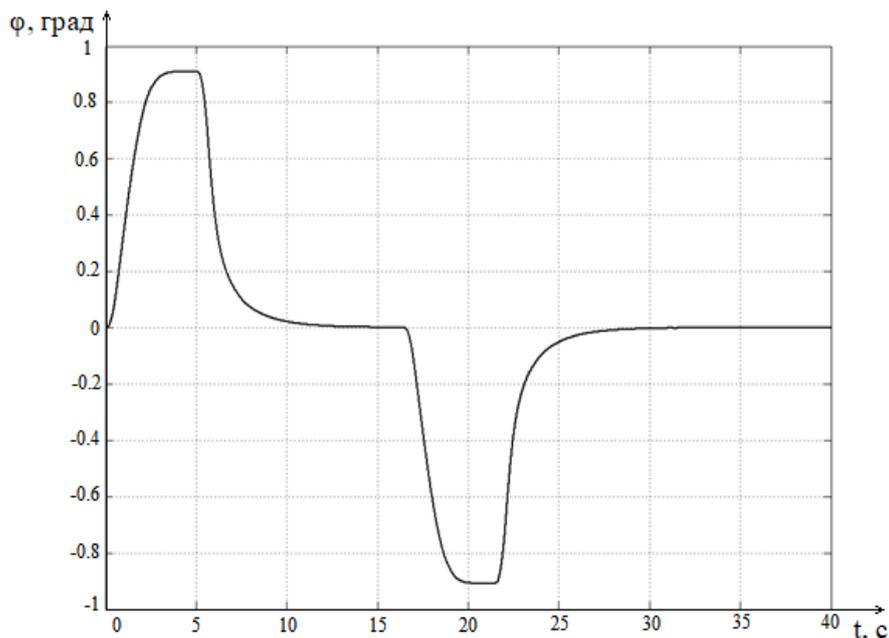


Рис. 11. Процесс формирования угла отклонения груза от вертикали при его массе равной 5 т и длине подвеса 10 м с использованием нечеткого контроллера в системе управления

Fig. 11. The process of forming the angle of deflection of a load from the vertical with its mass equal to 5 tons and suspension length 10 m using a fuzzy controller in the control system

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

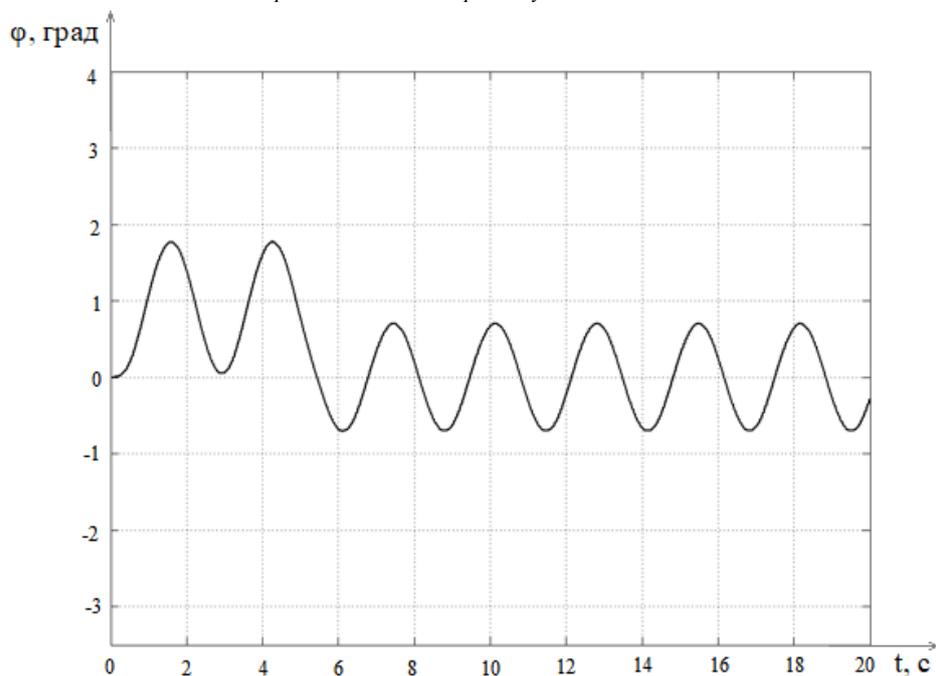


Рис. 12. Процесс формирования угла отклонения груза от вертикали при его массе равной 5 т и длине подвеса 10 м без использования нечеткого контроллера в системе управления

Fig. 12. The process of forming the angle of deflection of a load from the vertical with its mass equal to 5 tons and suspension length 10 m without using a fuzzy controller in the control system

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

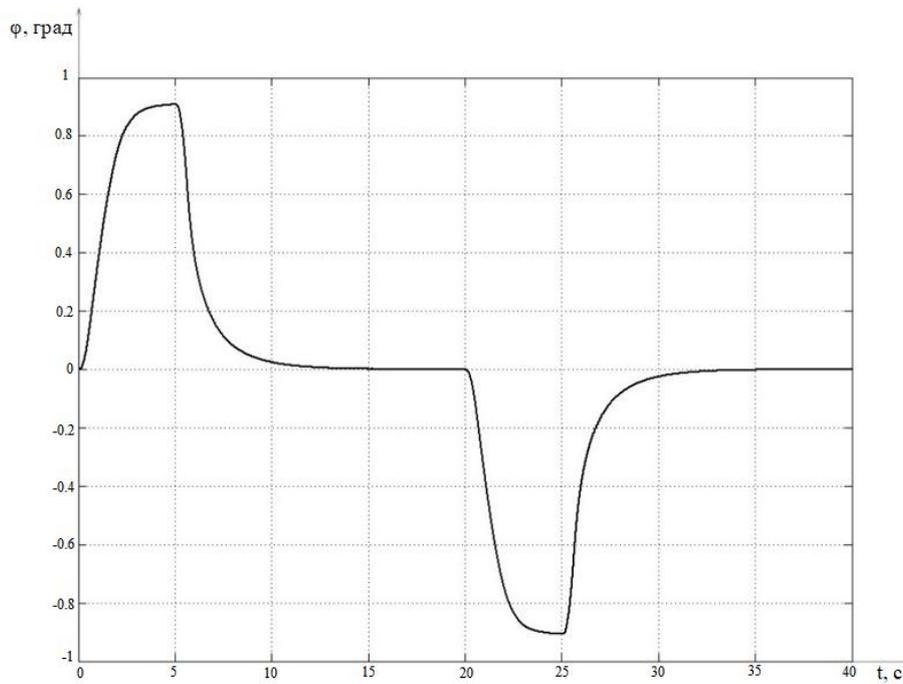


Рис. 13. Процесс формирования угла отклонения груза от вертикали при его массе равной 5 т и длине подвеса 5 м с использованием нечеткого контроллера в системе управления

Fig. 13. The process of forming the angle of deflection of a load from the vertical with its mass equal to 5 tons and suspension length 5 m using a fuzzy controller in the control system

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

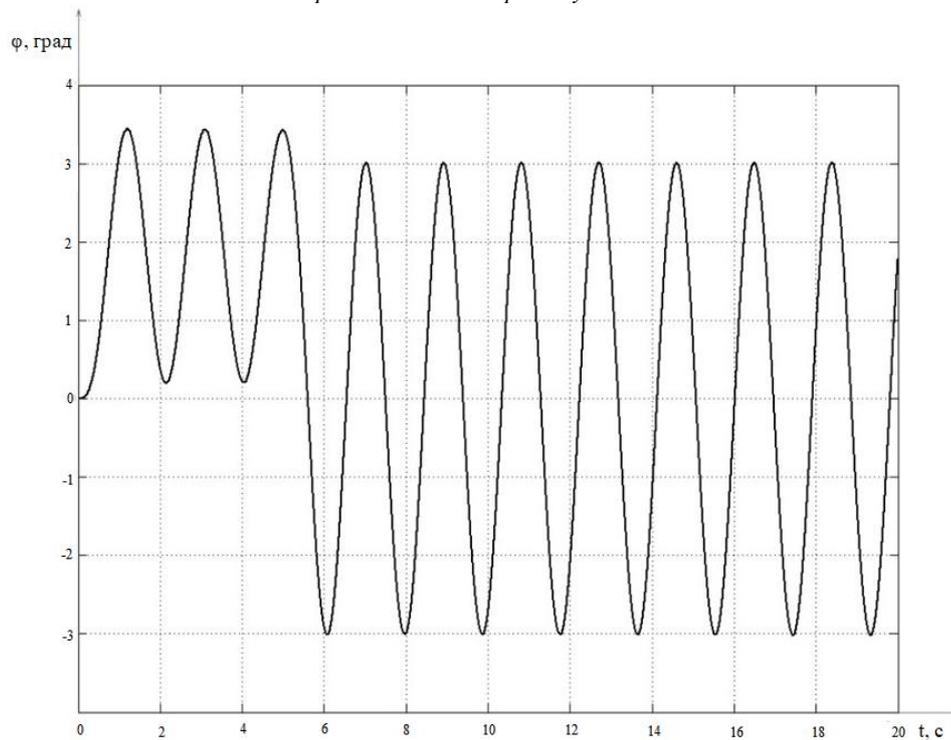


Рис. 14. Процесс формирования угла отклонения груза от вертикали при его массе равной 5 т и длине подвеса 5 м без использования нечеткого контроллера в системе управления

Fig. 14. The process of forming the angle of deflection of a load from the vertical with its mass equal to 5 tons and suspension length 10 m without using a fuzzy controller in the control system

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ результатов, представленных рисунках 11, 13 показывает, что использование нечеткого контроллера позволяет погасить колебания

гибкоподвешенного груза, как на этапе пуска, так и в период торможения. В то же время, по характеру переходных процессов, отображенных на рис. 12, 14 можно сказать, что в системе, содержащей только задатчик интенсивности в период разгона видны колебания, которые в два раза превосходят колебания, появляющиеся при использовании нечеткого регулятора, также можно увидеть, что после выхода двигателя на заданные параметры скорости колебания груза также не затухают.

Возможно моделирование рассмотренных систем управления с другими параметрами массы груза и длины подвеса, но оно дало схожие результаты. При всех вариантах регулятор четко обрабатывает возложенные на него задачи, что приводит к гашению колебаний гибкоподвешенного груза.

#### **Обсуждение результатов (Discussions Results)**

Предлагаемый нечеткий регулятор показал хорошие демпфирующие способности при применении в системе векторного типа. В процессе исследования происходило изменение длины подвеса груза и массы груза. Изменение указанных параметров не повлияло на работоспособность предлагаемого нечеткого регулятора. На следующем этапе исследование планируется произвести внедрение разработанного нечеткого регулятора в систему с прямым управлением моментом и в скалярную систему управления, а также проанализировать работоспособность регулятора при изменении мощности двигателя.

#### **Заключение или Выводы (Conclusions)**

1. Процесс моделирования в среде MATLAB Simulink позволил изменять параметры веса груза и длины подвеса, без дополнительных затрат времени, которые бы потребовались при однотипном исследовании на реальном объекте, также моделирование позволило наглядно проанализировать процессы пуска и торможения механизма перемещения тележки с использованием предлагаемого контроллера в системе управления, внедрение контроллера дало положительные результаты.

2. Разработанная модель нечеткого регулятора в виду своей простоты не требует больших вычислительных мощностей, поэтому актуальна для использования на действующих объектах.

3. Предлагаемая система управления с разработанным нечетким регулятором автоматически реагирует на изменение угла отклонения груза, что позволяет избежать увеличения диапазона раскачивания груза.

4. Меняя параметры двигателя, также можно наглядно анализировать, для какого диапазона мощностей применим рассматриваемый регулятор.

5. Нечёткая логика позволяет гибко настроить систему управления, что позволяет получить требуемые характеристики управления.

#### **Литература**

1. Синюкова Т.В., Синюков А.В., Грачева Е.И., Kolcun M.. Нейросетевые технологии в системах управления механизмами перемещения грузов Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022 г. Т. 24. № 2. С. 107-118.

2. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V.. Neural Network Speed Observers // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, 320-324.

3. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Vladimirov O.. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020). 2020, SaintPetersburg, Russia, 220, 01059, October 29-30.

4. Klepikov V.B., Bieliaiev O.S. Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2022. 22186939.

5. Matic P.R., Blanusa B.D., Vukosavic S.N.. A novel direct torque and flux control algorithm for the induction motor drive // IEEE Electric machines and drive conference: proceedings of the International conference. 2003, Madison. Vol. 2, 965-970.

6. Tytiuk V.K., Baranovskaya M.L., Chorny O.P., Burdilynaya E.V., Kuznetsov V.V., Bogatyriov K.N. Online-Identificatin of Electromagnetic Parameters of dn Induction Motor // Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2020. Т. 63. № 5, 423-440.

7. Chorna O., Chorny O., Tytiuk V. Identification of Changes in the Parameters of Induction Motors during Monitoring by Measuring the Induction of a Magnetic Field on the Stator Surface //

Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019. 2020, 150-153.

8. Мещеряков В.Н, Сибирцев Д.С., Валтчев С., Грачева Е.И. Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 116-126.

9. Федяева Г.А., Смородова Т.В., Кочевин Д.В., Конохов Д.В. Частотно-токовая система релейно-векторного управления асинхронным электроприводом механизма передвижения мостового крана // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 4 (48). С. 91.

10. Романова Е.И., Заярный С.Л. Математические модели кранового механизма // Наука, техника, образование. 2019. №2 (24), С. 44-49.

11. Климаш В.С., Сколовский М.А. Повышение энергетической эффективности комплекса подъемных кранов // Электротехнические комплексы и системы. 2020. № 1 (46). С. 34-40.

12. Антипов А.С. Краснова С.А. Методы демпфирования колебаний груза и робастного управления ходовой тележкой мостового крана с учетом динамики электропривода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24 № 8. С. 412-420.

13. Шимкович Д.Г. Динамические нагрузки при колебаниях груза на канате // Лесной вестник. 2012. № 4. С. 141-146.

14. Кабаков А.М., Орлов А.Н. Пути уменьшения раскачивания груза грузоподъемных машин // Вестник СевГТУ. Механика, энергетика, экология. 2000. Вып. 25. С. 141 -144.

15. Корытов М.С., Щербаков В.С., Шершнева Е.О. Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана // Вестник СибАДИ. 2017. № 1(53). С. 12-19.

16. Мещеряков В.Н., Колмыков В.В., Мигунов Д.В. Реализация устройства демпфирования колебаний груза, перемещаемого мостовыми кранами на базе частотного преобразователя SINAMICS S120 // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 3. С. 48-54.

17. Круглов С.П., Аксаментов Д.Н. Адаптивное управление мостовым краном по скорости перемещения тележки // Доклады ТУСУР. – 2022. Т. 25, № 1. С. 86-92.

18. Zhang, M., Ma, X., Rong, X., et al. Adaptive Tracking Control for Double-Pendulum Overhead Cranes Subject to Tracking Error Limitation, Parametric Uncertainties and External Disturbances // Mechanical Systems and Signal Processing. 2016. Vol. 76-77. P. 15-32.

19. Круглов С. П., Аксаментов Д. Н.. Способ адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020, Т. 21, № 12, С. 682-688.

20. Пат. RU 85890 U1 Российская Федерация, МПК В66С 13/06. Устройство для автоматического гашения маятниковых колебаний груза, перемещаемого тележкой мостового крана, Щедринов А. В.; заявитель: Щедринов А. В., Сериков С. А., Колмыков В. В., Коврижкин А. А. № 2009112243/22; заявка от 02.04.2009; опубл. 20.08.2009, Бул. № 23. 2 с.

21. Пат. RU 2744647 С1 Российская Федерация, МПК В66С 13/18. Способ адаптивного управления мостовым краном, Круглов С.П., Ковыршин С.В., Аксаментов Д.Н.; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС). № 2020124779; заявка № 16.07.2020; опубл. 12.03.2021, Бул. № 8. 16 с.

#### **Авторы публикации**

**Синюков Алексей Владимирович** – аспирант кафедры «Электропривода» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, *ORCID*\*: <http://orcid.org/0000-0001-6772-5370>, e-mail: [zeitsn@yandex.ru](mailto:zeitsn@yandex.ru).

**Абдуллазянов Эдвард Юнусович** - канд. техн. наук, доцент, ректор Казанского государственного энергетического университета.

**Заруцкий Николай Николаевич** – аспирант кафедры «Электропривода» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, e-mail: [nikolay.zaruckiy@yandex.ru](mailto:nikolay.zaruckiy@yandex.ru).

**Синюкова Татьяна Викторовна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электропривода» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, *ORCID*\*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, e-mail: [stw0411@mail.ru](mailto:stw0411@mail.ru).

**Грачева Елена Ивановна** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение

## References

1. Sinyukova T.V., Sinyukov A.V., Gracheva E.I., Kolcun M. Neural Network Technologies in Control Systems of Cargo Movement Mechanisms. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2022. 24(2). P. 107-118
2. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V.. Neural Network Speed Observers // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019. P. 320-324.
3. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Vladimirov O.. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.
4. Klepikov V.B., Bieliaiev O.S. Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2022. 22186939.
5. Matic P.R., Blanusa B.D., Vukosavic S.N.. A novel direct torque and flux control algorithm for the induction motor drive // IEEE Electric machines and drive conference: proceedings of the International conference. 2003, Madison. Vol. 2. P. 965-970.
6. Tytiuk V.K., Baranovskaya M.L., Chorny O.P., Burdilynaya E.V., Kuznetsov V.V., Bogatyriov K.N. Online-Identificatin of Electromagnetic Parameters of dn Induction Motor // *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2020. 63(5). P. 423-440.
7. Chorna O., Chorny O., Tytiuk V. Identification of Changes in the Parameters of Induction Motors during Monitoring by Measuring the Induction of a Magnetic Field on the Stator Surface // *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019*. 2020. P. 150-153.
8. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S., Valtchev S., Gracheva E.I. Control System for a Frequency Synchronized Asynchronous Electric Drive // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2021. 23(3). P. 116-126.
9. Fedyaeva G.A., Smorudova T.V., Kochevinov D.V., Konokhov D.V. Chastotno-tokovaya sistema releino-vektornogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom mekhanizma peredvizheniya mostovogo krana // *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. № 4 (48). P. 91.
10. Romanova E.I., Zayarnyi S.L. Matematicheskie modeli kranovogo mekhanizma // *Nauka, tekhnika, obrazovanie*. 2019. №2 (24), P. 44-49.
11. Klimash V.S., Skolovskii M.A. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti kompleksa pod"emnykh kranov // *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy*. 2020. № 1 (46). P. 34-40.
12. Antipov A.S. Krasnova S.A. Metody dempfirovaniya kolebanii gruzа i robastnogo upravleniya khodovoi teleshkoi mostovogo krana s uchetom dinamiki elektroprivoda // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2023. 24(8). P. 412-420.
13. Shimkovich D.G. Dinamicheskie nagruzki pri kolebaniyakh gruzа na kanate // *Lesnoi vestnik*. – 2012. № 4. P. 141-146.
14. Kabakov A.M., Orlov A.N. Puti umen'sheniya raskachivaniya gruzа gruzopod"emnykh mashin // *Vestnik SevGTU. Mekhanika, energetika, ekologiya*. 2000. Vyp. 25. P. 141 -144.
15. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Shershneva E.O. Obosnovanie znachenii koeffitsientov regulyatorov gasheniya kolebanii gruzа mostovogo krana // *Vestnik SibADI*. 2017. № 1(53). P. 12-19.
16. Meshcheryakov V.N., Kolmykov V.V., Migunov D.V. Realizatsiya ustroystva dempfirovaniya kolebanii gruzа, peremeshchaemogo mostovymi kranami na baze chastotnogo preobrazovatelyа SINAMICS S120 // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2016. № 3. P. 48-54.
17. Kruglov S.P., Aksamentov D.N. Adaptivnoe upravlenie mostovym kranom po skorosti peremeshcheniya teleshki // *Doklady TUSUR*. 2022. T. 25, № 1. P. 86-92.
18. Zhang, M., Ma, X., Rong, X., et al. Adaptive Tracking Control for Double-Pendulum Overhead Cranes Subject to Tracking Error Limitation, Parametric Uncertainties and External Disturbances // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 76-77. P. 15-32.
19. Kruglov S. P., Aksamentov D. N.. Sposob adaptivnogo upravleniya mostovym kranom s pryamym otslezhivaniem peremeshcheniya gruzа // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. – 2020, 21(12). P. 682-688.
20. Pet. RU 85890 U1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B66C 13/06. Ustroystvo dlya

© Синюков А.В., Абдуллазянова Э.Ю., Заруцкий Н.Н., Синюкова Т.В., Грачева Е.И.

avtomaticheskogo gasheniya mayatnikovyykh kolebaniy gruza, peremeshchaemogo telezhkoi mostovogo krana, Shchedrinov A. V.; zayavitel': Shchedrinov A. V., Serikov S. A., Kolmykov V. V., Kovrizhkin A. A. – № 2009112243/22; zayavka ot 02.04.2009; opubl. 20.08.2009, Bul. № 23. 2 s.

21. Pet. RU 2744647 C1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK B66C 13/18. Sposob adaptivnogo upravleniya mostovym kranom, Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Aksamentov D.N.; zayavitel': Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya Irkutskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniya (FGBOU VO IrGUPS). – № 2020124779; zayavka № 16.07.2020; opubl. 12.03.2021, Bul. № 8. 16 s.

### **Authors of the publication**

**Alexey V. Sinyukov** - Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0001-6772-5370>, e-mail: zeitsn@yandex.ru.

**Edvard Yu. Abdullazyanov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Nikolay N. Zaruckiy** - Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, e-mail: nikolay.zaruckiy@yandex.ru.

**Tatyana V. Sinyukova** - Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, e-mail: stw0411@mail.ru.

**Elena I. Gracheva** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0002-5379847X>, e-mail: grachieva.i@bk.ru

*Шифр научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»*

**Получено** **12.02.2024 г.**

**Отредактировано** **21.02.2024 г.**

**Принято** **28.02.2024 г.**



## МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РОТОРОВ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Майоров<sup>1</sup> А.А., Сафин<sup>2</sup> А.Р.

<sup>1</sup>ЗАО НИЦ «ИНКОМСИСТЕМ», г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский Государственный Энергетический Университет,  
г. Казань, Россия

mayorov19977@mail.ru, sarkazan@bk.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ данного исследования заключается в том, чтобы определить наиболее эффективный метод оптимизации ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. В настоящее время синхронные электродвигатели с постоянными магнитами находят все большее применение в различных сферах. Для каждой определенной задачи необходимо разрабатывать синхронный электродвигатель с постоянными магнитами с определенными характеристиками (крутящим моментом, условиями охлаждения и т.д.). Для разработки оптимальной конструкции синхронного электродвигателя с постоянными магнитами используются различные методы оптимизации. **ЦЕЛЬ.** Обычные методы оптимизации конструкции синхронного электродвигателя с постоянными магнитами направлены на определение оптимальных значений параметризованных переменных путем их изменения в заданном диапазоне с использованием алгоритмов оптимизации. Применение такого подхода ограничивается параметризацией, которая определена опытом проектировщика и производственными ограничениями. В настоящее время вследствие развития технологий производства металлов и постоянных магнитов, аддитивных технологий, появилась возможность изготавливать металлы и постоянные магниты различных геометрических форм. Это позволило применить метод топологической оптимизации. В настоящее время топологическая оптимизация широко применяется в строительстве, а применение топологической оптимизации в проектировании синхронных электродвигателей с постоянными магнитами только сейчас получает бурное развитие. Целью является рассмотреть существующие методы оптимизации, определить плюсы и минусы каждого из методов оптимизации. **МЕТОДЫ.** При решении поставленных задач производился сравнительный анализ различных методов оптимизации роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность рассматриваемой темы. Определены наиболее эффективные методы оптимизации роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитам. Определены условия, в которых наиболее эффективно применение того или иного метода оптимизации ротора. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В статье описаны различные методы оптимизации роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами. Описаны плюсы и минусы различных методов оптимизации. После изучения различных видов оптимизации, пришли к выводу, что наиболее эффективным методом оптимизации является метод оптимизации топологии, для роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами.

**Ключевые слова:** синхронный электродвигатель с постоянными магнитами; методы оптимизации ротора; постоянные магниты; топология.

**Для цитирования:** Майоров А.А., Сафин А.Р. Методы оптимизации роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 50-65. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-50-65.

## METHODS FOR OPTIMIZING ROTORS OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS

Maivorov<sup>1</sup> AA., Safin<sup>2</sup> AR.

<sup>1</sup>REC CJSC «INCOMSYSTEM», Kazan, Russia  
<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
mayorov19977@mail.ru, sarkazan@bk.ru

**Abstract:** RELEVANCE of research is the most preferred method of efficient rotor synchronous motor with some magnets. Currently, synchronous electric motors with ethereal magnets are increasingly used in various fields. For each task, it is necessary to implement a synchronous electric motor with small magnets with desire (torque, emotional cooling and many others). In order to make the most efficient use of a synchronized motor with universal magnets, methods are applied. TARGET. The usual methods of standard design of a synchronous motor with original magnets are aimed at determining the optimal parapets to be applied by changing them at a given value using indicative algorithms. The application of this approach is limited by parameterization, which is determined by the experience of the designer and manufacturing constraints. At present, the development of technologies for the production of metals and magnets, it has become possible to manufacture metals and detect magnets of various geometric shapes. It is this use of the topological estimation method. At present, topological modernization of large-scale construction, the application of topological strategy in the design of synchronous electric motors with federal magnets is only now gaining rapid development. METHODS. When solving the tasks set, a comparative analysis of various merged for comparative analysis of various methods for comparing the rotors of synchronous electrical motors with natural magnets was carried out. RESULTS. The article describes the relevance of the topic under consideration. The most effective methods for optimizing the rotors of synchronous electrical motors with permanent magnets are determines. The conditions under which the application of one or another method oh optimizing the rotor is most effective are determined. CONCLUSION. The article describes various method for optimizing the rotors of permanent magnet synchronous motors. The pros and cons of various optimization methods are described after studying various types of optimizations, it was concluded that the most effective optimization method is the topology optimization method for rotors of permanent magnets synchronous motors.

**Keywords:** synchronous electric motor with permanent magnets; rotor optimization methods; permanent magnets; topology.

**For citation:** Maiorov AA., Safin AR. Methods for optimizing rotors of synchronous electric motors with permanent magnets. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (3): 50-65. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-50-65.

### **Введение (Introduction)**

Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами применяют во многих сферах. В настоящее время из-за энергетических и экологических проблем к электродвигателям выставляют жесткие требования. Применение более энергоэффективных, экономичных электродвигателей позволит уменьшить вред, наносимый применением, изготовлением электродвигателей. При проектировании синхронных электродвигателей с постоянными магнитами следует найти компромиссы между эффективностью, удельной мощностью и стоимостью электрической машины. В своей работе [1] Bramerdorfer G., Tapia J.A., Pyrhonen J.J., Cavagnino A. рассматривают различные методы оптимизации конструкций электрических машин и определили особенности популярных подходов оптимизации электрических машин. В большинстве этих методов используется параметризованная геометрия. Однако такие методы ограничивают пространство для проектирования, поскольку компоненты могут принимать форму только в пределах указанного параметра. Кроме того, подход опирается на опыт проектировщика при разработке параметризации, в свою очередь проектировщик подвержен предвзятости.

Оптимизация топологии может преодолеть ограничения параметрической оптимизации, позволяя более свободно исследовать проектное пространство. Впервые эта методика была предложена для решения проблем в проектировании конструкций. Существует большое количество статей по топологической оптимизации. В работе [2] авторы Deaton J.D., Grandhi R.V. рассматривают структуру топологической оптимизации. В работе [3] авторы Jian Z., Zhibin W., Haiqiang L. описывают метод оптимизации синхронных электродвигателей. В работе [4] авторы Ле, Нго Фьонг применяют метод генетической оптимизации при оптимизации ротора синхронного электродвигателя с постоянными

магнитами. В работе [5] авторы Sigmund S., Maute K. рассматривают различные подходы при топологической оптимизации. В работе [6] авторы Escgenauer H.A., Olhoff N. проводят обзор топологической оптимизации для сплошных структур. В работе [7] авторы Zargham S., Ward T.A., Ramil R., Bedruddin I.A. провели обзор метода топологической оптимизации при вибрации. Не так давно топологическая оптимизация была адаптирована для применения в электрических машинах. В работе [8] авторы Guo F., Brown I.P. рассматривают оптимизацию синхронной реактивной машины топологическим и структурным методом. В работах [9, 54, 55] автор Петров Т.И. рассмотрел возможность оптимизации синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе приводного комплекса. В работе [10] авторы Garibaldi M., Gerada C., Ashcroft I., Hague R. рассматривают применение аддитивных технологий при производстве сердечников электрических машин. В работе [11] авторы Sato T., Watanade K., Igarashi H. рассматривают возможность много материальной оптимизации.

*Цель работы:* обзор и выбор наиболее эффективных методов оптимизации ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. Определение условий для применения того или иного метода оптимизации ротора.

*Теоретическая значимость исследования:* заключается в том, чтобы выбранные методы оптимизации позволяли эффективно и быстро выполнять работы, связанные с проектированием или оптимизацией электродвигателей с постоянными магнитами.

*Практическая значимость:* полученные результаты оптимизации конструкции электродвигателя использовать на предприятиях, связанных с изготовлением и проектированием электродвигателей. Это позволит организациям получать эффективные конструкции электродвигателей, характеристики которых наиболее схожи с требуемыми характеристиками.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

Топологическая оптимизация направлена на оптимизацию, расположения материалов в пределах заданного проектного пространства, для получения наилучшего соответствия заданным параметрам электрической машины. Топологическая оптимизация дает большую степень свободы по сравнению с параметризованной формой оптимизации, так как компоненты исследования могут принимать любую форму в пределах оптимизируемого пространства.

Для более детального сравнения параметрической оптимизации и топологической оптимизации рассмотрим пример проектирования ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (рис. 1). На рис. 1а представлена параметризованная оптимизация с пятью переменными (радиусом ротора ( $r_p$ ), расстояние до магнита ( $r_m$ ), угол, под которым находится магнит ( $a_m$ ), ширина магнита ( $t_m$ ) и длина магнита ( $w_m$ )). Радиус ротора  $r_p$  будет фиксированным и будет зависеть от воздушного зазора между статором и ротором, и внутренним диаметром статора. Остальные параметры (расстояние до магнита ( $r_m$ ), угол, под которым находится магнит ( $a_m$ ), ширина магнита ( $t_m$ ) и длина магнита ( $w_m$ )) будут изменяться с учетом определённых ограничений. Этими ограничениями могут быть плотность крутящего момента, стоимость, эффективность и так далее. Пространство проектирования для параметрической оптимизации представляет собой диапазон значений параметров, указанных на рис. 1а. Ротор будет иметь оптимальную форму такую же, как и представлено на рис. 1а.

Пример проектного пространства для синхронного электродвигателя с постоянными магнитами для топологической оптимизации представлен на рис. 1б. В этом случае радиус ротора ( $r_p$ ) определяется на основании проектных требований (но может быть определен посредством параметрической оптимизации). Затем ротор подразделяется на несколько подобластей или элементов. Каждому из полученных подобластей или элементов ротора задается материал (воздух, железо, постоянный магнит) и оцениваются характеристики полученной конструкции. Распределение материалов изменяется с учетом определённых ограничений до тех пор, пока цели проектирования не будут достигнуты.

На рис. 1с представлена возможная оптимальная схема топологической оптимизации. Видно, что конструкция ротора имеет нетрадиционную форму постоянных магнитов и нерегулярные пустоты. Эти пустоты не охватываются параметрической оптимизацией, показанной на рис. 1а. Топологическая оптимизация позволяет тщательно изучить проектное пространство и не ограничивается параметризацией, которая зависит от опыта проектировщика. Использование алгоритмов оптимизации на основе популяции приводит к значительной вычислительной нагрузке, по сравнению топологической оптимизацией. Применение метода топологической оптимизации позволяет оптимизировать и минимизировать время проектирование синхронных электродвигателей с постоянными

магнитами. Проблемой топологической оптимизации является конструкция: при топологической оптимизации есть вероятность получения элементов нетрадиционной геометрической формы. Нетрадиционная геометрическая форма может создать серьезную проблему при производстве элементов с использованием традиционных технологий. Результаты сравнения параметрической и топологической оптимизации представлены в таблице 1.

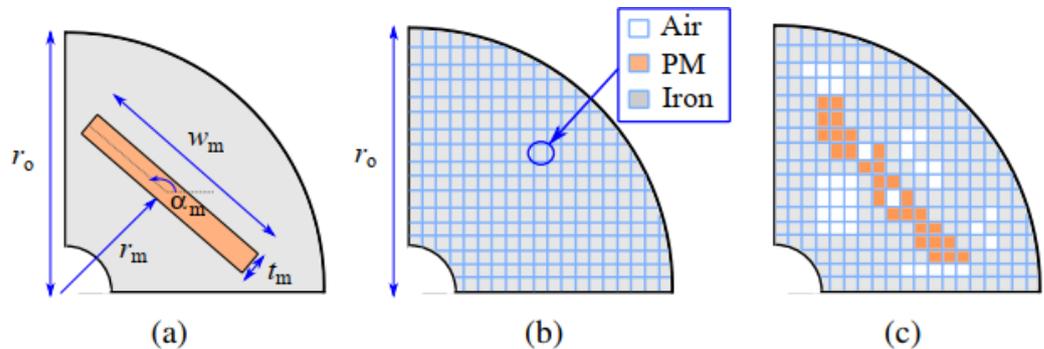


Рис. 1. Пример ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами: (а) параметрическая оптимизация; (б) топологическая оптимизация; (с) возможная оптимизированная топология ротора

Fig.1. An example of a permanent magnet synchronous motor rotor: (a) parametric optimization; (b) topological optimization; (c) possible optimized rotor topology

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таблица 1  
Table 1

Сравнение параметрической и топологической оптимизации  
Comparison of parametric and topological estimation

Параметр	Параметрическая оптимизация	Топологическая оптимизация
Зависимость от опыта проектировщика	Да	Нет
Возможность получения нестандартных конструкций	Нет	Да
Простота реализации	Да	Нет (более сложная чем параметрическая оптимизация)

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Недавние достижения в области аддитивного производства металлов позволяют изготавливать компоненты электрических машин с нетрадиционной геометрической формой, полученные в ходе топологической оптимизации. Существует большое количество статей по применению аддитивных технологий в конструкции электрических машин. Так в работе [12] авторы Вавилов В.Е., Исмагилов Ф.Р., Зайнагутдинова Э.И. рассмотрели возможность применения аддитивных технологий при производстве электрических машин. В работе [13] авторы Swensen J.P., Odhner L.U., Araki B. and Dollar A.M. описывают способы изготовления деталей с низкой температурой плавления для электрических машин. В работе [15] авторы Lamichhane T.N., Sethuraman L., Dalagan A., Wang H., Keller J., Paranthaman M.P. провели обзор технологий аддитивного производства магнитов для электродвигателей. В работе [16] авторы Wrobel R., Mecrow B. провели обзор применения аддитивных технологий при изготовлении электродвигателей. В работе [18] авторы Li L., Tirado A., Nlebedim I., Rios O., Post B., Kunc V., Lowden R., Lara-Curzio E., Fredette R., Ormerod J., et al. рассматривают возможность аддитивного производства высокопроизводительных магнитов для электродвигателей. В работе [19] авторы Volegov A., Andreev S., Selezneva N., Ryzhilin I., Kudrecatykh N., Madler L., Okulov I. рассмотрели возможность изготовления постоянных магнитов, без применения редкоземельных элементов, с помощью аддитивных технологий. В работе [20] авторы White H., Kassen A.G., Simsek E., Tang W., Ott R.T., Anderson I.E. рассматривают возможность изготовления постоянных магнитов из AlNi для электродвигателей. В работе [14] авторы Сафин А.Р., Ranjan Kumar Behera. представили всесторонний обзор современных достижений в области аддитивного производства и интеграция аддитивных при изготовлении электрических машин. В работе [17] авторы Pham T., Kwon P., Foster S. рассмотрели аддитивное производство магнитных материалов для использования в электрических машинах.

Результаты этих работ показывают, что современные достижения в области аддитивного производства позволяет изготавливать магнитные компоненты с лучшими характеристиками чем магнитные компоненты, изготавливаемые стандартными методами. В работе [18] авторы предложили метод аддитивного производства большой площади (ВААМ), который использовался бы для производства магнитов из неодима (NdFeB). Авторы приходят к выводу, что с помощью производства большой мощности можно изготавливать постоянные магниты с остаточной намагниченностью до 0,51 Тл. В тоже время результаты работ [14, 18] демонстрируют, что магнитные и механические характеристики магнитов, изготовленных по методу ВААМ, конкурентоспособны с обычными магнитами, а в некоторых случаях превосходят их.

#### **Результаты и обсуждение (Results and Discussions)**

Основная цель многих исследований, связанных с топологической оптимизацией, сосредоточенных на электрических машинах, заключается в том, чтобы получить как можно большее значение крутящего момента. Топологическая оптимизация синхронных реактивных машин многими авторами рассматриваются более активно, чем топологическая оптимизация других электрических машин. Так в работе [21] авторы Korman O, Di Nardo M., Degano M., Gerada C рассматривают топологическую оптимизацию синхронных реактивных машин. В работе [22] авторы Lolova I., Barta J., Bramerdorfer G., Silber S. рассматривают топологическую оптимизацию реактивных машин с линейным пуском. В работе [23] авторы Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. описывают способы топологической оптимизации для вентильных реактивных двигателей. В работе [24] авторы Okamoto Y., Hoshino R., Wakao S., Tsuburaya T. рассматривают возможность применения топологической оптимизации для улучшения характеристик электродвигателя. В работе [25] авторы Sato S., Sato T., Igarashi H. описывают метод оптимизации синхронной машины при помощи гауссовой кривой. Топологическую оптимизацию геометрии статора электрических машин рассматриваются в работе [26] авторов Yamashita Y., Okamoto Y.

В настоящее время наиболее популярными методами оптимизации электрических машин являются методы:

- включения-отключения (ON-OFF);
- эволюционной оптимизации конструкции (Evolutionary Structural Optimization)/метод двунаправленной эволюционной структурной оптимизации (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization - BESO);
- SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization, метод пенализации для твердого изотропного тела);
- Level-Set (установления уровня или множества уровней).

Рассмотрим каждый из методов по отдельности.

Метод включения-отключения (ON-OFF).

Метод ON-OFF – простейший метод топологической оптимизации. Этот метод включает в себя разделение геометрии на несколько элементов, которые представляют собой элементы сетки анализа конечных элементов, также включает в себя изменение материала, назначенного каждому элементу. Метод ON-OFF относительно легко реализовать с помощью эволюционного алгоритма.

Одним из основных недостатков метода ON-OFF является то, что этот метод может привести к получению элементов сложной формы, которые трудно изготовить. Для того, чтобы избежать такого варианта было предложено использовать несколько методов фильтрации. Так в работе [27] авторы Otomo Y., Igarashi H. использовали фильтр Габора вместе с методом ON-OFF. Такой подход позволило создать конструкцию электрической машины со значительно меньшей пульсацией крутящего момента. В работе [34] авторы Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. предложили метод фильтрации, который проверяет соседство каждого элемента сетки перед назначением материала. Это позволило снизить вероятность появления пустот в проектируемом элементе. Проведённые исследования позволяют сделать вывод, что при использовании метода ON-OFF необходимо применять фильтры.

Метод ESO/BESO

Метод ESO/BESO наиболее эффективно применять при оптимизации топологии непрерывных структур, в случае, когда необходимо найти наилучшее размещение и геометрии пустот внутри области проектирования. Данный метод оптимизации можно применить не только для больших объектов, но и для очень маленьких.

Метод ESO характеризуется тем, что итерационно удаляет или добавляет конечное количество материала. Данный метод основан на определении уровня напряжений в произвольной части конструкции, для этого используется метод конечных элементов.

Материал является неэффективным в том случае, когда он имеет низкий уровень напряжения. Уровень напряжения в конструкции должен быть одинаковым. Материал, который недостаточно нагружен может быть удален, это приводит к удалению отдельных элементов конечно-элементной модели.

Уровень напряжения каждого элемента определяется сравнением напряжения определенного элемента с критическим или максимальным значением напряжения в конструкции. Если отношение напряжения элемента и максимальное напряжение конструкции меньше предельного значения (коэффициента отборки), то тогда элемент удаляется.

Анализ элементов, их удаления повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто устойчивое состояние, то есть будут отсутствовать элементы, которые имели бы напряжение ниже, чем установленное пороговое значение. Далее пороговое значение может быть изменено. Вследствие изменения порогового значения цикл обработки повторяется пока не будет достигнуто устойчивое состояние.

В работах [29-31] Xia L., Xia Q., Huang X., Xie Y.M. проводят всесторонний обзор метода BESO. Метод BESO в отличие от метода ESO дает возможность одновременно удалять и добавлять материал в область проектирования. Метод BESO достаточно прост в реализации. Особенностью метода BESO является то, что индекс чувствительности пустых элементов определяется путем линейной экстраполяции поля смещений, получаемого в результате конечно-элементного анализа. Затем заполненные элементы с минимальными значениями индекса чувствительности удаляются из структуры, а пустые элементы с наибольшими значениями чувствительности заполняются материалом. Количество удаляемых и добавляемых элементов на каждой итерации определяются двумя независимыми параметрами: отношением удаления и отношением включения.

В работе [10] авторы Garibaldi M., Gerada C., Ashcroft I., Hague R применили метод BESO, для получения максимального крутящего момента электрической машины с поверхностным расположением постоянных магнитов. Для этого авторы оптимизировали конструкцию ротора. Как видно из результатов работы максимальный крутящий момент эквивалентен минимальному запасенной магнитной энергии в сердечнике ротора.

#### Метод SIMP

Метод SIMP представляет собой метод топологической оптимизации основной идеей, которого является создание поля виртуальной плотности, представляющей аналог некоторой реальной характеристики объекта. Суть метода заключается в том, чтобы уменьшить податливость конструкции вследствие перераспределения материала в рассматриваемой области пространства при известных граничных условиях. В результате применения метода SIMP получается равнопрочный объект.

Метод SIMP получил широкое применение в аддитивных технологиях. Метод SIMP является одним из самых популярных методов оптимизации и успешно используется для оптимизации электрических машин. Так в работе [32] авторы Guo F., Salameh S., Krishnamurthy M., Brown I.P. используют метод SIMP для оптимизации электрических машин. Также в работе [33] авторы Ma B., Zheng J., Lei G., Zhu J., Jin J., Guo Y. рассматривают топологическую оптимизацию ферритмагнитных компонентов электродвигателей.

В методе SIMP расчетной переменной является плотность материала. В SIMP область проектирования дискретизируется с помощью конечных элементов. Свойства материала постоянны в каждом из этих элементов и зависят от относительной плотности. Результатом применения метода SIMP должно стать то, что относительная плотность должна быть равно 1 или 0. Для исключения промежуточной относительной плотности используется фактор отбраковки.

Отношение между модулем упругости и относительной плотностью:

$$E(x_i) = E_{\min} + (x_i)^p (E_0 - E_{\min}), \quad (1)$$

где  $E_0$  – модуль упругости материала. Для численной устойчивости  $E_{\min}$  принимается за  $\frac{E_0}{1000}$ ,  $x_i$  – относительная плотность  $i$ -го элемента;  $p$  – фактор отбраковки [34].

Относительная плотность элементов берется в качестве расчетной переменной, среднее соответствие выбирается как целевая функция. В этом случае задача оптимизации топологии для минимального соответствия может быть записана в виде:

$$\text{Find: } X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}^T, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

$$\text{Minimize: } C(X) = F^T U = U^T K U = \sum_{i=1}^n u_i^T k_i u_i = \sum_{i=1}^n (x_i)^p u_i^T k_0 u_i \quad (3)$$

$$\text{Subject to: } KU = F, \quad V = f_0 v_0 = \sum_{i=1}^n x_i v_i \quad (4)$$

$$0 < x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \leq 1 \quad (5)$$

где целевая функция  $C$  определяется как среднее соответствие;  $X$  – вектор конструктивных переменных;  $X_{\min}$  и  $X_{\max}$  – минимальная и максимальная относительная плотность элементов соответственно. Целью введения ненулевого значения  $X_{\min}$  является избежание сингулярности;  $F$  – вектор нагружения;  $U$  – вектор глобального смещения;  $K$  – глимальный тензор жесткости;  $k_i$  – тензор жесткости элемента после интерполяции плотности;  $k_0$  и  $u_i$  – тензор жесткости и вектор смещения узлов элементов;  $v$  – объем материала;  $v_0$  – начальный объем расчетной области;  $F_0$  – заданное объемное отношение [35].

Минусом метода SIMP является промежуточная плотность материала. Поскольку плотность материала является непрерывной переменной, она может принимать промежуточные значения, которые являются недействительными, физически нереализуемыми. Для решения этой проблемы автор в работе [8] вводит дополнительную функцию для проницаемости:

$$u_{\Gamma} = (u_{FE} - u_{air})p^p + u_{air} \quad (6)$$

где  $u_{FE}$  и  $u_{air}$  относительная проницаемость воздуха и электротехнической стали;  $p$  – коэффициент.

В работе [32] авторы Guo F., Salameh S., Krishnamurthy M., Brown I.P. представили мульти материальную структуру оптимизации для ротора синхронной машины. Цель оптимизации заключалась в том, чтобы максимально увеличить крутящий момент и в то же время минимизировать потери в роторе с учетом ограничений по пульсации крутящего момента и плотности тока статора. В результате оптимизации авторы смогли получить прирост крутящего момента и уменьшения потерь в меди ротора примерно на 24 %.

#### Метод Level-Set

Особенностью метода Level-Set является то, что поверхность или кривая выражается в неявном виде. При этом поверхность или кривая принимаются в качестве установленного нулевого уровня многомерной функции. Затем происходит их деформация с помощью этой функции [36].

Для области исследования  $\Omega$ , которая имеет гладкие границы, предполагается, что существует неявная функция  $\phi(x)$ , которая удовлетворяет следующим условиям [37]:

$$\phi(x) \begin{cases} >0, x \in \Omega^+ \text{ (материал)} \\ =0, x \in \partial\Omega \text{ (граница)} \\ <0, x \in \Omega^- \text{ (пустота)} \end{cases} \quad (7)$$

Задачу оптимизации топологии конструкции с ограниченной площадью при минимизации податливости можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} \min C_{(\phi)} &= \int_{\Omega} \frac{1}{2} E_{(\phi)} \varepsilon^T D \varepsilon d\Omega \\ \nabla(E_{(\phi)} \varepsilon) &= f \\ \int_{\Omega} H_{(\phi)} d\Omega &= V \end{aligned} \quad (8)$$

где область проектирования представлена  $\Omega$ ;  $D$  – матрица упругости,  $V$  – допустимый объем материала;  $E$  – расчетная переменная, которая определяется поверхностью уровня:

$$E_{(\phi)} = E_0 H_{(\phi)} + (1 - H_{(\phi)}) E_{\min} \quad (9)$$

где  $E_0$  – модуль упругости материала;  $E_{\min}$  – минимальный уровень упругости.

Метод Level-Set для синхронной реактивной машины с использованием представлением сетки, подогнанной к телу, был рассмотрен авторами [38] Kuci E., Jansen M., Coulaud O. Геометрия была смоделирована как ограниченная область  $\Omega$ , состоящая из двух материалов, распределённых в области  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  без перекрытия. Метод Level-Set использовался для оптимизации компоновки катушки статора электрических машин в работе [39] Ren X., Thabuis A., Belahcen A., Perriard Y. и постоянных магнитов в работе [40] Lee J., Wang S.

Проведем сравнение методов оптимизации топологии. Метод ON-OFF и его различные варианты популярны для оптимизации топологии электрических машин. В основу этих методов лежит эвристический алгоритм. Пространство проектирования при использовании метода ON-OFF имеет примерно 1000-10000 переменных. Такое количество переменных требует значительное количество вычислительно мощности и большое количество времени. Кроме того, метод ON-OFF требует применение фильтра.

Метод BESO позволяет решить проблему «шахматной доски», которая выражается в том, что схема оптимизации модели имеет разрывы сплошности и несвязанные «островки» материала. Метод BESO предполагает анализировать на каждой итерации напряженное состояние конечных элементов. В результате этого происходит удаление менее

нагруженных элементов и добавление элементов, заполненных материалом, в области, напряженное состояние которых выше некоторых значений.

Метод SIMP требует доступ к матрице жесткости конечно-элементного анализа, которая недоступна в большинстве коммерческих программных обеспечений. Но все же встречаются программные обеспечения, в которых имеется доступ к матрице жесткости. Все же выполнить расчет методом SIMP не так просто.

Метод Level-Set применяется вместе с эволюционными алгоритмами и градиентными алгоритмами для оптимизации топологии электрических машин. В работе [41] авторы Kim Y.S., Park I.H. используют сопряженный метод для эффективного анализа чувствительности алгоритмов.

Некоторые программные обеспечения имеют в своей базе мульти физический анализ метод SIMP и метод Level-Set. Однако в большинстве программ эти методы имеют ограниченную функциональность, и подходят больше для решения структурных проблем. В таблице 2 представлен сравнительный анализ методов оптимизации топологии.

Таблица 2

Table 2

Сравнительный анализ методов оптимизации топологии

*Comparative analysis of topology optimization methods*

Параметр	Метод ON-OFF	Метод BESO	Метод SIMP	Метод Level-Set
Тип оптимизатора	Эволюционный	Градиент	Градиент	Гибкий (можно применить различные оптимизаторы)
Популярность	Средняя	Низкий	Высокий	Высокий
Время вычисления	Медленно	Быстро	Быстро	Зависит от оптимизатора
Доступность в программных обеспечениях	Нет	Нет	Да	Да

*\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.*

Так как каждый из методов оптимизации имеет как сильные стороны, так и слабые стороны необходимо рассмотреть возможность объединения различных методов в процессе оптимизации. В работе [42] Hidaka Y., Sato T., Igarashi H. использовали двухэтапный метод оптимизации. Данный метод оптимизации включал в себя метод Level-Set и метод ON-OFF. В своей работе авторы использовали метод ON-OFF для выполнения глобального поиска, а метод Level-Set для выполнения локального поиска. В месте с методом ON-OFF использовался генетический алгоритм, а для метода Level-Set использовался градиент. Hidaka Y., Sato T., Igarashi H. использовали двухэтапный метод оптимизации топологии для увеличения крутящего момента и уменьшения пульсации крутящего момента, за счет изменения распределения постоянных магнитов в роторе. В результате авторы получили снижение пульсации крутящего момента примерно на 40 % и увеличение среднего крутящего момента на 0,5 % по сравнению с конструкцией, которая была оптимизирована только с помощью метода ON-OFF. Так же в работе [43] авторы Otomo Y., Igarashi H., Hidaka Y., Komatsu T., Yamada M. применили двухэтапный метод оптимизации топологии для трехмерной конструкции в кулачковом генераторе переменного тока.

Оптимизация топологии электрических машин очень перспективное направление. В данном направлении в настоящее время существует ряд проблем. Одной из основных проблем оптимизации топологии является технологичность оптимизированных конструкций. Конструкция с оптимизированной топологией очень часто имеет неправильные элементы, например, зубчатые поверхности, прерывистое распределение материала, которые невозможно изготовить с помощью обычных технологий. Для решения этой проблемы в настоящее время существует аддитивное производство материалов, но цены на аддитивное производство очень высоки. Также при использовании аддитивных технологий тяжело достичь желаемых магнитных и структурных свойств элемента. В работе [44] авторы Tiismus H., Kallaste A., Vaimann T., Rassolkin A. рассмотрели состояние аддитивного производства электромагнитных материалов для оптимизации топологии электрических машин. Именно поэтому при оптимизации топологии электрических машин необходимо учитывать технологичность конструкции.

Методы оптимизации топологии, такие как метод ON-OFF, основанные на эволюционной оптимизации, могут представлять значительные вычислительные

требования на основе оптимизируемой геометрии. Но использование метода SIMP и метода Level-Set может снизить вычислительную нагрузку. На данный момент разрабатываются методы оптимизации топологии на основе машинного обучения. Так в работе [45] авторы Khan A., Midha C., Lowther D. описали обучение искусственного интеллекта для оптимизации конструкции электрических машин. В работе [46] авторы Sasaki H., Hidaka Y., Igarashi H. рассмотрели возможность создания нейро-сети для оптимизации электрических машин. В работе [47] Asanuma J., Doi S., Igarashi H. изучили возможность глубокого обучения для оптимизации электрических машин. Применение таких методов может позволить снизить вычислительную нагрузку на оптимизацию топологии при определении оптимальных схем.

При топологической оптимизации конструкции электрических машин улучшение электромагнитных характеристик, уменьшение объема, может привести к ослаблению конструкции электрической машины. Так, например, при оптимизации синхронного электродвигателя с постоянными магнитами или синхронной реактивной машины в роторе могут образоваться воздушные зазоры, которые могут значительно снизить прочность конструкции ротора, а также вызвать проблемы с динамикой ротора. Следовательно, при оптимизации топологии необходимо учитывать требования по структуре, чтобы гарантировать, что оптимизированная геометрия будет механически надежной.

В работе [51] авторы Hiruma S., Ohtani M., Soma S., Kubota Y., Igarashi H. предложили гибридную оптимизацию, объединяющую параметрическую оптимизацию и оптимизацию топологии. В работе [52] Credo A., Fabri G., Villani M., Popescu M. применили аналогичную технологию для гибридной оптимизации, которая объединяет параметрическую и топологическую оптимизацию для оптимизации формы ротора синхронной реактивной машины. Авторы в начале для определения топологии ротора использовали метод SIMP. Затем топология использовалась для получения параметрической модели. Полученная параметрическая модель использовалась для окончательной магнито-структурной оптимизации.

*Выбор метода оптимизации для усовершенствования конструкции ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами.*

При проектировании конструкции ротора электродвигателя перед проектировщиком могут стоять следующие задачи:

- 1) Улучшение существующей конструкции ротора т.е. проектировщик будет ограничен существующими размерами ротора, превышать которые нельзя;
- 2) Спроектировать новый электродвигатель, при этом проектировщику известно только примерные характеристики электродвигателя.

Если проектировщику необходимо усовершенствовать существующий электродвигатель (конструкцию ротор) наиболее эффективным методом оптимизации в этом случае будут параметрический метод.

В случае, когда у проектировщика стоит задача спроектировать полностью новый электродвигатель, в этом случае наиболее оптимальным способом оптимизации будут – топологическая оптимизация. Топологическая оптимизация позволит расположить постоянные магниты в конструкции ротора наиболее рационально. Как писалось ранее при топологической оптимизации форма магнитов может быть трудной для изготовления. Поэтому проектировщику необходимо использовать фильтры.

В настоящее время существует большое количество программных обеспечений в библиотеке, которых, включены такие методы оптимизации как топологическая оптимизация и параметрическая оптимизация. К таким программным обеспечениям относятся ANSYS и COMSOL Multiphysics. Применение программных обеспечений позволит более эффективно оптимизировать конструкции электродвигателя и рационально тратить время проектировщика. На рис. 2 представлены результаты параметрической оптимизации конструкции ротора в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. На рис. 3 представлены результаты топологической оптимизации ротора синхронного реактивного электродвигателя в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. В работе [53] авторы Ситников М.А., Галунин С.А., Белыхсен Ануар рассмотрели возможность топологической оптимизации в программном обеспечении COMSOL Multiphysics.

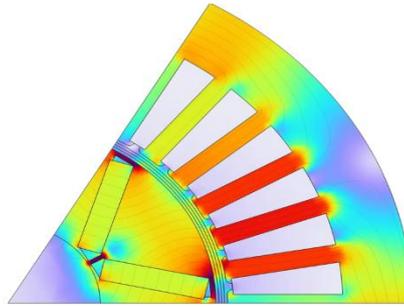


Рис. 2. Результаты параметрической оптимизации в программном обеспечении COMSOL Multiphysics

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

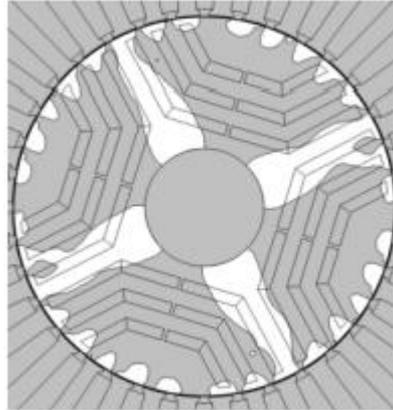


Рис. 3. Результаты топологической оптимизации синхронного реактивного электродвигателя в программном обеспечении COMSOL Multiphysics

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Чтобы выполнить параметрическую оптимизацию достаточно выбрать физику General Optimization. Из подгруппы General Optimization необходимо выбрать узел Optimization. Для проведения параметрической оптимизации можно использовать те же параметры, которые задают основные настройки модели. Например, геометрические размеры, свойства материалов, граничные условия. Параметрическое исследование с простым перебором значений позволяет получить общие данные о пространстве управляющих параметров. При проведении параметрической оптимизации геометрических размеров на каждой итерации оптимизационного решателя необходимо перестраивать расчетную сетку.

Для реализации топологической оптимизации необходимо выбрать физику General Optimization. Из подгруппы General Optimization нужно выбрать Topology Optimization. Исследование нужно выбрать Stationary. В Topology Optimization имеется узел Density Model, который используется для ограничений. В узле Density Model используется фильтр Гельмгольца. Фильтр Гельмгольца представляет собой:

$$\theta_f = R_{min}^2 \nabla^2 \theta_c + \theta_c, \quad 0 \leq \theta_c \leq 1 \quad (10)$$

$$\theta_f / R_{mil} = m_{mil}^i \nabla \theta_m^i, \quad \theta_m = [\sum_{i=1}^n ((\theta_m^i)^{-p_{mil}}) / n]^{-1/p_{mil}} \quad (11)$$

$$\theta = \frac{\tanh(\beta(\theta_m - \theta_\beta)) + \tanh(\beta\theta_\beta)}{\tanh(\beta(1 - \theta_\beta)) + \tanh(\beta\theta_\beta)} \quad (12)$$

$$\theta_p = \theta_{min} + (1 - \theta_{min})\theta^{psimp} \quad (13)$$

Уравнение 10 – это фильтр Гельмгольца, с помощью которого на основе поля управляющей переменной  $\theta_c$  рассчитывается регуляризованное поле  $\theta_f$ , характеризующееся минимальным линейным масштабом.

Уравнение 11 – это уравнение конвекции. Данное уравнение решается после применения фильтра Гельмгольца. Линейный масштаб для источникового члена уравнения

$R_{mil}$  можно задать, исходя их характерного размера элементов расчетной сетки. Параметр  $p_{mil}$  связан с объединением переменных  $\theta_m^i$ , задающих ограничения фрезерной обработки.

Параметр  $\beta$  – это угол отображения, который играет важную роль, поскольку обычно входные параметры операции отображения значительно больше 1. Коэффициент отображения  $\theta_\beta$  обычно принимается равным 0,5. Что бы избежать размытых результатов оптимизации значение параметра  $p_{simp}$  необходимо принять равным 3. Тогда как для обеспечения устойчивости значение параметра  $\theta_{min}$  должен равняться  $10^{-3}$ .

#### **Заключение (Conclusion)**

В статье были рассмотрены основные методы оптимизации топологии электрических машин. Были рассмотрены такие методы, как метод BESO и метод ESO, метод SIMP и метод Level-Set. Также был проведен сравнительный анализ методов оптимизации электрических машин.

Сравнение показало, что оптимизации топологии позволяет находить более эффективные конструкции для электрических машин, но форма полученных элементов не всегда возможно изготовить в настоящее время. Но применение аддитивные технологии, при их дальнейшем развитии и удешевление позволит создавать электрические машины с различными оптимизированными формами.

Рассмотренные выше методы оптимизации (ESO/BESO, SIMP, Level-Set, ON-OFF) имеют различные преимущества, но всех их объединяет несколько недостатков. К таким недостаткам можно отнести проблемы «шахматной доски». Проблема заключается в том, что оптимизированная конструкция имеет фрагменты, которые находятся на каком-то расстоянии от основной геометрии. Так же к недостаткам можно отнести зависимость от сеточного разбиения. Проблема появляется в результате того, что в расчётах используется различные конечные элементы, что в конечном итоге приводит к различным дефектам.

Также была рассмотрена возможность топологической и параметрической оптимизации конструкции ротора с постоянными магнитами с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics. С помощью данного программного обеспечения скорость оптимизации конструкции увеличивается во много раз. В COMSOL Multiphysics есть возможность использовать различные целевые функции и ограничения. Применение COMSOL Multiphysics позволяет в многократно упростить работу проектировщика, инженера при оптимизации конструкции.

#### **Литература**

- 1) Bramerdorfer G., Tapia J.A., Pyrhonen J.J., Cavagnino A. Modern electrical machine desing optimization: Techniques trends, and best practices // IEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65, no.10. pp. 7672-7684.
- 2) Deaton J.D., Grandhi R.V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 200 // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2014. Vol. 49, no.1, pp. 1-38.
- 3) Jian Z., Zhibin W., Haiqiang L. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor // IEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. No.10. pp. 1-11.
- 4) Ле, Нго Фьонг. Генетические алгоритм для оптимизации проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. № 1. с. 42-48.
- 5) Sigmund S., Maute K. Topology optimization approaches // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. Vol. 48, no.6, pp. 1031-1055.
- 6) Eschenauer H.A., Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: a review // Appl. Mech. Rev. 2001. Vol. 54, no.4. pp. 331-390.
- 7) Zargham S., Ward T.A., Ramil R., Bedruddin I.A. Topology optimization: review for structural designs under vibration problems // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2016. Vol. 53, no.6. pp. 1157-1177.
- 8) Guo F., Brown I.P. Simultaneous magnetic and structural topology optimization of synchronous reluctance machine rotors // IEE Transaction on Magnetic. 2020. No.10. pp. 1-12.
- 9) Петров Т.И. Топологическая оптимизация параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе приводных комплексов // Тинчуринские чтения. 2019. с. 241-244.
- 10) Garibaldi M., Gerada C., Ashcroft I., Hague R. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing // Journal of Mechanical Design. 2019. No.7. pp. 200-213.
- 11) Sato T., Watanade K., Igarashi H. Multimaterial topology optimization of electrical machines based on normalized gaussian network // IEEE transactions on magnetics. 2015. No.3, pp. 1-4.
- 12) Вавилов В.Е., Исмагилов Ф.Р., Зайнагутинова Э.И. Применение аддитивных технологий в проектировании и создании электрических машин // Проблемы и перспективы развития двигателестроения; 23-25 июня 2021 г., Самара. с. 281-282.

13) Swensen J.P., Odhner L.U., Araki B. and Dollar A.M. Injected 3D-electrical traces in additive manufactured parts with low melting temperature metals // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015. pp. 988-995.

14) Сафин А.Р., Ranjan Kumar Behera. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. №3. С. 14-33.

15) Lamichhane T.N., Sethuraman L., Dalagan A., Wang H., Keller J., Paranthaman M.P. Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines – a review // Material Today Physics. 2020. Vol. 15. pp. 250-255.

16) Wrobel R., Mecrow B. A comprehensive review of additive manufacturing in construction of electrical machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2020. Vol. 35, no. 2. pp. 1054-1064.

17) Pham T., Kwon P., Foster S. Additive manufacturing and topology optimization of magnetic materials for electrical machines – a review // Energies. 2021. Vol. 14, no. 2. pp. 283.

18) Li L., Tirado A., Nlebedim I., Rios O., Post B., Kunc V., Lowden R., Lara-Curzio E., Fredette R., Ormerod J., et al. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets // Scientific reports. 2016. Vol. 6, no. 1. pp. 1-7.

19) Volegov A., Andreev S., Selezneva N., Ryzhilin I., Kudrecatykh N., Madler L., Okulov I. Additive manufacturing of heavy rare earth free high-coercivity permanent magnets // Acta Materialia. 2020. Vol. 188. pp. 733-739.

20) White H., Kassen A.G., Simsek E., Tang W., Ott R.T., Anderson I.E. Net shape processing of alnico magnets by additive manufacturing // IEEE Transactions on Magnetics. 2017. Vol. 53. no. 11. pp. 1-6.

21) Korman O., Di Nardo M., Degano M., Gerada C. On the use of topology optimization for synchronous reluctance machines design // Energies. 2022. Vol. 15, no. 6. Pp. 3719.

22) Lolova I., Barta J., Bramerdorfer G., Silber S. Topology optimization of line-start synchronous reluctance machine. 2020 International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME). IEEE. 2020. pp. 1-7.

23) Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. Topology optimization of switched reluctance motors for the desired torque profile // Structural and multidisciplinary optimization. 2010. Vol. 42, no. 5. pp. 783-796.

24) Okamoto Y., Hoshino R., Wakao S., Tsuburaya T. Improvement of torque characteristics for a synchronous reluctance motor using mm based topology optimization method // IEEE transactions on magnetics. 2017. Vol. 54. no. 3. pp. 1-4.

25) Sato S., Sato T., Igarashi H. Topology optimization of synchronous reluctance motor using normalized gaussian network // IEEE transactions on magnetics. 2015. Vol. 51. pp. 1-4.

26) Yamashita Y., Okamoto Y. Design optimization of synchronous reluctance motor for reducing iron loss and improving torque characteristic using topology optimization based on the level-set method // IEEE Transactions on Magnetics. 2020. Vol. 56. no. 3. pp. 1-4.

27) Otomo Y., Igarashi H. Topology optimization using gabor filter: Application to synchronous reluctance motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. Vol. 57. no.6. pp. 1-4.

28) Watanabe K., Suga T., Kitabatake S. Topology optimization based on the on/off method for synchronous motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2018. Vol. 54. no. 3. pp. 1-4.

29) Xia L., Xia Q., Huang X., Xie Y.M. Bi-directional evolutionary structural optimization on advanced structures and materials: a comprehensive review // Archives of Computational Methods in Engineering. 2018. Vol. 25. no. 2. pp. 437-478.

30) Huang X., Xie M.Y. A further review of eso type methods for topology optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. Vol. 41. no. 5. pp. 671-683.

31) Querin O.M., Steven G.P., Xie Y.M. Evolutionary structural optimization (eso) using a bidirectional algorithm // Engineering computation. 1998. Vol. 15. no. 8. [p. 1031-1048.

32) Guo F., Salameh S., Krishnamurthy M., Brown I.P. Multimaterial magneto-structural topology optimization of wound field synchronous machine rotors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2020. Vol. 56. No. 4. pp. 3656-3667.

33) Ma B., Zheng J., Lei G., Zhu J., Jin J., Guo Y. Topology optimization of ferromagnetic components in electrical machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2020. Vol. 35. no. 2. pp. 786-789.

34) Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. №51. с. 51-61.

35) Sigmund O., Maute K. Struct topology optimization approaches A comparative review // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. Vol. 48. no. 6. pp. 1031-1055.

36) Liu Z., Korvink J., Huang R. Structure topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2005. Vol. 29. no. 6. pp. 407-417.

- 37) Шевцова В.С., Шевцова М.С. Сравнительный анализ метод оптимизации топологии (SIMP и Level Set) на примере реконструкции крыла стрекозы // Вестник южного научного центра. 2013. Т. 9. № 1. с. 8-16.
- 38) Kuci E., Jansen M., Coulaud O. Level set topology optimization of synchronous reluctance machines using a body-fitted mesh representation // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2021. pp. 1-17.
- 39) Ren X., Thabuis A., Belahcen A., Perriard Y. Topology optimization for coil of electric machine with level-set method // International Conference on Electrical Machines and Systems. 2019. pp. 1-4.
- 40) Lee J., Wang S. Topological shape optimization of permanent magnet in voice coil motor using level set method // IEEE Transactions on Magnetics. 2012. Vol. 48. no. 2. pp. 931-934.
- 41) Kim Y.S., Park I.H. Topology optimization of rotor in synchronous reluctance motor using level set method and shape design sensitivity // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2010. Vol. 20. no. 3. pp. 1093-1096.
- 42) Hidaka Y., Sato T., Igarashi H. Topology optimization method based on on-off method and level set approach // IEEE Transactions on magnetics. 2014. Vol. 50. no. 2. pp. 617-620.
- 43) Otomo Y., Igarashi H., Hidaka Y., Komatsu T., Yamada M. 3-d topology optimization of claw-pole alternator using gaussian-basis function with global and local searches // IEEE Transactions on Magnetics. 2019. Vol. 56. no. 1. pp. 1-4.
- 44) Tiismus H., Kallaste A., Vaimann T., Rassolkin A. State of her art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical, machines // Additive Manufacturing. 2022. P. 102778.
- 45) Khan A., Midha C., Lowther D. Reinforcement learning for topology optimization of a synchronous reluctance motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58. no.9. pp. 1-4.
- 46) Sasaki H., Hidaka Y., Igarashi H. Explainable deep neural network for design of electrical motors // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. Vol. 57. no. 6. pp. 1-4.
- 47) Asanuma J., Doi S., Igarashi H. Transfer learning through deep learning: Application to topology optimization of electrical motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2020. Vol. 56. no. 3. pp. 1-4.
- 48) Doi S., Sasaki H., Igarashi H. Multi-objective topology optimization of rotation machines using deep learning // IEEE Transactions on Magnetics. 2019. Vol. 55. no. 6. pp. 1-5.
- 49) Deng C., Wang Y., Qin C., Fu Y., Lu W. Self-directed online machine learning for topology optimization // Nature communications. 2022 Vol. 13. no.1. pp. 1-14.
- 50) Петров Т.И. Название диссертации: Методы комплексной топологической оптимизации ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами канд. тех. наук. Казань; 2021. Доступно по: <https://kgeu.ru/Document/GetDissDoc/4495d7e9-e9d7-45d7-8178-a31c0e9e1d57>. Ссылка активна на 05.02.2023.
- 51) Hiruma S., Ohtani M., Soma S., Kubota Y., Igarashi H. Novel hybridization of parameter and topology optimizations: Application to permanent magnet motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. Vol. 57. no. 7. Pp. 1-4.
- 52) Credo A., Fabri G., Villani M., Popescu M. Adopting the topology optimization in the design of high-speed synchronous reluctance motors for electric vehicles // IEEE Transactions on Industry Applications. 2020. Vol. 56. no.5. pp. 5429-5438.
- 53) Ситников М.А., Галунин С.А., Белыхсен Ануар Оптимизация топологии ротора высокосортной синхронной реактивной машины // Развивая энергетическую повестку будущего; 10-11 декабря 2021 г., Санкт-Петербург. с. 142-146.
- 54) Петров Т. И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 70-79.
- 55) Petrov T., Safin A. Modification of the synchronous motor model for topological optimization // E3S Web of Conferences, Prague, May 14–15, 2020. – Prague, 2020. – P. 01016.

#### Авторы публикаций

**Майоров Андрей Александрович** – аспирант, инженер ЗАО НИЦ «ИНКОМСИСТЕМ», г. Казань.

**Сафин Альфред Робертович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), г. Казань.

#### References

- 1) Bramerdorfer G., Tapia J.A., Pyrhonen J.J., Cavagnino A. *Modern electrical machine desing optimization: Techniques trends, and best practices. IEE Transactions on Industrial Electronics. 2018;65(10): 7672-7684.*
- 2) Deaton J.D., Grandhi R.V. *A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 200. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2014;49(1): 1-38.*
- 3) Jian Z., Zhibin W., Haiqiang L. *Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor. IEE Transactions on Industrial Electronics. 2020;10: 1-11.*
- 4) Le, Ngo Fyong. *Geneticheskie algoritm dlya optimizatsii proektirovaniya sinkhronnogo dvigatelya s inkorporirovannymi magnitami. Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika. 2017;1: 42-48. (In Russ).*
- 5) Sigmund S., Maute K. *Topology optimization approaches. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013;6: 1031-1055.*
- 6) Escgenauer H.A., Olhoff N. *Topology optimization of continuum structures: a review. Appl. Mech. Rev. 2001;4: 331-390.*
- 7) Zargham S., Ward T.A., Ramil R., Bedruddin I.A. *Topology optimization: review for structural designs under vibration problems. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2016;6: 1157-1177.*
- 8) Guo F., Brown I.P. *Simultaneous magnetic and structural topology optimization of synchronous reluctance machine rotors. IEE Transaction on Magnetic. 2020;10: 1-12.*
- 9) Petrov T.I. *Topologicheskaya optimizatsiya parametrov sinkhronnykh ehlektricheskikh mashin s postoyannymi magnitami v sostave privodnykh kompleksov. Tinchurinskiye chteniya. 2019: 241-244. (In Russ).*
- 10) Garibaldi M., Gerada C., Ashcroft I., Hague R. *Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing. Journal of Mechanical Design. 2019;7: 200-213.*
- 11) Sato T., Watanade K., Igarashi H. *Multimaterial topology optimization of electrical machines based on normalized gaussian network. IEEE transactions on magnetics. 2015;3: 1-4.*
- 12) Vavilov V.E., Ismagilov F.R., Zainagutdinova E.H.I. *Primenenie adventivnykh tekhnologii v proektirovanii i sozdanii ehlektricheskikh mashin. Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya; 23-25 iyunya 2021 g., Samara. s. 281-282. (In Russ).*
- 13) Swensen J.P., Odhner L.U., Araki B. and Dollar A.M. *Injected 3D-electrical traces in additive manufactured parts with low melting temperature metals. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015: 988-995.*
- 14) Safin A.R., Ranjan Kumar Behera. *Additivnoe proizvodstvo i optimizatsiya topologii magnitnykh materialov dlya ehlektricheskikh mashin . Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY EHNERGETIKI. 2021. 23(3): 14-33. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33.*
- 15) Lamichane T.N., Sethuraman L., Dalagan A., Wang H., Keller J., Paranthaman M.P. *Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines – a review. Material Today Physics. 2020;15: 250-255.*
- 16) Wrobel R., Mecrow B. *A comprehensive review of additive manufacturing in construction of electrical machines. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2020;35(2): 1054-1064.*
- 17) Pham T., Kwon P., Foster S. *Additive manufacturing ang topology optimization of magnetic materials for electical machines – a review. Energies. 2021;14(2): 283.*
- 18) Li L., Tirado A., Nlebedim I., Rios O., Post B., Kunc V., Lowden R., Lara-Curzio E., Fredette R., Ormerod J., et al. *Big area additive manufacturing of high performance bonded ndfeb magnets. Scientific reports. 2016;6(1): 1-7.*
- 19) Volegov A., Andreev S., Selezneva N., Ryzhilhin I., Kudrecatykh N., Madler L., Okulov I. *Additive manufacturing of heavy rare earth free high-coercivity permanent magnets. Acta Materialia. 2020;188: 733-739.*
- 20) White H., Kassen A.G., Simsek E., Tang W., Ott R.T., Anderson I.E. *Net shape processing of alnico magnets by additive manufacturing. IEEE Transactions on Magnetics. 2017;53(11): 1-6.*
- 21) Korman O, Di Nardo M., Degano M., Gerada C. *On the use of topology optimization for synchronous reluctance machines design. Energies. 2022;57(6): 3719.*
- 22) Lolova I., Barta J., Bramerdorfer G., Silber S. *Topology optimization of line-start synhromous reluctance machine. 2020 International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME). IEEE. 2020: 1-7.*
- 23) Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. *Topology optimization of switched reluctance motors for the desired torque profile. Structural and multidisciplinary optimization. 2010;42(5): 783-796.*
- 24) Okamoto Y., Hoshino R., Wakao S., Tsuburaya T. *Improvement of torque characteristics for a synchronous reluctance motor using mm abased topology optimization method. IEE transactions on magnetics. 2017;54(3): 1-4.*
- 25) Sato S., Sato T., Igarashi H. *Topology optimization of synchronous reluctance motor using normalized gaussian network. IEE transactions on magnetics. 2015;51(3): 1-4.*

- 26) Yamashita Y., Okamoto Y. *Design optimization of synchronous reluctance motor for reducing iron loss and improving torque characteristic using topology optimization based on the level-set method. IEEE Transactions on Magnetics. 2020;56(3): 1-4.*
- 27) Otomo Y., Igarashi H. *Topology optimization using gabor filter: Application to synchronous reluctance motor. IEEE Transactions on Magnetics. 2021;57(6): 1-4.*
- 28) Watanabe K., Suga T., Kitabatake S. *Topology optimization based on the on/off method for synchronous motor. IEEE Transactions on Magnetics. 2018;54(3): 1-4.*
- 29) Xia L., Xia Q., Huang X., Xie Y.M. *Bi-directional evolutionary structural optimization on advanced structures and materials: a comprehensive review. Archives of Computational Methods in Engineering. 2018;25(2): 437-478.*
- 30) Huang X., Xie M.Y. *A further review of eso type methods for topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010;41(5): 671-683.*
- 31) Querin O.M., Steven G.P., Xie Y.M. *Evolutionary structural optimization (eso) using a bidirectional algorithm. Engineering computation. 1998;15(8): 1031-1048.*
- 32) Guo F., Salameh S., Krishnamurthy M., Brown I.P. *Multimaterial magneto-structural topology optimization of wound field synchronous machine rotors. IEEE Transactions on Industry Applications. 2020;56(4): 3656-3667.*
- 33) Ma B., Zheng J., Lei G., Zhu J., Jin J., Guo Y. *Topology optimization of ferromagnetic components in electrical machines. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2020;35(2): 786-789.*
- 34) Bashin K.A., Torsunov R.A., Semenov S.V. *Metody topologicheskoi optimizatsii konstruktssii, primenyayushchiesya v aehrokosmicheskoi otrasli. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aehrokosmicheskaya tekhnika. 2017. №51. pp. 51-61.*
- 35) Sigmund O., Maute K. *Struct topology optimization ap-proaches A comparative review. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013;48(6): 1031-1055.*
- 36) Liu Z., Korvink J., Huang R. *Structure topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2005;29(6): 407-417.*
- 37) Shevtsova V.S., Shevtsova M.S. *Sravnitel'nyi analiz metod optimizatsii toplogii (SIMP i Level Set) na primere rekonstruktssii kryla strekozy. Vestnik yuzhnogo nauchnogo tsentra. 2013;9(1): 8-16 (In Russ).*
- 38) Kuci E., Jansen M., Coulaud O. *Level set topology optimization of synchronous reluctance machines using a body-fitted mesh representation. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2021: 1-17.*
- 39) Ren X., Thabuis A., Belahcen A., Perriard Y. *Topology optimization for coil of electric machine with level-set method. International Conference on Electrical Machines and Systems. 2019: 1-4.*
- 40) Lee J., Wang S. *Topological shape optimization of permanent magnet in voice coil motor using level set method. IEEE Transactions on Magnetics. 2012;48(2): 931-394.*
- 41) Kim Y.S., Park I.H. *Topology optimization of rotor in synchronous reluctance motor using level set method and shape design sensitivity. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2010;20(3): 1093-1096.*
- 42) Hidaka Y., Sato T., Igarashi H. *Topology optimization method based on on-off method and level set approach. IEEE Transactions on magnetics. 2014;50(2): 617-620.*
- 43) Otomo Y., Igarashi H., Hidaka Y., Komatsu T., Yamada M. *3-d topology optimization of claw-pole alternator using gaussian-basis function with global and local searches. IEEE Transactions on Magnetics. 2019;56(1): 1-4.*
- 44) Tiismus H., Kallaste A., Vaimann T., Rassolkin A. *State of her art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical, machines. Additive Manufacturing. 2022: 102778.*
- 45) Khan A., Midha C., Lowther D. *Reinforcement learning for topology optimization of a synchronous reluctance motor. IEEE Transactions on Magnetics. 2022;58(9): 1-4.*
- 46) Sasaki H., Hidaka Y., Igarashi H. *Explainable deep neural network for design of electrical motors. IEEE Transactions on Magnetics. 2021;57(6): 1-4.*
- 47) Asanuma J., Doi S., Igarashi H. *Transfer learning through deep learning: Application to topology optimization of electrical motor. IEEE Transactions on Magnetics. 2020;56(3): 1-4.*
- 48) Doi S., Sasaki H., Igarashi H. *Multi-objective topology optimization of rotation machines using deep learning. IEEE Transactions on Magnetics. 2019;55(6): 1-5.*
- 49) Deng C., Wang Y., Qin C., Fu Y., Lu W. *Self-directed online machine learning for topology optimization. Nature communications. 2022;13(1): 1-14.*
- 50) Petrov T.I. *Nazvanie dissertatsii: Metody kompleksnoi topologicheskoi optimizatsii rotora sinkhronnogo ehlektricheskogo dvigatelya s postoyannymi magnitami. Kazan; 2021. Available at: <https://kgeu.ru/Document/GetDissDoc/4495d7e9-e9d7-45d7-8178-a31c0e9e1d57>. Accessed; 05.02.2023. (In Russ).*

51) Hiruma S., Ohtani M., Soma S., Kubota Y., Igarashi H. *Novel hybridization of parameter and topology optimizations: Application to permanent magnet motor. IEEE Transactions on Magnetics. 2021;57(7): 1-4.*

52) Credo A., Fabri G., Villani M., Popescu M. *Adopting the topology optimization in the design of high-speed synchronous reluctance motors for electric vehicles. IEEE Transactions on Industry Applications. 2020;56(5): 5429-5438.*

53) Sitnikov M.A., Galunin S.A., Belakhzen Anuar *Optimizatsiya topologii rotora vysokosortnoi sinkhronnoi reaktivnoi mashiny. Razvivaya energeticheskuyu povestku budushchego; 10-11 dekabrya 2021 g., Saknt-Peterburg. s. 142-146. (In Russ).*

54) Petrov T.I. *Modification of the genetic algorithm for complex topological optimization of the rotor of synchronous motors. Izvestia of higher educational institutions. Energy problems. 2021;23(3):70-79. (In Russ).*

55) Petrov T., Safin A. *Modification of the synchronous motor model for topological optimization. E3S Web of Conferences, Prague. 2020;01016.*

#### **Authors of the publication**

**Andrei A. Maiorov** – Engineer REC CJSC «INCOMSYSTEM», Kazan, Russia.

**Al'fred R. Safin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Шифр научной специальности:*

*2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)*

*Смежные специальности в рамках группы научной специальности*

*2.4.5 Энергетические системы и комплексы (техническая наука)*

**Получено** **20.06.2023 г.**

**Отредактировано** **19.02.2024 г.**

**Принято** **01.03.2024 г.**



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИМУЛЯТОРА РЕЖИМОВ МИНИГРИД ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Ожулас В.А., Петрищев А.В., Фишов А.Г.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия  
agfishov@yandex.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ:* К числу основных направлений развития современной энергетики относится использование распределенной малой генерации и различных объектов на их основе с интеграцией в существующие распределительные электрические сети централизованного электроснабжения, а также цифровизация таких объектов и технологий их проектирования, подготовки персонала. **ЦЕЛЬ:** Исследуется возможность применения симулятора режимов и управления «Минигрид» (тренажера для обучения управлению режимами и подготовки оперативного персонала) в качестве средства получения интегральных показателей эффективности проектных решений при создании объектов малой генерации и их включения в сети централизованного энергоснабжения. **МЕТОДЫ:** Используется имитационное моделирование нормальных и аварийных режимов Минигрид на годовом интервале времени с помощью разработанного в НГТУ цифрового симулятора. Режимы задаются суточными графиками нагрузки, возмущения стохастическими характеристиками. Моделируется режимное, противоаварийное и оперативное управление схемой сети, генерацией с учетом возможностей автономной и параллельной с внешней энергосистемой работой Минигрид с последующим расчетом интегральных показателей технической эффективности проектных решений по вариантам генерирующего оборудования и способам управления режимами. **РЕЗУЛЬТАТЫ:** На примере характерного Минигрид рассмотрены различные проектные задачи, при решении которых по единым показателям эффективности можно оценить и выбрать предпочтительную конфигурацию локальной системы энергоснабжения. В частности, получены зависимости годового недоотпуска электроэнергии и коэффициента использования установленной генерирующей мощности электростанции от числа и мощности ее энергоблоков, режимов работы Минигрид при заданном суточном графике нагрузки. Продемонстрирована возможность расширения области применения цифрового симулятора режимов «Минигрид». **ЗАКЛЮЧЕНИЕ:** Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения симулятора для решения ряда проектных задач при создании Минигрид. Разработанный цифровой симулятор режимов «Минигрид» помимо обучения управлению режимами может использоваться как унифицированный инструмент анализа и принятия решений на стадии проектных альтернатив.

**Ключевые слова:** *распределенная малая генерация; минигрид; локальные системы энергоснабжения; электрические сети; параллельная работа; автоматика; симулятор; цифровой двойник.*

**Для цитирования:** Ожулас В.А., Петрищев А.В., Фишов А.Г. Использование симулятора режимов Минигрид для решения задач проектирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 66-82. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-66-82.

## USING A SIMULATOR OF MINIGRID MODES TO SOLVE DESIGN PROBLEMS

Ozhulas V.A., Petrishhev A.V., Fishov A.G.

**Abstract:** *RELEVANCE: The main directions of modern energy development include the use of distributed small-scale generation and various facilities based on them with integration into existing distribution electric networks of centralized power supply, as well as the digitalization of such facilities and technologies for their design, personnel training. THE PURPOSE: The possibility and effectiveness of using the Minigrad mode and control simulator (a simulator for learning mode management and training operational personnel) as a means of solving a number of design tasks when creating small-scale generation facilities and integrating them into centralized power supply networks to obtain integral indicators of its effectiveness is being investigated. METHODS: Simulation modeling of normal and emergency modes of «Minigrad» is used on an annual time interval using a digital simulator developed at NSTU. The modes are set by daily load graphs, disturbances by stochastic characteristics. The operational, emergency and operational control of the network circuit and generation is modeled, taking into account the possibilities of autonomous and parallel operation of the Minigrad with an external power system, followed by the calculation of integrated indicators of the technical efficiency of design solutions for generating equipment options and mode control methods. RESULTS: Using the example of a typical Minigrad, various design tasks are considered, in solving which, according to uniform efficiency indicators, it is possible to evaluate and select the preferred configuration of the local power supply system. In particular, the dependences of the annual undersupply of electricity and the utilization factor of the installed generating capacity of the power plant on the number and capacity of its power units, the operating modes of the Minigrad at a given daily load schedule are obtained. The possibility of expanding the scope of the digital simulator of «Minigrad» modes is demonstrated. CONCLUSION: The results obtained indicate the effectiveness of using the simulator to solve a number of design tasks when creating a Minigrad. The developed digital simulator of «Minigrad» modes, in addition to learning how to manage modes, can be used as a unified tool for analysis and decision-making at the stage of design alternatives.*

**Keywords:** *distributed small generation; minigrad; local power supply systems; power grid; parallel work; automation; simulator; digital twin.*

**For citation:** Ozhulas V.A., Petrishhev A.V., Fishov A.G. Using a simulator of Minigrad modes to solve design problems. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (3): 66-82. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-66-82.

### **Введение (Introduction)**

Децентрализованный подход к производству электроэнергии в настоящее время имеет широкое распространение во многих странах мира. Децентрализация и цифровизация энергетических комплексов создают ряд положительных свойств и полезных эффектов, как технологических, так и экономических [1-13].

Российский концепт развития распределенной малой генерации учитывает климатические и географические особенности нашей страны и предполагает использование преимущественно топливных когенерационных установок в составе локальных систем энергоснабжения (Минигрид или иначе локальных интеллектуальных энергосистем) с возможностью подключения к сетям централизованного энергоснабжения. Для осуществления параллельной работы Минигрид в составе внешней электрической сети в НГТУ была разработана и внедрена новая технология управления режимами, включающая с себя специализированные способы управления и системную автоматику [14-16].

Автоматика Минигрид представляет собой взаимодействующий комплекс противоаварийной, режимной автоматик и автооператора переходов между режимами параллельной и автономной работы, а также выбора состава работающих энергоблоков на электростанции и управления их мощностью для осуществления требуемого режима.

В связи с применением новой технологии управления энергетическим комплексом на базе системной автоматики Минигрид и его масштабирования возникла задача в своевременном и оперативном обучении персонала станций.

Для этого был разработан цифровой симулятор «Минигрид» (самобалансирующихся энергосистем малой мощности под управлением

интеллектуального программно-технического комплекса, интегрированных в сети питающих центров) [17, 18]. В работах [17, 18] представлены модели и работа цифрового симулятора «Минигрид» с интеллектуальным управлением, а также результаты их верификации, что служит основой для исследования в данной работе.

Научная значимость состоит в обосновании необходимости создания специализированных средств моделирования режимов Минигрид применительно к решению проектных задач, связанных с системой управления их режимами, и доказанной эффективностью применения для этих целей симуляторов режимов «Минигрид», дополненных методикой определения показателей интегральной эффективности альтернативных способов и систем управления. К числу таких задач могут быть отнесены:

- Обоснование оптимального числа энергоблоков на электростанции Минигрид (для автономного режима и режима с параллельной работой);
- Обоснование номинальной мощности энергоблоков на электростанции Минигрид;
- Обоснование оптимального сетевого резерва и ограничения на выдачу мощности во внешнюю сеть;
- Обоснование применения специализированной системной автоматики с автоматикой опережающего сбалансированного отделения (АОСД) на электростанции Минигрид;
- Обоснование структурных решений в схеме выдачи мощности (подключение к внешней сети через РП или напрямую электростанции);
- Обоснование целесообразности использования режимов с разделением сети Минигрид и электростанции на две части.

На ранних стадиях проектное исследование имеет многовариантную структуру возможных решений. Это сопровождается большим объемом расчетных условий и информации, определяющих рациональность и адекватность реализации того или иного варианта. При этом проработка всех возникающих вариантов в процессе исследования может сопровождаться значительными изменениями в расчетных моделях, что существенно замедляет и усложняет процесс поиска оптимального решения.

Практическая значимость состоит в получении характеристик и зависимостей, позволяющих снизить трудозатраты и повысить обоснованность принимаемых проектных решений по системам управления режимами Минигрид.

Актуальность и состояние работ по выявлению и оценке эффектов от интеграции малой генерации, в т.ч. Минигрид, в электрические сети представлены во множестве публикаций, в частности [13-29].

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

Цифровой симулятор используется как специализированное средство моделирования оперативного, автоматического режимного и противоаварийного управления Минигрид. В основе моделирования и управления лежит отслеживание характерных структурных графиков нагрузки, выбор состава работающего генерирующего оборудования с учетом требования к резервированию, имитация воздействия расчетных возмущений в каждом часе графика нагрузки, фиксация их последствий с учетом автоматического противоаварийного и диспетчерского управления по восстановлению электроснабжения потребителей и нормального режима.

Расчетные возмущения с вероятностями их возникновения в совокупности с задаваемыми суточными графиками по продолжительности режима с учетом имитации их последствий позволяют вычислить вероятностные интегральные показатели эффективности работы Минигрид, таких как:

- Коэффициент использования установленной мощности станции (КИУМ);
- Годовой (вероятностный) недоотпуск электроэнергии;
- Вероятное число аварийных отключений энергоблоков;
- Вероятное число аварийных отключений нагрузок;
- Вероятное число аварийных погашений электростанции.

На их основе могут быть выполнены расчеты зависимых экономических показателей, имеющих стоимостное или иное выражение эффективности Минигрид [22-29], например:

- Коэффициент полезного использования топлива (КПИТ);
- Индикативные показатели надежности;
- Показатели качества электроэнергии;
- Капитальные вложения;

- Годовые эксплуатационные расходы;
- Затраты на резерв генерации;
- Срок окупаемости инвестиций.

Симулятор позволяет формировать различные объекты с малой генерацией, режимы их работы и способы управления для моделирования благодаря своей многовариантной структуре. В частности, в таблице 1 приведены варианты режимов и способов управления, представленные в данной работе.

Таблица 1

Варианты режимов и особенностей противоаварийного управления Минирид

№	Режим Минирид и способы противоаварийного управления	Особенности	Наиболее значимые свойства	Особенности надежности и экономической эффективности
1	Работа в автономном режиме	Основными источниками надежного энергоснабжения являются энергоблоки электростанции Минирид	Независимость от внешней сети	Необходимость размещения и поддержания значительной избыточной (резервной) генерирующей мощности. Низкое использование установленной мощности
2	Параллельная работа с внешней электрической сетью с режимом выдачи свободной генерирующей мощности во внешнюю сеть и с использованием обычных защит и противоаварийной автоматики	Основными источниками надежного энергоснабжения являются энергоблоки электростанции Минирид и внешняя электрическая сеть. Безопасность параллельной работы обеспечивается традиционным	Обеспеченная надежность электроснабжения потребителей и работы электростанции за счет сетевого резерва. Возможность выдачи избытков мощности и энергии Минирид во внешнюю сеть.	Необходимость в большом сетевом резерве.
3	Параллельная работа с внешней электрической сетью и с использованием АОСД	Основными источниками надежного энергоснабжения являются энергоблоки электростанции Минирид под противоаварийным управлением АОСД	Обеспеченная надежность электроснабжения потребителей и работы электростанции за счет опережающего противоаварийного сбалансированного отделения Минирид от внешней сети. Возможность выдачи избытков мощности и энергии в сеть	Необходимость в специализированном оперативном, режимном и противоаварийном управлении

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для проведения расчетов использованы данные Минирид на основе газопоршневой электростанции с шестью синхронными генераторами (по 2 МВт каждый), подключенными к секционированной шине, имеющей связь с внешней сетью через распределительный пункт, рисунке 1.

Характерный суточный график нагрузки представлен на рисунке 3. График сформирован таким образом, чтобы в часы максимума обеспечивался вращающийся резерв по критерию  $(n - 1)$ . Суммарный суточный график получен суммированием 9 однотипных нагрузок (рис.1 В21-В29) и одной (В20) постоянной, представляющей собственные нужды электростанции.

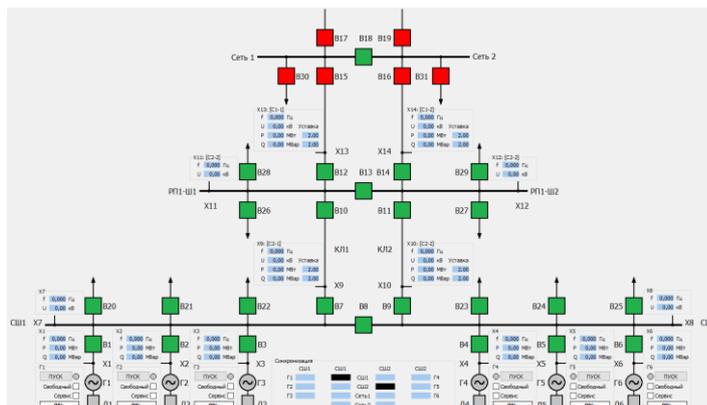


Рис. 1. Видеокадр симулятора со схемой Fig. 1. Video frame of the simulator with a Минигрид Minigrad scheme

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

*Моделирование режимов Минигрид при автономной работе*

Каждый час суточного графика нагрузки характеризуется своей вероятностью и продолжительностью прерывания электроснабжения потребителей (отключение хотя бы одной нагрузки) в случае отсутствия резервной мощности на электростанции при расчетном аварийном возмущении (отключении работающего энергоблока).

Согласно рис.2 факт отключения нагрузки, ее величина и продолжительность является следствием сочетания условий:

- Общей загрузки станции;
- Наличия вращающегося резерва;
- Наличия резервных или свободных энергоблоков;
- Вероятности нахождения одного энергоблока в ремонте.

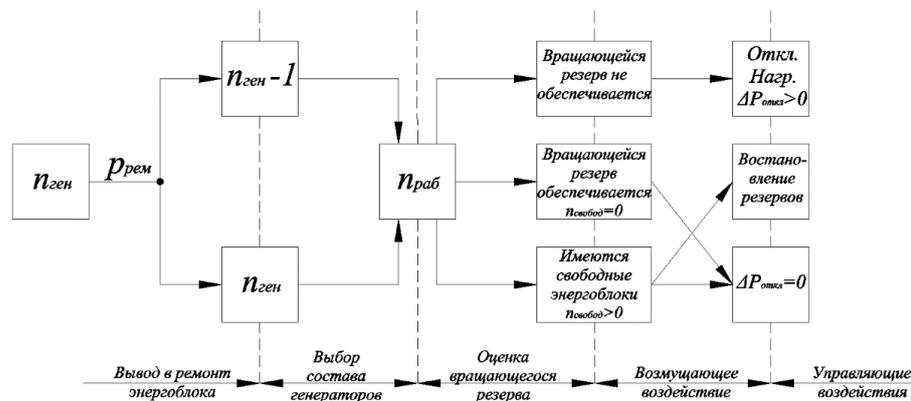


Рис. 2. Структура процесса изменения числа работающих энергоблоков в нормальном режиме, в а также в послеаварийном с учетом возможных отключений нагрузок, где:

$n_{ген}$  - число установленных энергоблоков,  
 $n_{раб}$  - минимальное число энергоблоков для покрытия нагрузки с учетом требования n-1

Fig. 2. The structure of the process of changing the number of operating power units in normal mode, as well as in post-emergency mode, taking into account possible load shutdowns, where:

$n_{ген}$  - the number of installed units at the power plant,  
 $n_{раб}$  - the minimum number of power units to cover the load, taking into account the requirement n-1

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Расчет показателей для автономного режима Минигрид производится на основе симуляции режимов и возмущений с суточным графиком нагрузки, для которого определен необходимый минимальный состав энергоблоков для покрытия нагрузки. На рисунке 3 представлено распределение требуемого минимального состава для станции с шестью энергоблоками, при ремонте одного из них.

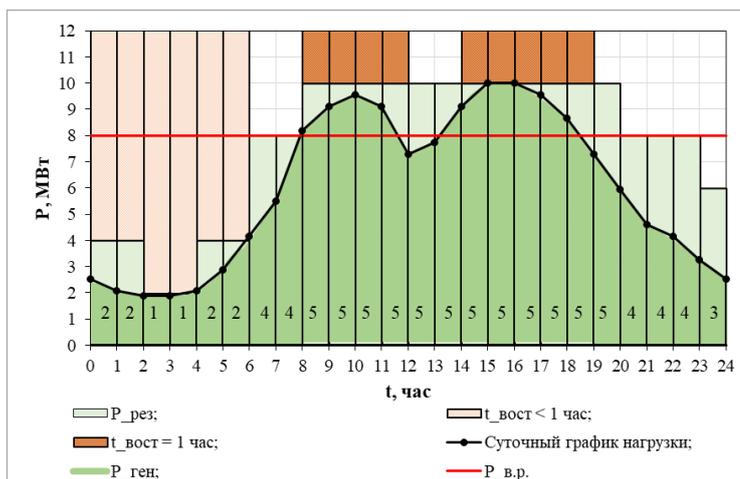


Рис. 3. Распределение минимально необходимого состава энергоблоков для покрытия нагрузки при ремонте одного энергоблока на станции, где:  
 $P_{ген}$  - загрузка генераторов, при выбранном количестве агрегатов для несения нагрузки;  
 $P_{рез}$  - оперативный (горячий) резерв генераторов, при выбранном количестве агрегатов для несения нагрузки;  
 $t_{вост}$  - время восстановления электроснабжения отключенных потребителей;  
 $P_{в.р.}$  - предельная величина загрузки станции, при которой возможен вращающийся резерв

Рис. 3. Distribution of the minimum required composition of power units to cover the load during the repair of one power unit at a station where:  
 $P_{ген}$  - loading of generators, with a selected number of units to carry the load;  
 $P_{рез}$  - operational (hot) reserve of generators, with a selected number of units to carry the load;  
 $t_{вост}$  - time to restore power supply to disconnected consumers;  
 $P_{в.р.}$  - the maximum load value of the station at which a rotating reserve is possible

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Часы, где  $t_{вост} < 1$  час, характеризуются невозможностью сформировать вращающийся резерв по условию технологического минимума загрузки энергоблоков (при наличии свободных агрегатов). В таких случаях:

- прерывание электроснабжения части потребителей при аварийном отключении работающего энергоблока производится на время ввода в работу свободного энергоблока;
- уменьшение числа установленных агрегатов на станции при неизменяемой установленной мощности ведет к увеличению таких часов;
- увеличение числа установленных агрегатов – к уменьшению часов.

Из рис.3 видно, что во время ремонта одного энергоблока загрузка станции, при которой возможен вращающийся резерв, составляет 8 МВт. Что в свою очередь приводит к отсутствию вращающегося резерва в пиковые часы нагрузки. Аварийное отключение в эти часы повлечет за собой небаланс мощности, устранимый лишь отключением части нагрузки с продолжительностью в 1 час. Однако увеличение числа установленных агрегатов на станции при неизменяемой установленной мощности, влечет к уменьшению таких часов и, наоборот, при уменьшении их числа.

#### Моделирование режимов Минигрид при параллельной работе с внешней сетью

Режим параллельной работы позволяет получить существенные положительные технические и экономические эффекты для всех участников – генерации, региональной электрической сети, потребителей. Однако параллельная работа присоединенной электростанции с сетью сопряжена с рядом рисков, связанных с их плохой электромеханической совместимостью, которые должны быть устранены при объединении. Поэтому при проектировании (модернизации) объектов малой генерации данный вариант должен быть полноценно обоснован.

Структуры процесса изменения числа работающих энергоблоков в характерных режимах Минигрид представлены на рис. 4 и 5. В соответствии с этими структурами факт отключения нагрузки, ее величина и продолжительность является следствием сочетания условий:

- Общей загрузки станции;
- Наличия свободных энергоблоков;

- Установившегося режима выдачи мощности в сеть;
- Возможности передачи мощности через контролируемое сечение.

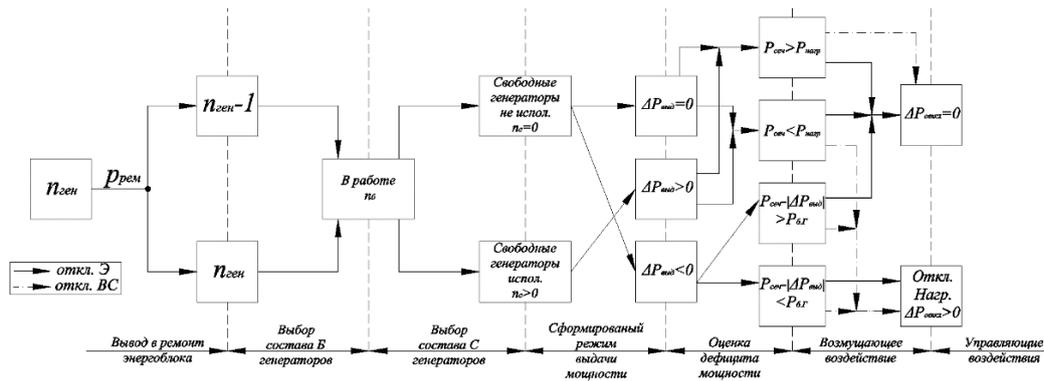


Рис. 4. Структура процесса изменения числа работающих энергоблоков в нормальном режиме, а также в послеаварийном с учетом возможных отключений нагрузок при параллельной работе Минирид с ВС без АОСД, где:

$n_{ген}$  - число установленных энергоблоков на электростанции;  
 $n_б$  и  $n_с$  - число работающих балансирующих и свободных энергоблоков;  
 $P_{б.г}$  - загрузка одного балансирующего энергоблока

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 4. The structure of the process of changing the number of operating power units in normal mode, as well as in post-emergency mode, taking into account possible load shutdowns during parallel operation of the Minigrig with external grid without AOSD, where:

$n_{ген}$  - the number of installed power units at the power plant;  
 $n_{б}$  и  $n_с$  - the number of working balancing and free power units;  
 $P_{б.г}$  - loading of one balancing power unit

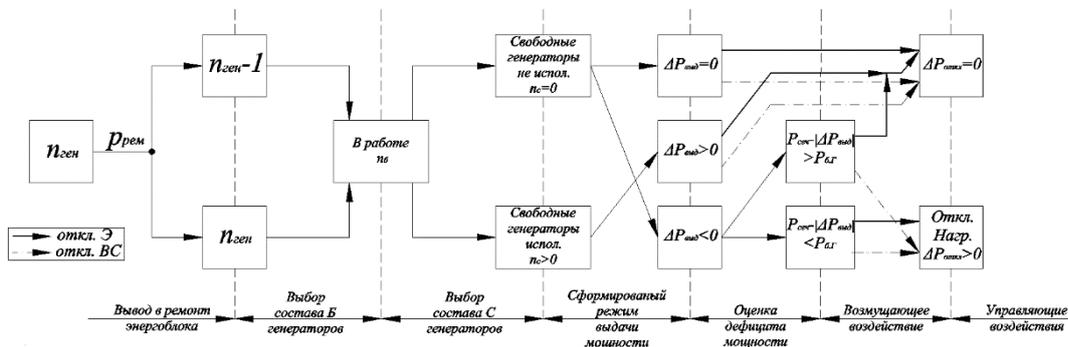


Рис. 5. Структура процесса изменения числа работающих энергоблоков в нормальном режиме, а также в послеаварийном с учетом возможных отключений нагрузок при параллельной работе Минирид сведенной в работу АОСД, где:

$n_{ген}$  - число установленных блоков на электростанции;  
 $n_б$  и  $n_с$  - число работающих балансирующих и свободных энергоблоков;  
 $P_{б.г}$  - загрузка одного балансирующего энергоблока

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 5. The structure of the process of changing the number of operating power units in normal mode, as well as in post-emergency mode, taking into account possible load shutdowns during parallel operation of the Minigrig with the AOSD introduced into operation, where:

$n_{ген}$  - the number of installed units at the power plant;  
 $n_{б}$  и  $n_с$  - the number of working balancing and free power units;  
 $P_{б.г}$  - loading of one balancing power unit

На рис.6 представлено распределение необходимого минимального числа балансирующих энергоблоков и максимального числа свободных энергоблоков при ремонте одного энергоблока в режиме параллельной работы Минирид с внешней сетью.

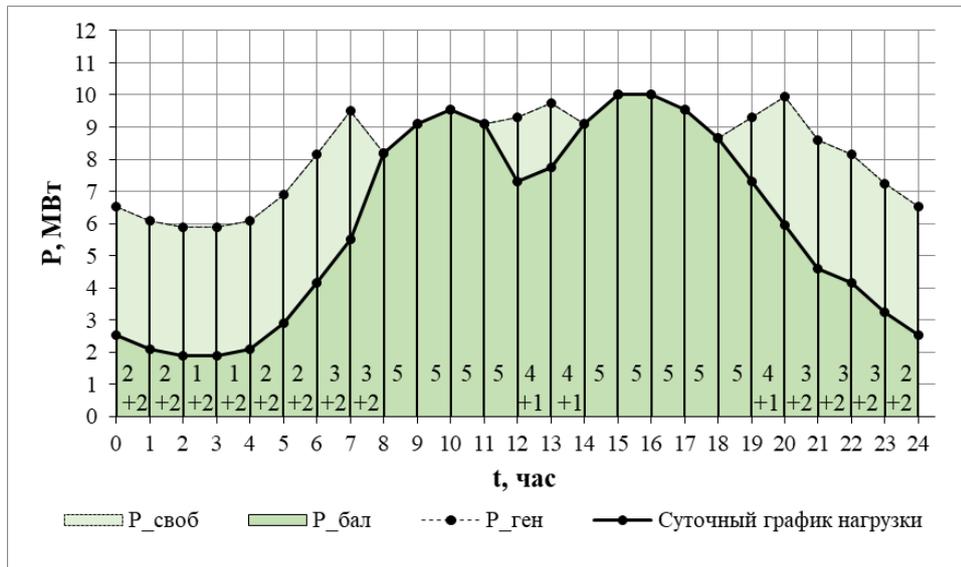


Рис. 6. Распределение минимально необходимого состава энергоблоков для покрытия нагрузки при ремонте одного энергоблока на станции при параллельной работе Миниригид с ВС в нормальном режиме, а также в послеаварийном с учетом возможных отключений нагрузок, где:

$P_{своб}$  - загрузка свободных генераторов при минимальном числе агрегатов для несения нагрузки;  
 $P_{бал}$  - загрузка балансирующих генераторов при минимальном числе агрегатов для несения нагрузки;  
 $P_{ген}$  – график генерируемой мощности станции

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рис. 6. Distribution of the minimum required composition of power units to cover the load during the repair of one power unit at the station during parallel operation of the Mini-hybrid with the aircraft in normal mode, as well as in post-emergency mode, taking into account possible load shutdowns, where:

$P_{своб}$  - loading of free generators with a minimum number of units to carry the load;  
 $P_{бал}$  - loading balancing generators with a minimum number of units to carry the load;  
 $P_{ген}$  – the graph of the generated power of the station

Поскольку время работы АВР в симуляторе не превышает 1 секунды неотпущенной при этом электроэнергии можно пренебречь. При параллельной работе Миниригид без АОСД для определения возможного прерывания электроснабжения потребителей учитывается отказ как энергоблока, так и внешней сети с учетом следующих комбинаций представленных в табл.2.

Таблица 2  
 Комбинация отказов, во время ремонта одного энергоблока, при которых необходимо отключение нагрузки

Час	Необходимость в отключении нагрузки							
	Откл. энергоблока		Откл. внеш. сети		Откл. Э + Откл. ВС		Откл. ВС + Откл. Э	
	без АОСД	с АОСД	без АОСД	с АОСД	без АОСД	с АОСД	без АОСД	с АОСД
0	X		X		X		X	V
1	X		X		X		X	V
2	X		X		X		X	V
3	X		X		X		X	V
4	X		X		X		X	V
5	X		X		X		X	V
6	X		V	X	V	X	V	X
7	X		V	X	V	X	V	X
8	X		V	X	V		V	
9	X		V	X	V		V	
10	X		V	X	V		V	
11	X		V	X	V		V	
12	X		V	X	V	X	V	X
13	X		V	X	V	X	V	X
14	X		V	X	V		V	

Час	Необходимость в отключении нагрузки							
	Откл. энергоблока		Откл. внеш. сети		Откл. Э + Откл. ВС		Откл. ВС + Откл. Э	
	без АСОД	с АСОД	без АСОД	с АСОД	без АСОД	с АСОД	без АСОД	с АСОД
15	X		V	X		V		V
16	X		V	X		V		V
17	X		V	X		V		V
18	X		V	X		V		V
19	X		V	X	V	X	V	X
20	X		V	X	V	X	V	X
21	X		V	X	V	X	V	X
22	X		V	X	V	X	V	X
23	X		X		X		X	

\* X – отключение нагрузки не требуется; V – требуется отключение нагрузки.

\*\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из таблицы 2, видно, что в режиме параллельной работе без АСОД отключение нагрузки возможно только при условии аварийного возмущения во внешней сети (проходящее КЗ), при этом время восстановления электроснабжения будет напрямую зависеть от времени включения энергоблоков после работы АВР. В режиме параллельной работе с АСОД отключение нагрузки возможно только при сочетании отключения от внешней сети и отключения одного энергоблока на станции, с условием ремонтного состояния одного из энергоблоков. При этом время восстановления электроснабжения будет аналогичным автономному режиму.

#### Результаты (Results)

При моделировании поведения Минирида и расчете показателей эффективности принимались следующие условия и ограничения:

Для режима автономной работы:

- Суточный график нагрузки принимался общим для всех дней в году;
- Загрузка энергоблоков должна находиться в разрешенной технологической зоне  $-0,5 \cdot P_{ном} \leq P_{г} \leq P_{ном}$ ;
- Продолжительность нахождения в ремонте одного энергоблока - 1 месяц (бл. \* 1 мес. = 6 мес.), тогда вероятность нахождения энергоблока в ремонте в любой момент времени в течение года  $- p_{рем} = \frac{6}{12} = 0,5$ ;
- Закон распределения всех случайных событий равномерный;
- Число аварийных отключений энергоблока - 2 раза в месяц;
- Максимальное время отключения потребителей при веерном ограничении или при восстановлении генератора, находящегося в ремонте, не более 1 часа;
- Допустимое время работы энергоблока с перегрузкой - 5 с;
- Допустимое время работы энергоблока с недогрузкой - 3 мин;
- В качестве расчетного аварийного возмущения принималось отключение одного работающего энергоблока.

Для режима параллельной работы, помимо представленного выше:

- Цель управления – выдача максимальной мощности в сеть ( $\Delta P_{выд} > 0$ );
- При этом загрузка балансирующих энергоблоков выбирается таким образом, чтобы обеспечить текущую собственную нагрузку Минирида минимальным числом энергоблоков без вращающегося резерва;
- Свободные энергоблоки назначаются при условии обеспечения нагрузки балансирующими энергоблоками ( $\sum_{i=1}^{n_6} P_{загр.i} = P_{нагр}$ );
- Допустимый переток через контролируемое сечение ( $P_{сеч}$ ) не более 4 МВт;
- Вероятность аварийного отключения от внешней сети (ВС) 2 раза в месяц;
- Время восстановления нормального режима ВС 1 час.

Исходя из выше указанных особенностей часовых режимов и ограничений с помощью симулятора Минирида выполнен расчет объема недоотпуска электроэнергии внутри часа при прерывании электроснабжения в автономном режиме с различным составом и в режиме параллельной работы с ВС с условием нахождения одного энергоблока в ремонтном состоянии.

Далее на рис. 7-9 представлены графики изменения мощности, при различных аварийных возмущениях и режимах Минирида.

На рис.7 представлен процесс при аварийном отключении энергоблока в автономном режиме, когда было невозможно обеспечить вращающийся резерв по

технологическим ограничениям (интервал 1-6 ч суточного графика).

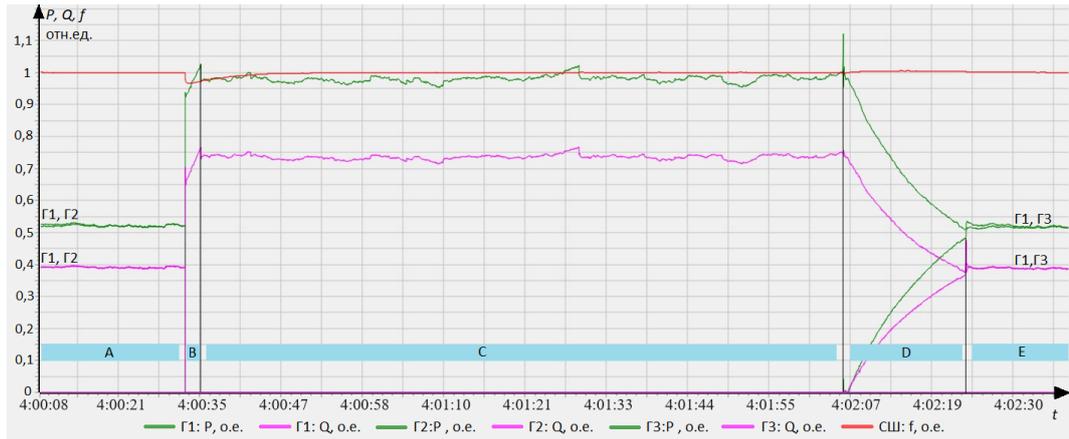


Рис. 7. График процесса при аварийном отключении одного энергоблока в интервале 5-го часа графика нагрузив режиме автономной работы Минигрид с выведенным в ремонт энергоблоком

Рис. 7. The schedule of the process in case of an emergency shutdown of one power unit in the interval of 5 hours of the load schedule in the mode of autonomous operation of the Minigrig with the power unit put into repair

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для режима параллельной работы без АОСД с внешней сетью для 6-22 часа графика нагрузки характерно отключение нагрузки на время восстановления (запуска) отключаемых энергоблоков при аварийном возмущении во внешней сети, рис.8. Описание этапов графика представлено в табл.3.

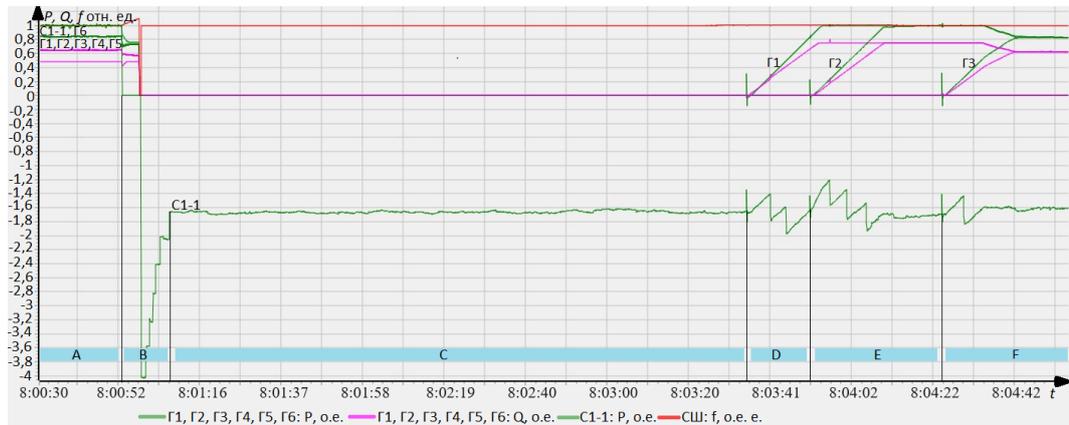


Рис. 8. График процесса при аварийном отключении Минигрид от внешней сети в интервале 9-го часа графика нагрузки при выведенной из работы АОСД

Рис. 8. Process schedule in case of emergency disconnection of the Minigrig from the external grid in the interval of 9 hours of the load schedule when the AOSD is out of operation

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Поведение при сочетании аварийных событий, приводящих к отключению от внешней сети и отключению энергоблока в режиме параллельной работы с АОСД, рис. 9, сопоставимы с автономным режимом.

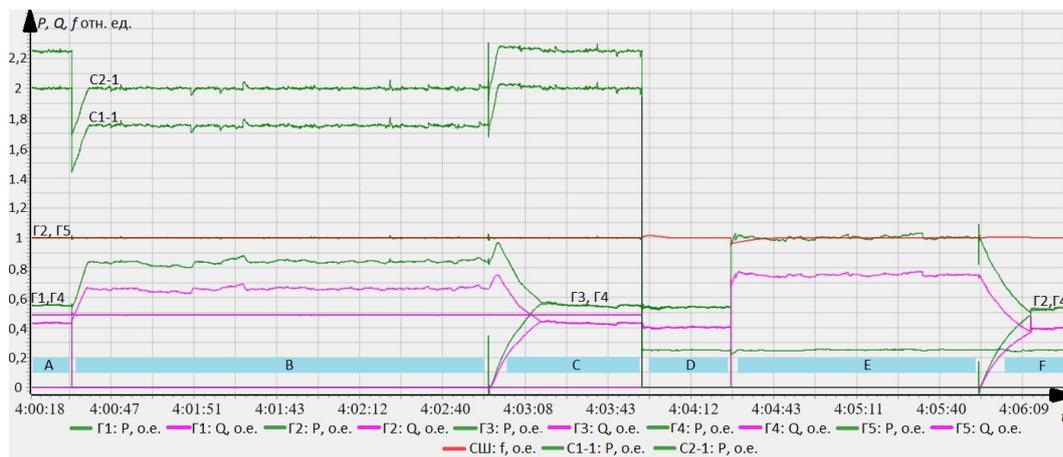


Рис. 9. График процесса при аварийных отключениях энергоблока, отключении Минигрид от внешней сети для интервала 5-го часа графика нагрузки в режиме с введенной в работу АОСД при ремонте одного энергоблока

Рис. 9. Process schedule in case of emergency shutdowns of the power unit, disconnection of the Minigrig from the external grid for an interval of 5 hours of the load schedule in the mode with the AOSD put into operation during the repair of one power unit

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3

Описание этапов процессов управления Минигрид при моделировании на цифровом симуляторе

Этап	Автономный режим	Параллельный режим без АОСД	Параллельный режим с АОСД
A	Исходный установившийся режим: В работе 2 энергоблока (Г1, Г2)	Исходный установившийся режим: В работе 5 балансирующих энергоблока (Г1-Г5) и 1 свободный (Г6)	Исходный установившийся режим: В работе 2 балансирующих энергоблока (Г1, Г4) и 2 свободных (Г2, Г5)
B	Отказ работающего энергоблока (Г2) и отключение части нагрузки	Отключение всех работающих энергоблоков с последующей работой АВР, вследствие аварийного возмущения во внешней сети. Стабилизация перетока мощности в сечении путем отключения части нагрузки	Отказ работающего энергоблока (Г1) и переход к контролируемому сечению C2-1. Выдача команды на пуск 3-го энергоблока (Г3)
C	Выдача команды на пуск 3-го энергоблока (Г3), ожидание запуска энергоблока	Выдача команды на пуск энергоблоков, режим работы без энергоблоков	Включение и загрузка 3-го энергоблока (Г3) с переходом к контролируемому сечению C1-1. Восстановлен режим до аварийного возмущения
D	Включение и загрузка 3-го энергоблока (Г3)	Включение и загрузка 1-го энергоблока (Г1) с восстановлением первой части отключенной нагрузки	Отключение свободных энергоблоков (Г2, Г5), вследствие аварийного возмущения во внешней сети. Переход в автономный режим работы Минигрид
E	Включение отключенной части нагрузки, восстановление режима нормального режима	Включение и загрузка 2-го энергоблока (Г2) с восстановлением второй части отключенной нагрузки	Отказ работающего энергоблока (Г3) и отключение части нагрузки, с выдачей команды на пуск 2-го энергоблока (Г2)
F	—	Включение и загрузка 3-го энергоблока (Г3) с восстановлением оставшейся части отключенной нагрузки	Включение и загрузка 2-го энергоблока (Г2), с последующем включением отключенной части нагрузки

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основе имитации возмущений в симуляторе на каждом часовом интервале годовые величины недоотпуска электроэнергии в результате прерывания электроснабжения для каждого упомянутого случая с учетом вероятностного характера появления аварийного события рассчитываются по формулам:

$$W_{\text{нд.авт}(5)} = \left[ q_{\text{ч.Э}} \cdot \left( \sum_{t=0}^6 W_{\text{нагр}}(t) \right) + q_{\text{ч.Э}} \cdot W_{\text{нагр}}(23) + \right. \\ \left. + (q_{\text{ч.Э}} \cdot p_{\text{рем}}) \cdot \left( \sum_{t=8}^{12} W_{\text{нагр}}(t) + \sum_{t=14}^{18} W_{\text{нагр}}(t) \right) \right] \cdot 365 \quad (1)$$

$$W_{\text{нд.авт}(6)} = \left[ q_{\text{ч.Э}} \cdot \left( \sum_{t=0}^5 W_{\text{нагр}}(t) \right) + (q_{\text{ч.Э}} \cdot p_{\text{рем}}) \cdot \left( \sum_{t=8}^{11} W_{\text{нагр}}(t) + \sum_{t=14}^{18} W_{\text{нагр}}(t) \right) \right] \cdot 365 \quad (2)$$

$$W_{\text{нд.авт}(7)} = \left[ q_{\text{ч.Э}} \cdot \left( \sum_{t=1}^5 W_{\text{нагр}}(t) \right) + (q_{\text{ч.Э}} \cdot p_{\text{рем}}) \cdot \left( \sum_{t=8}^{11} W_{\text{нагр}}(t) + \sum_{t=14}^{18} W_{\text{нагр}}(t) \right) \right] \cdot 365 \quad (3)$$

$$W_{\text{нд.без АОСД}} = \left[ q_{\text{ч.ВС}} \cdot \left( \sum_{t=6}^{22} W_{\text{нагр}}(t) \right) \right] \cdot 365 \quad (4)$$

$$W_{\text{нд.с АОСД}} = \left[ 0.5 \cdot (q_{\text{ч.Э}} \cdot q_{\text{ч.ВС}}) \cdot \left( \sum_{t=0}^5 W_{\text{нагр}}(t) \right) + \right. \\ \left. + (q_{\text{ч.Э}} \cdot q_{\text{ч.ВС}} \cdot p_{\text{рем}}) \cdot \left( \sum_{t=8}^{11} W_{\text{нагр}}(t) + \sum_{t=14}^{18} W_{\text{нагр}}(t) \right) \right] \cdot 365 \quad (5)$$

где  $W_{\text{нд.авт}(n)}$  – годовой недоотпуск энергии в автономном режиме при числе установленных энергоблоков  $n$ ,

$W_{\text{нд.без АОСД}}$  – годовой недоотпуск энергии в режиме параллельной работа без АОСД,

$W_{\text{нд.с АОСД}}$  – годовой недоотпуск энергии в режиме параллельной работа с АОСД,

$q_{\text{ч.Э}} \approx 2.78 \cdot 10^{-3}$  – вероятность внутри часового отказа энергоблока,

$q_{\text{ч.ВС}} \approx 2.78 \cdot 10^{-3}$  – вероятность внутри часового отказа внешней сети,

$p_{\text{рем}}$  – вероятность нахождения энергоблока в ремонте,

$W_{\text{нагр}}(t)$  –недоотпуск электроэнергии внутри часа ( $t$ ) при прерывании электроснабжения.

График нагрузки генераторов по продолжительности в течение года, используемый при расчете КИУМ, представлен на рис.10.

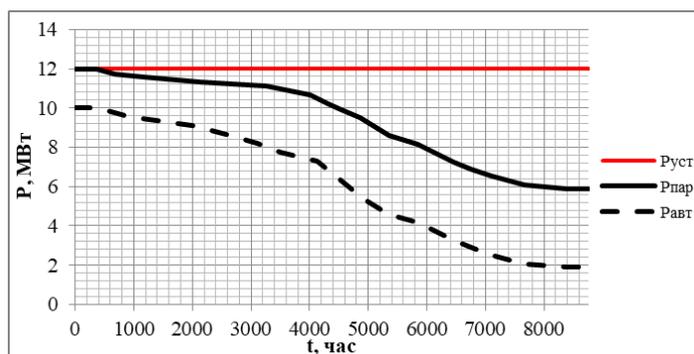


Рис. 10. Годовые графики генерации электростанции Минигрид по продолжительности, где:  $P_{\text{пар}}$  – генерация мощности в режиме параллельной работы Минигрид;  $P_{\text{авт}}$  – генерация мощности в режиме автономной работы Минигрид

Рис. 10. The annual generation power schedules of the Minigrig power plant by duration, where:

$P_{\text{пар}}$  – power generation in parallel operation mode of the Minigrig;

$P_{\text{авт}}$  – power generation in the autonomous operation mode of the Minigrig is equal to the load

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходя из соотношения площадей графика нагрузки генераторов по продолжительности КИУМ равен:

$$K_{авт(n)} = 100 \cdot \frac{W_{ген} - W_{нд.авт(n)} - (4380 \cdot P_{уст})}{8760 \cdot P_{уст}} \quad (6)$$

$$K_{без АОСД} = 100 \cdot \frac{W_{ген} - W_{ген.без АОСД} - (4380 \cdot P_{уст})}{8760 \cdot P_{уст}} \quad (7)$$

$$K_{с АОСД} = 100 \cdot \frac{W_{ген} - W_{нд.с АОСД} - (4380 \cdot P_{уст})}{8760 \cdot P_{уст}} \quad (8)$$

где  $K_{авт(n)}$  – коэффициент использования установленной мощности в автономном режиме при числе установленных энергоблоков  $n$ ,

$K_{без АОСД}$  – коэффициент использования установленной мощности в режиме параллельной работа без АОСД,

$K_{с АОСД}$  – коэффициент использования установленной мощности в режиме параллельной работа с АОСД,

$W_{ген}$  – выработка энергии за год равная потреблению нагрузкой, МВт·ч,

$W_{ген.без АОСД}$  – недовыработанная энергия при отключениях Минирид от ВС, МВт·ч,

$P_{уст}$  – установленная мощность станции, МВт.

Значения показателей эффективности рассмотренных вариантов, рассчитанные по формулам (1) – (8) представлены в таблице 4.

Таблица 4

Сравнение показателей эффективности рассмотренных вариантов

Режим Минирид	Кол-во установленных агрегатов	$W_{нд}$ , МВт·ч	$W_{нд\%}$ , %	$K_{КИУМ}$
Автономная работа	5	10,798	0,020	0,409
	6	7,882	0,015	0,426
	7	5,832	0,011	0,438
Параллельная работа без АОСД	6	3,583	$6,697 \cdot 10^{-3}$	0,674
Параллельная работа с АОСД	6	0,021	$4,0 \cdot 10^{-5}$	0,697

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рис. 11 показана зависимость расчётных показателей эффективности от параметров конфигурации Минирид в симуляторе ( $n$  – числа установленных генераторов, + || раб – нахождения в режиме параллельной работы, + АОСД – действующей АОСД).

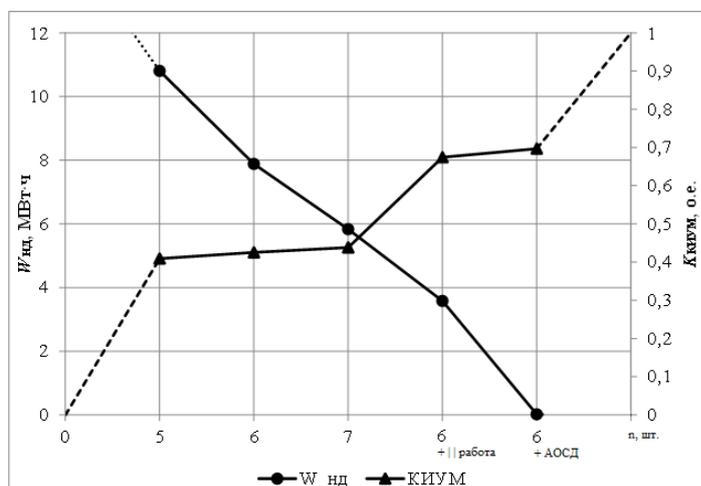


Рис. 11. Зависимость показателей эффективности от параметров конфигурации Минирид в симуляторе

эффективности от параметров конфигурации the parameters of the Minigrad configuration  
Минигрид

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные зависимости показателей эффективности от параметров конфигурации Минигрид свидетельствуют об уменьшении недоотпуска электроэнергии при увеличении числа агрегатов на электростанции при неизменяемой установленной мощности в автономном режиме. При расчете экономических показателей эффективности на базе полученных технических показателей (капитальные вложения, сроки окупаемости инвестиций, ущерб от нарушений электроснабжения, недоотпуска электроэнергии (э/э) и др. можно выбрать оптимальное число и мощности энергоблоков на электростанции.

В свою очередь переход к параллельной работе увеличивает КИУМ в зависимости от разрешенной величины выдачи мощности во внешнюю сеть. Чем больше разрешенная величина перетока через сечение, тем выше КИУМ. При этом величина ограничения сечения также влияет на величину недоотпуска э/э. Чем больше разрешенный переток через сечение, тем меньше  $W_{нд}$ . При этом использование специальной автоматики противоаварийного опережающего сбалансированного деления позволяет существенно снизить величину недоотпуска э/э, тем самым повысить надежность электроснабжения без изменения допустимой величины перетока через сечение, что зачастую в реальной жизни не предоставляется возможным.

#### **Заключение (Conclusions)**

Развитие цифровых двойников (симуляторов режимов и управления) «Минигрид» и других объектов с малой генерацией позволяет применять их не только в качестве средств обучения специалистов по управлению и подготовке оперативного персонала, но и в качестве средств моделирования при получении ключевых для проектирования интегральных технических характеристик эффективности принимаемых решений по основному оборудованию, способам и системам управления режимами, осуществления параллельной работы малой генерации при ее интеграции в сети централизованного энергоснабжения.

Представленная в работе постановка задачи применения симулятора для расчета интегральных показателей сравнительной эффективности вариантов Минигрид и управления их режимами, демонстрация ее решения могут использоваться при создании автоматизированных методик сравнения альтернатив при проектировании объектов с малой генерацией, а общий подход - и к объектам другого рода.

#### **Литература**

1. Илюшин П.В. Системный подход к развитию и внедрению распределенной энергетики и возобновляемых источников энергии в России // Энергетик. 2022. № 4. С. 20-26.
2. Klagge B., Brocke T. Decentralized electricity generation from renewable sources as a chance for local economic development: a qualitative study of two pioneer regions in Germany //Energy, Sustainability and Society. – 2012. – Т. 2. – С. 1-9.
3. Tsai C. T. et al. Optimal design and performance analysis of solar power microsystem for mini-grid application //Microsystem Technologies. – 2021. – Т. 27. – С. 1267-1281.
4. Sultana G., Keshavan B. K. Evaluation of performance and reliability indices of a micro-grid with distributed generation //2020 IEEE region 10 conference (TENCON). – IEEE, 2020. – С. 341-346.
5. Chambon C. L. et al. Techno-economic assessment of biomass gasification-based mini-grids for productive energy applications: The case of rural India //Renewable Energy. – 2020. – Т. 154. – С. 432-444.
6. Санеев Б. Г. и др. Автономные энергоисточники на севере Дальнего Востока: характеристика и направления диверсификации //Пространственная экономика. – 2018. – №. 1. – С. 101-116.
7. Mondal A. N., Denich M. Hybrid systems for decentralized power generation in Bangladesh //Energy for sustainable development. – 2010. – Т. 14. – №. 1. – С. 48-55.
8. Бык Ф. Л., Илюшин П. В., Мышкина Л. С. Особенности и перспективы развития распределенной энергетики в России //Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64. – №. 6. – С. 78-87.
9. Бык Ф. Л., Илюшин П. В., Мышкина Л. С. Прогноз и концепция перехода к распределенной энергетике в России //Проблемы прогнозирования. – 2022. – №. 4 (193). – С. 124-135.
10. Бык Ф. Л., Мышкина Л. С., Кожевников М. В. Повышение устойчивости

энергоснабжения регионов на основе локальных интеллектуальных энергосистем // Экономика региона. – 2023. – Т. 19. – №. 1. – С. 163-177.

11. Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Интеграция локальных интеллектуальных энергосистем и энергетический переход // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – 2022. – С. 31-40.

12. Бойко Е. Е. и др. Способы повышения эффективности территориальных систем энергоснабжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – №. 4. – С. 108-117.

13. Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Цифровые технологии и эффективность локальных энергосистем // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – 2021. – С. 99-107.

14. Фишов А. Г. и др. Синхронизация Microgrid с внешней электрической сетью и между собой в нормальных и послеаварийных режимах при разных схемах объединения // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – №. 2. – С. 32-42.

15. Фишов А. Г. и др. Режимы и автоматика Минирид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – №. 3. – С. 22-37.

16. Гуломзода А. Х. Исследование способа синхронизации с внешней сетью локальных систем электроснабжения на базе малой генерации // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – 2021. – С. 303-312.

17. Фишов А. Г., Петрищев А. В., Ожулас В. А. Цифровой симулятор режимов минирида, интегрированного с внешней электрической сетью. Часть 1. Физико-технологические основы объекта симуляции // Энергетик. – 2023. – №. 6. – С. 6-13.

18. Фишов А. Г., Петрищев А. В., Ожулас В. А. Цифровой симулятор режимов минирида, интегрированного с внешней электрической сетью. Часть 2. Техническая реализация и особенности использования симулятора // Энергетик. – 2023. – №. 7. – С. 14-22.

19. Müller S. C. et al. Interfacing power system and ICT simulators: Challenges, state-of-the-art, and case studies // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2016. – Т. 9. – №. 1. – С. 14-24.

20. Palensky P. et al. Applied cosimulation of intelligent power systems: Implementing hybrid simulators for complex power systems // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2017. – Т. 11. – №. 2. – С. 6-21.

21. Sidwall K., Forsyth P. A review of recent best practices in the development of real-time power system simulators from a simulator manufacturer's perspective // Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 3. – С. 1111.

22. Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. Эффекты интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 3-15.

23. Колотыгина Е. К., Фролова Я. А. Оптимизация состава и загрузки включенного оборудования при совместной выработке электричества и тепла в энергосистемах малой мощности // Электроэнергетика глазами молодежи-2018. – 2018. – С. 89-92.

24. Чукреев Ю.Я., Бык Ф.Л., Мышкина Л.С., Чукреев М.Ю. Свойства надежности при децентрализации энергетики. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2023. № 5. С. 19-39.

25. Бык Ф. Л., Чукреев Ю. Я. Оценка влияния интеграции локальных интеллектуальных энергосистем на средства обеспечения балансовой надежности ЕЭС // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – 2022. – С. 41-50.

26. Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Надежность объектов распределенной энергетики // Надежность и безопасность энергетики. – 2021. – Т. 14. – №. 1. – С. 45-51.

27. Abdmouleh Z. et al. Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources // Renewable Energy. – 2017. – Т. 113. – С. 266-280.

28. Xu Y. et al. Smart energy systems: A critical review on design and operation optimization // Sustainable Cities and Society. – 2020. – Т. 62. – С. 102369.

29. Rech S. Smart energy systems: Guidelines for modelling and optimizing a fleet of units of different configurations // Energies. – 2019. – Т. 12. – №. 7. – С. 1320.

#### **Авторы публикации**

**Ожулас Владис Алисович** – аспирант, Новосибирский государственный технический университет

**Петрищев Алексей Васильевич** – канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный

**Фишов Александр Георгиевич** – д-р техн. наук, профессор, Новосибирский государственный технический университет

### References

1. Pyushin P.V. Sistemnyi podkhod k razvitiyu i vnedreniyu raspredelennoi energetiki i vozobnovlyаемых источников энергии в России // *Energetik*. 2022. № 4. S. 20-26.
2. Klagge B., Brocke T. Decentralized electricity generation from renewable sources as a chance for local economic development: a qualitative study of two pioneer regions in Germany // *Energy, Sustainability and Society*. – 2012. – Т. 2. – С. 1-9.
3. Tsai C. T. et al. Optimal design and performance analysis of solar power microsystem for mini-grid application // *Microsystem Technologies*. – 2021. – Т. 27. – С. 1267-1281.
4. Sultana G., Keshavan B. K. Evaluation of performance and reliability indices of a micro-grid with distributed generation // *2020 IEEE region 10 conference (TENCON)*. – IEEE, 2020. – С. 341-346.
5. Chambon C. L. et al. Techno-economic assessment of biomass gasification-based mini-grids for productive energy applications: The case of rural India // *Renewable Energy*. – 2020. – Т. 154. – С. 432-444.
6. Saneev B. G. i dr. Avtonomnye energoistochniki na severe Dal'nego Vostoka: kharakteristika i napravleniya diversifikatsii // *Prostranstvennaya ekonomika*. – 2018. – №. 1. – S. 101-116.
7. Mondal A. H., Denich M. Hybrid systems for decentralized power generation in Bangladesh // *Energy for sustainable development*. – 2010. – Т. 14. – №. 1. – С. 48-55.
8. Byk F. L., Ilyushin P. V., Myshkina L. S. Osobennosti i perspektivy razvitiya raspredelennoi energetiki v Rossii // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. – 2021. – Т. 64. – №. 6. – S. 78-87.
9. Byk F. L., Ilyushin P. V., Myshkina L. S. Prognoz i kontseptsiya perekhoda k raspredelennoi energetike v Rossii // *Problemy prognozirovaniya*. – 2022. – №. 4 (193). – S. 124-135.
10. Byk F. L., Myshkina L. S., Kozhevnikov M. V. Povyshenie ustoichivosti energosnabzheniya regionov na osnove lokal'nykh intellektual'nykh energosistem // *Ekonomika regiona*. – 2023. – Т. 19. – №. 1. – S. 163-177.
11. Byk F. L., Myshkina L. S. Integratsiya lokal'nykh intellektual'nykh energosistem i energeticheskii perekhod // *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki*. – 2022. – S. 31-40.
12. Boiko E. E. i dr. Sposoby povysheniya effektivnosti territorial'nykh sistem energosnabzheniya // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. – 2022. – Т. 65. – №. 4. – S. 108-117.
13. Byk F. L., Myshkina L. S. Tsifrovye tekhnologii i effektivnost' lokal'nykh energosistem // *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki*. – 2021. – S. 99-107.
14. Fishov A. G. i dr. Sinkhronizatsiya Microgrid s vneshnei elektricheskoi set'yu i mezhdub soboi v normal'nykh i posleavariinykh rezhimakh pri raznykh skhemakh ob"edineniya // *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. – 2021. – №. 2. – S. 32-42.
15. Fishov A. G. i dr. Rezhimy i avtomatika Minigrid, rabotayushchikh v sostave raspredelitel'nykh elektricheskikh setei EES // *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. – 2021. – №. 3. – S. 22-37.
16. Gulomzoda A. Kh. Issledovanie sposoba sinkhronizatsii s vneshnei set'yu lokal'nykh sistem elektrosnabzheniya na baze maloi generatsii // *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki*. – 2021. – S. 303-312.
17. Fishov A. G., Petrishchev A. V., Ozhulas V. A. Tsifrovoy simulyator rezhimov minigrida, integrirovannogo s vneshnei elektricheskoi set'yu. Chast' 1. Fiziko-tekhnologicheskie osnovy ob"ekta simulyatsii // *Energetik*. – 2023. – №. 6. – S. 6-13.
18. Fishov A. G., Petrishchev A. V., Ozhulas V. A. Tsifrovoy simulyator rezhimov minigrida, integrirovannogo s vneshnei elektricheskoi set'yu. Chast' 2. Tekhnicheskaya realizatsiya i osobennosti ispol'zovaniya simulyatora // *Energetik*. – 2023. – №. 7. – S. 14-22.
19. Müller S. C. et al. Interfacing power system and ICT simulators: Challenges, state-of-the-art, and case studies // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2016. – Т. 9. – №. 1. – С. 14-24.
20. Palensky P. et al. Applied cosimulation of intelligent power systems: Implementing hybrid simulators for complex power systems // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. – 2017. – Т. 11. – №. 2. – С. 6-21.
21. Sidwall K., Forsyth P. A review of recent best practices in the development of real-time power system simulators from a simulator manufacturer's perspective // *Energies*. – 2022. – Т. 15. – №. 3. – С. 1111.

22. Byk F.L., Myshkina L.S. Effekty integratsii lokal'nykh intellektual'nykh energosistem // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI. 2022. T. 24. № 1. S. 3-15.
23. Kolotygina E. K., Frolova Ya. A. Optimizatsiya sostava i zagruzki vklyuchennogo oborudovaniya pri sovmestnoi vyrabotke elektrichestva i tepla v energosistemakh maloi moshchnosti //Elektroenergetika glazami molodezhi-2018. – 2018. – S. 89-92.
24. Chukreev Yu.Ya., Byk F.L., Myshkina L.S., Chukreev M.Yu. Cvoistva nadezhnosti pri detsentralizatsii energetiki. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika. 2023. № 5. S. 19-39.
25. Byk F. L., Chukreev Yu. Ya. Otsenka vliyaniya integratsii lokal'nykh intellektual'nykh energosistem na sredstva obespecheniya balansovoi nadezhnosti EES //Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki. – 2022. – S. 41-50.
26. Byk F. L., Myshkina L. S. Nadezhnost' ob"ektov raspredelennoi energetiki //Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki. – 2021. – T. 14. – №. 1. – S. 45-51.
27. Abdmouleh Z. et al. Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources //Renewable Energy. – 2017. – T. 113. – C. 266-280.
28. Xu Y. et al. Smart energy systems: A critical review on design and operation optimization //Sustainable Cities and Society. – 2020. – T. 62.– C. 102369.
29. Rech S. Smart energy systems: Guidelines for modelling and optimizing a fleet of units of different configurations //Energies. – 2019. – T. 12. – №. 7. – C. 1320.

#### **Authors of the publication**

**Vladis A. Ozhulas**- Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

**Alexey V. Petrishhev**- Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

**Alexander G. Fishov** - Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»*

**Получено** **19.03.2024 г.**

**Отредактировано** **14.05.2024 г.**

**Принято** **16.05.2024 г.**

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСА НА ВЫСШИХ ГАРМОНИКАХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, ПИТАЮЩЕЙ НЕЛИНЕЙНУЮ НАГРУЗКУ

Зубова Е.В., Федосов Д.С.

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия  
zubova@ex.istu.edu

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Увеличение в энергосистемах доли мощных нелинейных нагрузок, вызывающих несинусоидальность токов и напряжений, приводит к негативным техническим последствиям и экономическому ущербу для энергосистемы и неискажающих потребителей. В настоящее время отсутствуют практические рекомендации по выбору длин питающих линий электропередачи для подключения мощных нелинейных нагрузок с учётом их негативного влияния на показатели качества электрической энергии. **ЦЕЛЬ.** В работе выполняется анализ условий возникновения резонансных перенапряжений на высших гармонических составляющих в схеме электроснабжения нелинейной нагрузки. **МЕТОДЫ.** В качестве основных методов для исследования использованы составление схем замещения элементов электрической сети и расчёт токов и напряжений в электрических цепях с сосредоточенными параметрами. Для анализа несинусоидальных токов и напряжений применено разложение в ряд Фурье. С помощью имитационных моделей в MATLAB Simulink определены условия возникновения резонансов на высших гармониках при различных длинах линий электропередачи 35, 110 и 220 кВ и разных мощностях питающей системы. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Получены расчетные значения резонансных длин воздушных линий электропередачи 35-220 кВ, питающих нелинейную нагрузку, при которых в электрической сети возникают резонансные перенапряжения на высших гармониках с номерами от 3 до 49. Резонансные длины линий электропередачи на отдельных гармониках получены с учётом влияния сопротивления питающей системы. Полученные сочетания резонансных длин линий и сопротивлений систем предлагается учитывать при проектировании схем внешнего электроснабжения нелинейных нагрузок для исключения гармонических перенапряжений. Проведённые в работе расчёты позволили дать объяснение аномальным уровням токов и напряжений 35-й и 37-й гармоник в схеме внешнего электроснабжения алюминиевого завода. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Сформулированы практические рекомендации по выбору длин линий электропередачи 35-220 кВ в системах электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками для исключения резонансных перенапряжений. Результаты определения резонансных длин линий электропередачи согласуются с данными натурных экспериментов в действующей энергосистеме.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии; несинусоидальность напряжения; высшие гармонические составляющие; резонанс; нелинейная нагрузка; воздушные линии электропередачи; MATLAB.

**Для цитирования:** Зубова Е.В., Федосов Д.С. Исследование условий возникновения резонанса на высших гармониках в электрической сети, питающей нелинейную нагрузку // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 83-95. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95.

## STUDY OF RESONANCE CONDITIONS ON HIGHER HARMONICS IN AN ELECTRICAL NETWORK SUPPLYING A NONLINEAR LOAD

Zubova E.V., Fedosov D.S.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

zubova@ex.istu.edu

**Abstract:** *RELEVANCE.* The increase in the share of high nonlinear loads in power systems, causing non-sinusoidal currents and voltages, leads to negative technical consequences and economic losses for the power system and non-distorting consumers. Currently, there are no practical recommendations on choosing the lengths of power lines for supplying high nonlinear loads considering their negative impact on power quality indicators. *THE PURPOSE.* The study analyzes the conditions for the occurrence of harmonic resonant overvoltages in a power supply scheme of a nonlinear load. *METHODS.* The main methods used for the study include the compilation of equivalent diagrams of the electrical network elements and calculation of currents and voltages in lumped-element circuits. The Fourier series decomposition is applied to analyze non-sinusoidal currents and voltages. Using simulation models in MATLAB Simulink environment, the conditions for the occurrence of higher harmonic resonances at different lengths of 35, 110, and 220 kV power transmission lines and different power ratings of the power system are determined. *RESULTS.* Calculated resonant lengths of overhead power lines 35-220 kV, supplying a nonlinear load, at which resonant overvoltages occur in the electrical network on higher harmonics with numbers from 3 to 49, were obtained. The resonant lengths of power transmission lines on particular harmonics were determined taking into account the impact of the power supply system reactance. The obtained combinations of resonant line lengths and system reactances are proposed to be considered in the design of external power supply schemes for nonlinear loads to eliminate harmonic overvoltages. The calculations in this study provided an explanation for the abnormal levels of currents and voltages of the 35<sup>th</sup> and 37<sup>th</sup> harmonics in the external power supply scheme of an aluminum plant. *CONCLUSION.* Practical recommendations are given for choosing the lengths of 35-220 kV power transmission lines in power supply systems with high nonlinear loads to eliminate resonant overvoltages. The results of determining the resonant lengths of power transmission lines agree with the data from measuring experiments in an operating power system.

**Keywords:** power quality; voltage waveform distortion; higher harmonics; electrical resonance; nonlinear load; overhead power lines; MATLAB.

**For citation:** Zubova E.V., Fedosov D.S. Study of resonance conditions on higher harmonics in an electrical network supplying a nonlinear load. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (3): 83-95. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95.

### **Введение (Introduction)**

Электрическая энергия является товаром и обладает определёнными характеристиками качества электроэнергии (КЭЭ). Стандарт ГОСТ 32144-2013 устанавливает набор нормируемых свойств электрической энергии и допустимые значения показателей качества электрической энергии (ПКЭ). Анализ источников [1-3] показывает, что несоответствия ПКЭ требованиям стандарта могут привести к преждевременному выходу из строя конденсаторных батарей, электрооборудования, неправильной работе устройств защиты, увеличению потерь энергии и мощности в элементах электрической сети и т. д.

Как отмечают исследователи [4-7], к числу основных свойств электрической энергии относится синусоидальность формы кривой напряжения. Отклонение формы напряжения и тока от синусоидальной принято оценивать наличием высших гармоник (ВГ), получаемых разложением несинусоидальных сигналов в ряд Фурье. Главной причиной повышенного содержания ВГ в токах и напряжениях является работа электроприёмников с нелинейными вольтамперными характеристиками [6]. В электроэнергетических системах (ЭЭС) со значительной долей нелинейных нагрузок при определённом сочетании параметров схемы замещения элементов сети возможно возникновение резонансов на ВГ, сопровождающихся увеличением напряжений ВГ в

узлах сети и токов ВГ в элементах сети [7-8].

На большинстве производств нелинейные потребители представлены выпрямителями, работающими по 6- или 12-пульсной схеме [9-10]. Схемы выпрямления большей пульсности либо не реализованы, либо работают только в нормальном режиме, когда все агрегаты схемы находятся в работе. Так, при выводе в ремонт хотя бы одного из выпрямительных агрегатов во внешнюю сеть генерируются те же гармоники, что и при работе выпрямителя, собранного по 6- или 12-пульсной схеме [11-12]. В таком случае в качестве мероприятий, которые исключают появление резонанса на ВГ, могут быть рассмотрены анализ параметров электрической сети, питающих мощную нелинейную нагрузку, или установка фильтров ВГ непосредственно в узле подключения нелинейной нагрузки. Однако исследование эффективности фильтров для улучшения ПКЭ не входит в задачи данной работы – предлагается рассмотреть влияние параметров схемы внешнего электроснабжения нелинейной нагрузки на уровни ВГ и возможные резонансные процессы в электрической сети.

Цель исследования заключается в получении условий возникновения резонансных перенапряжений в узле подключения нелинейной нагрузки к питающей линии электропередачи (ЛЭП) при помощи анализа электрических режимов для нечетных гармоник с номерами от 3 до 49. Проводится анализ зависимости величины входного полного сопротивления в узле подключения искажающей нагрузки от номера гармоники для выявления частот ВГ, при которых данное сопротивление максимально. При большом входном сопротивлении даже незначительный уровень тока ВГ приводит к перенапряжению в данном узле электрической сети, что является признаком резонанса токов на рассматриваемой ВГ.

Научная значимость исследования состоит в разработке модели электрической сети с ЛЭП 35-220 кВ и искажающей нагрузкой, которая позволяет определять условия возникновения резонансных перенапряжений на ВГ при разных сочетаниях длины ЛЭП и сопротивления ЭЭС.

Практическая значимость исследования заключается в обоснованном выборе длин ЛЭП и схемы питания нелинейной нагрузки, исключающем возможность появления резонансных перенапряжений на ВГ.

В связи с этим были сформированы следующие задачи исследования: анализ параметров электрической сети и составление расчётных моделей для исследования влияния параметров ЛЭП и ЭЭС на уровень напряжений ВГ, исследование резонансных явлений в электрической сети при различных параметрах питающей ЭЭС и ЛЭП, анализ результатов исследования и выработка рекомендаций по исключению перенапряжений на ВГ.

**Материалы и методы (Materials and methods)**

В качестве расчётной электрической схемы для анализа условий появления резонанса использована схема на рисунке 1.

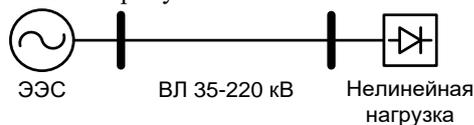


Рис.1. Расчётная схема для анализа условий появления резонанса

Fig.1. Electrical scheme for analyzing the conditions of resonance appearance

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Схема, приведённая на рисунке 1, в частности, является типичной схемой электроснабжения для питания мощных производств алюминия, тяговой нагрузки [7-11]. Однолинейная схема замещения для расчётной схемы представлена на рисунке 2.

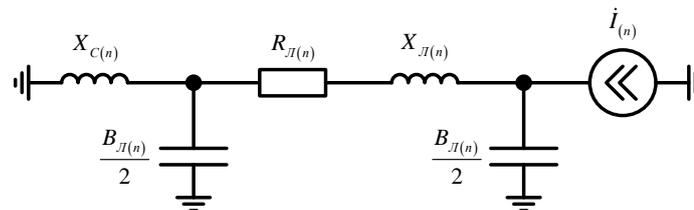


Рис. 2. Схема замещения для анализа условий появления резонанса

Fig. 2. Equivalent circuit for analyzing the conditions of resonance appearance

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Как правило, в таких случаях для расчёта уровней ВГ используют модель ЛЭП с распределенными по длине параметрами, что позволяет получить картину распределения напряжений и токов ВГ вдоль всей длины ЛЭП. Однако, при анализе ВГ, как и других ПКЭ, используются напряжения только по концам ЛЭП – в узлах периодического или непрерывного контроля ПКЭ. Поэтому в данном исследовании применена упрощенная П-образная схема замещения. Для ЛЭП длиной  $l$ , имеющей погонные продольные активное  $r_0$  и индуктивное  $x_0$  сопротивления и погонную поперечную емкостную проводимость  $b_0$ , использована схема замещения без учёта потерь активной мощности на корону. Параметры воздушной линии (ВЛ) на основной частоте рассчитаны по формулам:

$$R_{Л} = r_0 l; X_{Л} = x_0 l; B_{Л} = b_0 l. \quad (1)$$

Нелинейная нагрузка представлена в схеме замещения источником тока ВГ  $\dot{I}_{(n)}$ . ЭЭС представлена в схеме замещения упрощенно – только индуктивным сопротивлением, величина которого на основной частоте может быть приближённо определена по выражению:

$$X_C = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3}I_K^{(3)}},$$

где  $U_{ср.ном}$  – среднее номинальное напряжение ЭЭС,  $I_K^{(3)}$  – ток трёхфазного короткого замыкания на шинах ЭЭС.

В соответствии с [12-13], параметры схемы замещения на ВГ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} R_{Л(n)} &= \sqrt{n}R_{Л} = \sqrt{n}r_0 l; X_{Л(n)} = nX_{Л} = nx_0 l; \\ B_{Л(n)} &= nB_{Л} = nb_0 l; X_{C(n)} = nX_C. \end{aligned} \quad (2)$$

В схеме замещения на рисунке 2 теоретически возможны резонансы при:

- 1) равенстве реактивной проводимости ЭЭС  $1/X_{C(n)}$  и емкостной проводимости половины ВЛ  $B_{Л(n)}/2$ ;
- 2) равенстве индуктивного сопротивления ЛЭП  $X_{Л(n)}$  и эквивалентного сопротивления  $\frac{2X_{C(n)}}{X_{C(n)}B_{Л(n)} - 2}$  (имеет место при соотношении  $X_{C(n)}B_{Л(n)} > 2$ );
- 3) равенстве проводимости  $B_{Л(n)}/2$  и реактивной составляющей эквивалентной проводимости остальных элементов схемы замещения в случае активно-индуктивного характера результирующей проводимости.

Анализ каждого условия возникновения резонанса в отдельности затруднителен, поэтому исследуем полное сопротивление сети относительно точки подключения нелинейной нагрузки. Напряжение  $n$ -ой гармонической составляющей на шинах нелинейной нагрузки:

$$\dot{U}_{(n)} = \dot{I}_{(n)} Z_{экв(n)}, \quad (3)$$

где  $Z_{экв(n)}$  – эквивалентное сопротивление внешней сети для ВГ с номером  $n$ . Очевидно, что при постоянном токе искажения именно величина сопротивления  $Z_{экв(n)}$  определяет модуль напряжения ВГ на шинах нелинейной нагрузки.

Эквивалентное сопротивление схемы замещения на рис.2:

$$\begin{aligned} Z_{экв(n)} &= \frac{1}{j \frac{B_{Л(n)}}{2} + \frac{1}{R_{Л(n)} + jX_{Л(n)} + \frac{1}{j \frac{B_{Л(n)}}{2} + \frac{1}{jX_{C(n)}}}} = \\ &= \frac{1}{j \frac{B_{Л(n)}}{2} + \frac{2 - X_{C(n)}B_{Л(n)}}{2R_{Л(n)} + 2jX_{Л(n)} - R_{Л(n)}X_{C(n)}B_{Л(n)} - jX_{Л(n)}X_{C(n)}B_{Л(n)} + 2jX_{C(n)}}} = \\ &= \frac{4R_{Л(n)} - 2R_{Л(n)}X_{C(n)}B_{Л(n)} + j(4X_{Л(n)} - 2X_{Л(n)}X_{C(n)}B_{Л(n)} + 4X_{C(n)})}{4 - 4X_{C(n)}B_{Л(n)} + B_{Л(n)}^2 X_{Л(n)}X_{C(n)} - 2B_{Л(n)}X_{Л(n)} + j(2B_{Л(n)}R_{Л(n)} + B_{Л(n)}^2 R_{Л(n)}X_{C(n)})}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для получения в общем виде условия возникновения резонанса следует определить модуль сопротивления  $|Z_{экв(n)}|$  и найти его частные производные по аргументам:

1)  $\frac{\partial Z_{экв(n)}}{\partial l}$ , если необходимо определить длину ЛЭП, при которой возникнет резонанс на ВГ с известным номером;

2)  $\frac{\partial Z_{экв(n)}}{\partial n}$ , если необходимо определить номер гармоники, на которой может возникнуть резонанс при известной длине ЛЭП.

После этого необходимо приравнять к нулю частную производную и решить уравнение относительно переменной  $l$  или  $n$ . Очевидно, что полученное уравнение будет нелинейным уравнением высокого порядка, которое решается численными методами [14]. Это практически исключает получение условий резонанса на ВГ в общем виде.

Вывод условия для резонансной длины ЛЭП из выражения (4) при сопротивлении ЭЭС, отличном от нуля, будет громоздким для инженерных расчётов. Однако если пренебречь сопротивлением питающей ЭЭС и принять  $X_{C(n)} = 0$  (система бесконечной мощности), то выражение (4) упростится:

$$Z_{экв(n)} = \frac{1}{j \frac{B_{Л(n)}}{2} + \frac{1}{R_{Л(n)} + jX_{Л(n)}}} \quad (5)$$

Одним из условий резонанса токов будет равенство емкостной проводимости половины ВЛ  $B_{Л(n)} / 2$  мнимой части эквивалентной проводимости остальных элементов сети:

$$\frac{B_{Л(n)}}{2} = \left| \operatorname{Im} \left[ \frac{1}{R_{Л(n)} + jX_{Л(n)}} \right] \right| = \frac{X_{Л(n)}}{R_{Л(n)}^2 + X_{Л(n)}^2} \quad (6)$$

С учётом (2) параметры схемы замещения могут быть выражены через длину ВЛ и номер гармоники:

$$\frac{nb_0 l}{2} = \frac{nx_0 l}{nr_0^2 l^2 + n^2 x_0^2 l^2} \quad (7)$$

Из (7) выражение для длины ВЛ, при которой наблюдается резонанс на ВГ с номером  $n$ :

$$l_{рез.} = \sqrt{\frac{2x_0}{nb_0 (r_0^2 + nx_0^2)}} \quad (8)$$

С помощью выражения (8) может быть определена резонансная длина ВЛ  $l_{рез.}$  для гармоники с номером  $n$ . При длине ВЛ равной  $l_{рез.}$  наблюдается значительное увеличение напряжения ВГ в узле подключения нелинейной нагрузки и увеличение токов ВГ в ЛЭП.

#### Результаты (Results)

При наличии широкого спектра ВГ в электрической сети допустима вероятность возникновения резонанса на частотах, близких к частотам одной или нескольких ВГ. Возникающие резонансные режимы производят эффект усиления влияния ВГ на работу электрооборудования, в частности, на компенсирующие устройства (КУ), увеличивая перегрузку токами гармоник [9, 11]. В конечном счете, такая токовая перегрузка негативно сказывается на сроках эксплуатации конденсаторов, что приводит к перегреву и преждевременному выходу из строя КУ [2, 15-16].

Исходя из этого была поставлена задача исследования зависимости уровня ВГ от длины и заданных параметров для ЛЭП различного класса напряжения (35 кВ, 110 кВ, 220 кВ). Для расчёта использованы следующие типы ВЛ с параметрами:

- ВЛ 35 кВ с проводами АС-150/24 с погонными параметрами  $r_0 = 0,204$  Ом/км,  $x_0 = 0,406$  Ом/км,  $b_0 = 2,7 \cdot 10^{-6}$  См/км;
- ВЛ 110 кВ с проводами АС-150/24 с погонными параметрами  $r_0 = 0,204$  Ом/км,  $x_0 = 0,420$  Ом/км,  $b_0 = 2,707 \cdot 10^{-6}$  См/км;
- ВЛ 220 кВ с проводами АС-240/32 с погонными параметрами  $r_0 = 0,118$  Ом/км,

$x_0 = 0,435 \text{ Ом/км}$ ,  $b_0 = 2,604 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$ .

Результаты расчёта резонансных длин указанных ВЛ 35-220 кВ в виде графика представлены на рисунке 3. Ввиду практически одинаковых погонных параметров ВЛ 35, 110 и 220 кВ графики зависимостей резонансных длин ВЛ от номера ВГ совпадают.

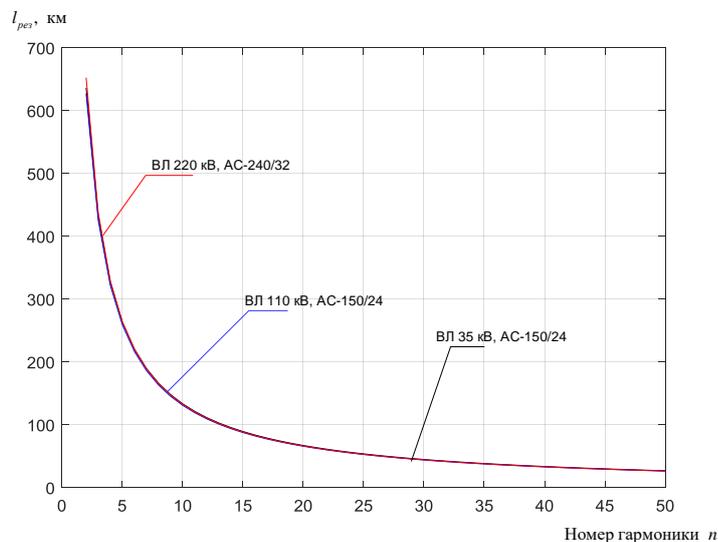


Рис. 3. Длины ВЛ  $l_{рез}$ , при которых наблюдается резонанс на ВГ с номером  $n$  *Fig. 3. Overhead line lengths  $l_{res}$  at which resonance is observed for the  $n$ -th harmonic*  
 \*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Для исследования условий появления резонанса при отличном от нуля сопротивлении питающей ЭЭС разработана программа в среде MATLAB. С её помощью определены зависимости активной и реактивной составляющих сопротивления  $Z_{экв(n)} = R_{экв(n)} + jX_{экв(n)}$  и его модуля  $|Z_{экв(n)}|$  от длины ЛЭП для заданной гармоники и от номера гармоники при известной длине ЛЭП. В качестве примера на рисунках 4 и 5 приведены графики таких зависимостей для ВЛ 220 кВ, выполненной проводом АС-240/32 при сопротивлении ЭЭС на основной частоте  $X_C = 5 \text{ Ом}$ .

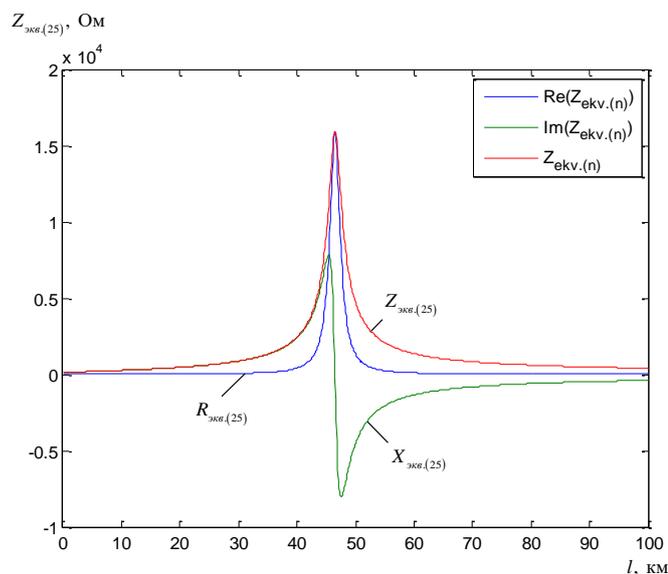


Рис. 4. График зависимости активной  $R_{экв(n)}$ , реактивной  $X_{экв(n)}$  и полной  $Z_{экв(n)}$  составляющих эквивалентного сопротивления от длины ВЛ 220 кВ, выполненной проводом АС-240, для 25-й гармоники при  $X_C = 5 \text{ Ом}$  *Fig. 4. Graph of the dependence of the active  $R_{eq(n)}$ , reactive  $X_{eq(n)}$  and apparent  $Z_{eq(n)}$  components of the equivalent impedance on the length of the 220 kV overhead line, made with AS-240 wire, for the 25<sup>th</sup> harmonic at  $X_S = 5 \text{ Ohm}$*

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

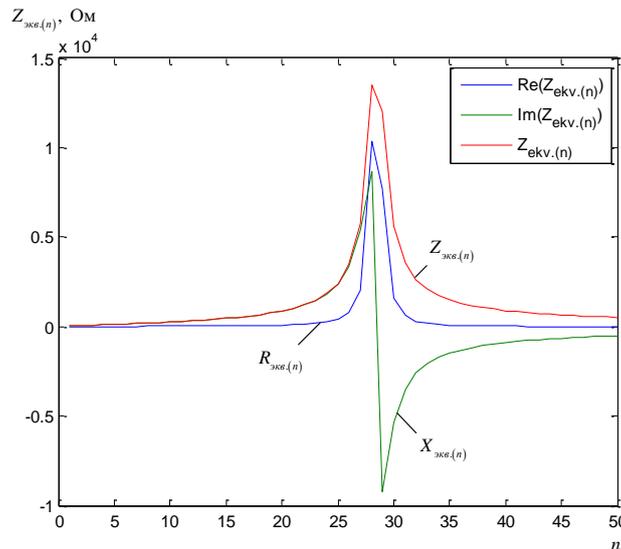


Рис. 5. График зависимости активной  $R_{экв(n)}$ , реактивной  $X_{экв(n)}$  и полной  $Z_{экв(n)}$  составляющих эквивалентного сопротивления от номера гармоники для ВЛ 220 кВ длиной 40 км, выполненной проводом АС-240, при  $X_C = 5 \text{ Ом}$

Fig. 5. Graph of the dependence of the active  $R_{eq(n)}$ , reactive  $X_{eq(n)}$  and apparent  $Z_{eq(n)}$  components of equivalent impedance on the harmonic number for a 220 kV overhead line 40 km long, made with AS-240 wire, at  $X_s = 5 \text{ Ohm}$

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Как видно из рисунков 4-5, наблюдается резонанс, характеризующийся многократным увеличением сопротивления и изменением при переходе точки резонанса знака реактивной составляющей эквивалентного сопротивления  $X_{экв(n)}$ . При этом в диапазоне выбранных для исследования длин ЛЭП и номеров гармоник не обнаружено резонансов напряжения, сопровождающихся резким уменьшением сопротивления  $Z_{экв(n)}$ .

Для дополнительной верификации предложенной математической модели и созданной на её основе программы для определения условий появления резонанса создана динамическая модель расчётной схемы в трёхфазном исполнении в MATLAB Simulink (рис. 6).

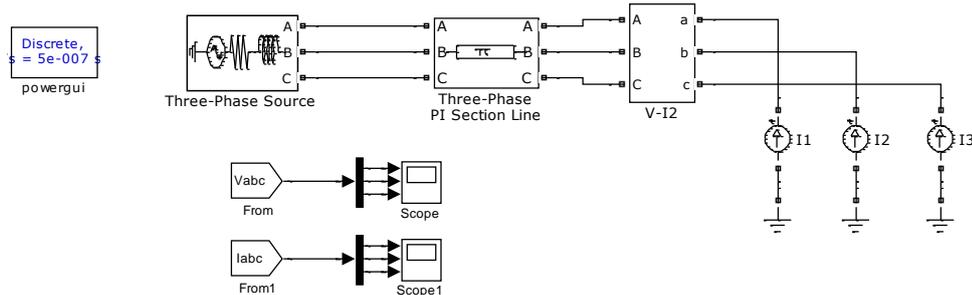


Рис. 6. Динамическая модель расчётной схемы в MATLAB Simulink

Fig. 6. Dynamic model of the analyzed circuit in MATLAB Simulink

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Результаты, полученные с использованием модели на рис. 6, совпали с результатами расчёта по формулам 5-8.

#### Обсуждение (Discussions)

Далее проведем расчет длин ЛЭП, при которых возможно появление резонанса на ВГ, генерируемых наиболее распространёнными 6- и 12-пульсными схемами выпрямления [10, 11, 15, 17-18], приведены в таблицах 1-2. Для расчёта использованы те же ВЛ 35, 110 и 220 кВ, что и для определения критических длин ВЛ при  $X_C = 0$ .

Таблица 1

Table 1

Результаты расчётного определения длин ВЛ 35, 110 кВ, при которых возникает резонанс на ВГ  
 Results of the calculation of the lengths of 35, 110 kV overhead lines at which resonance occurs on the overhead line

Номер гармоники $n$	Длина ВЛ, при которой возникает резонанс на ВГ, км							
	ВЛ 35 кВ при сопротивлении внешней ЭЭС, Ом				ВЛ 110 кВ при сопротивлении внешней ЭЭС, Ом			
	0	5	10	20	0	1	5	10
3	441,80	436,00	430,10	417,90	431,20	425,40	419,50	407,00
5	269,10	263,10	256,90	243,60	261,30	255,40	249,20	235,80
7	193,50	187,40	181,00	166,90	187,50	181,50	175,00	160,80
9	151,10	144,90	138,20	123,50	146,20	140,10	133,40	118,60
11	123,90	117,70	110,70	95,60	119,80	113,60	106,70	91,60
13	105,00	98,70	91,60	76,30	101,50	95,20	88,10	72,80
15	91,10	84,70	77,40	62,20	88,00	81,70	74,40	59,20
17	80,50	74,00	66,60	51,50	77,70	71,30	63,90	49,00
19	72,10	65,50	58,00	43,30	69,60	63,10	55,50	41,10
21	65,20	58,60	51,00	36,80	63,00	56,40	48,80	34,90
23	59,60	52,90	45,20	31,70	57,50	50,90	43,20	30,00
25	54,90	48,10	40,30	27,50	52,90	46,20	38,50	26,00
27	50,80	44,00	36,20	24,00	49,00	42,20	34,60	22,70
29	47,30	40,40	32,70	21,20	45,60	38,80	31,20	20,00
31	44,30	37,30	29,60	18,80	42,70	35,80	28,20	17,70
33	41,60	34,60	27,00	16,80	40,10	33,20	25,70	15,80
35	39,20	32,20	24,70	15,00	37,80	30,90	23,40	14,20
37	37,10	30,00	22,60	13,60	35,80	28,80	21,50	12,80
39	35,20	28,10	20,80	12,30	34,00	26,90	19,70	11,60
41	33,50	26,30	19,20	11,20	32,30	25,20	18,20	10,60
43	32,00	24,80	17,70	10,20	30,80	23,70	16,80	9,70
45	30,50	23,30	16,40	9,40	29,40	22,30	15,60	8,90
47	29,30	22,00	15,30	8,60	28,20	21,00	14,50	8,10
49	28,10	20,80	14,20	8,00	27,00	19,80	13,50	7,50

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Таблица 2

Table 2

Результаты расчётного определения длин ВЛ 220 кВ, при которых возникает резонанс на ВГ  
 Results of the calculation of the lengths of 220 kV overhead lines at which resonance occurs on the overhead line

Номер гармоники $n$	Длина ВЛ, при которой возникает резонанс на ВГ, км			
	ВЛ 220 кВ при сопротивлении внешней ЭЭС, Ом			
	0	1	5	10
3	441,50	435,40	429,10	415,90
5	265,20	259,00	252,50	238,40
7	189,50	183,30	176,50	161,70
9	147,40	141,10	134,10	118,80
11	120,60	114,20	107,10	91,40
13	102,10	95,60	88,30	72,50
15	88,50	81,90	74,40	58,90
17	78,10	71,50	63,80	48,60
19	69,90	63,20	55,40	40,80
21	63,20	56,50	48,60	34,60
23	57,70	50,90	43,00	29,70
25	53,10	46,20	38,30	25,70
27	49,20	42,20	34,40	22,40
29	45,80	38,80	31,00	19,80
31	42,80	35,80	28,00	17,50
33	40,20	33,10	25,50	15,60

Номер гармоники $n$	Длина ВЛ, при которой возникает резонанс на ВГ, км			
	ВЛ 220 кВ при сопротивлении внешней ЭЭС, Ом			
	0	1	5	10
35	37,90	30,80	23,20	14,00
37	35,90	28,70	21,30	12,60
39	34,00	26,80	19,50	11,40
41	32,40	25,10	18,00	10,40
43	30,90	23,60	16,60	9,50
45	29,50	22,20	15,40	8,70
47	28,20	20,90	14,30	8,00
49	27,10	19,70	13,30	7,40

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Приведённые в таблицах 1-2 результаты показывают, что резонанс на гармониках с номерами 5, 7, 11 и 13, преобладающих при работе 6- и 12-пульсных схем выпрямления, практически невозможен при реальных длинах ВЛ 35-220 кВ, применяемых для электроснабжения мощных нелинейных потребителей. При длинах ВЛ в диапазоне от 10 до 50 км резонанс может возникнуть на гармониках с номерами от 19 до 49 в зависимости от мощности ЭЭС. Токи этих ВГ, генерируемые нелинейной нагрузкой, незначительны [10, 19, 20] и чаще всего не учитываются при расчёте несинусоидальных режимов. Однако резонанс на ВГ может привести к многократному увеличению напряжения даже при малом токе искажения. Таким образом, увеличение пульсности схемы выпрямления, преследующее помимо прочего улучшение КЭЭ в ЭЭС за счёт компенсации токов ВГ низкого порядка, может привести к увеличению напряжения ВГ за счёт резонанса на гармониках более высокого порядка.

В частности, в [13] описаны случаи резонансных явлений на 35-й и 37-й гармонике в системе внешнего электроснабжения Братского алюминиевого завода. Завод питается от шин Братской ГЭС по 12 ВЛ 220 кВ длиной от 38,7 до 40,2 км. Представленные в таблице 2 данные для ВЛ 220 кВ при малом сопротивлении питающей ЭЭС и с учётом добротности образующегося резонансного контура подтверждают факт возникновения резонанса на указанных ВГ при таких длинах ВЛ. В 2011 году на Братской ГЭС проведён натурный эксперимент по замеру токов и напряжений ВГ со стороны ЭЭС (см. рис. 1). Выполнение замеров на стороне нелинейной нагрузки, где по результатам исследования в данной статье должны наблюдаться резонансные перенапряжения на ВГ, было невозможно организационно и технически (из-за отсутствия трансформаторов напряжения на приёмном конце ЛЭП 220 кВ). Тем не менее, на рисунке 7 представлено косвенное подтверждение корректности расчёта условий резонансных перенапряжений на ВГ в узле подключения нелинейной нагрузки.

На рисунке 7 в качестве примера приведены результаты измерений токов ВГ со стороны ОРУ 220 кВ Братской ГЭС на пяти ВЛ 220 кВ, питающих Братский алюминиевый завод. На графике хорошо виден косвенный признак резонансного процесса – аномальное увеличение 35-й и 37-й ВГ тока ВЛ 220 кВ при малом значении токов этих же ВГ, генерируемых электролизёрами алюминиевого завода на приёмной стороне ВЛ. Таким образом, наблюдается резонанс токов, сопровождающийся увеличением токов ВГ в продольном сопротивлении ЛЭП как в одном из параллельных контуров резонансной схемы. Вместе с тем измерения напряжений ВГ на конце ЛЭП 220 кВ со стороны алюминиевого завода могли бы снять последние возможные сомнения в корректности моделирования резонансных перенапряжений в рассматриваемой схеме питания искажающей нагрузки.

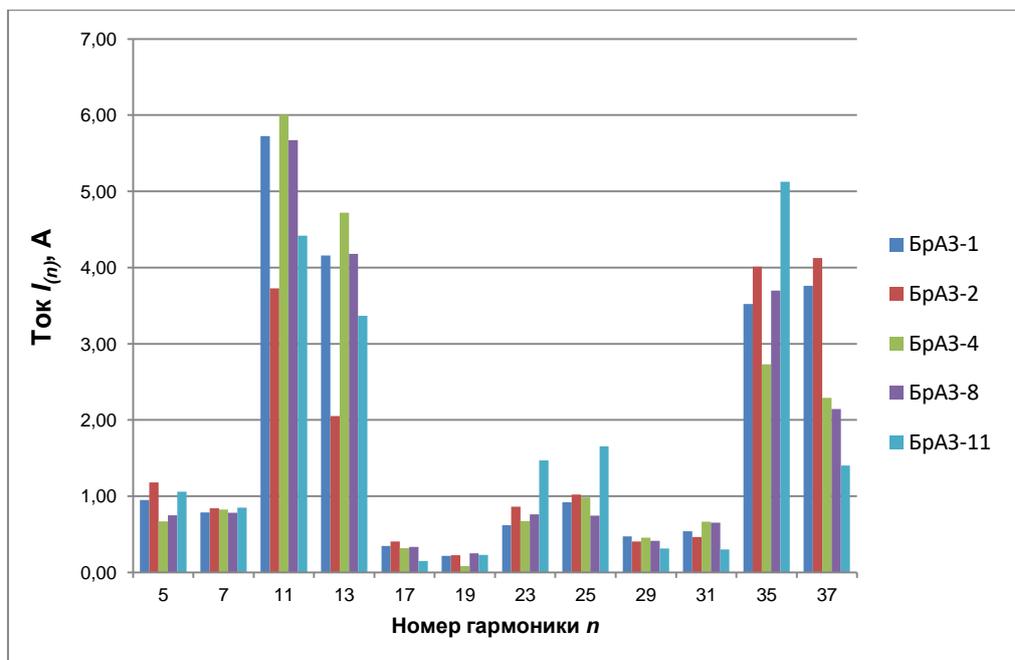


Рис. 7. Токи ВГ в ЛЭП 220 кВ, питающих Братский алюминиевый завод  
 \*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Fig. 7. Currents of higher harmonics at 220 kV power lines supplying the Bratsk aluminum plant

Исходя из полученных в таблицах 1, 2 параметров ЛЭП и ЭЭС, можно описать в общем виде порядок применения практических рекомендаций при проектировании схемы внешнего электроснабжения нелинейной нагрузки и выборе длин питающих линий 35-220 кВ:

- при наличии мощной нелинейной нагрузки, планируемой для подключения к ЭЭС через ЛЭП 35-220 кВ, определить номера ВГ, генерируемых данной нагрузкой;
- выполнить предварительный расчёт длин питающих ЛЭП 35-220 кВ для подключения мощной нелинейной нагрузки;
- по известным уровням токов трёхфазного короткого замыкания на шинах ЭЭС рассчитать эквивалентное индуктивное сопротивление ЭЭС для частоты 50 Гц;
- по табл. 1, 2 проверить, не совпадает ли длина питающей ЛЭП с резонансными длинами ЛЭП для номеров ВГ, генерируемых нелинейной нагрузкой, с учётом сопротивления внешней ЭЭС;
- в случае если длина ЛЭП попадает в интервал  $\pm 3$  км от резонансной длины по табл. 1, 2 (с учётом добротности амплитудно-частотных характеристик входных сопротивлений на рис. 4, 5), выполнить изменение длины питающей ЛЭП для выхода из резонансных интервалов по рассматриваемым ВГ.

Следует помнить, что в используемой модели есть неточности, связанные с особенностями принятой на рис. 2 П-образной схемы замещения с сосредоточенными параметрами [13, 15]. Также в табл. 1, 2 рассмотрены только 4 значения сопротивлений ЭЭС, однако модель и программа в MATLAB позволяют проводить расчет условий появления резонанса для любых сочетаний ВЛ и сопротивлений ЭЭС.

#### Заключение (Conclusions)

Исследован вопрос возникновения резонанса на ВГ в распространённой схеме питания мощной нелинейной нагрузки по ВЛ 35, 110, 220 кВ. В отличие от резонансов на частоте 50 Гц, описанных в учебной литературе<sup>1</sup> и принимаемых во внимание при проектировании дальних электропередач переменного тока, резонансы на ВГ наблюдаются при гораздо меньшей длине ЛЭП, питающих нелинейную нагрузку, и не учитываются при проектировании схемы внешнего электроснабжения мощных искажающих электроприёмников. Однако резонанс на ВГ требует учёта, поскольку опасен многократным увеличением напряжения ВГ в узле подключения искажающей нагрузки и токов ВГ в элементах сети даже при малых токах искажения потребителя. В результате исследования получено в общем виде условие возникновения резонанса на

<sup>1</sup> Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.

ВГ при определённой длине ВЛ, питающей нелинейную нагрузку от шин бесконечной мощности. Для анализа резонансных процессов при ненулевом сопротивлении питающей ЭЭС составлена модель статической схемы замещения с учётом зависимости её параметров от частоты, а также динамическая модель в MATLAB Simulink. С использованием разработанной программы определены длины ВЛ 35, 110, 220 кВ, при которых возможно появление резонанса на нечётных гармониках до 50-го порядка. В частности, установлено, что для ВЛ 220 кВ длина ЛЭП, при которой наблюдается резонанс на 35-й и 37-й гармониках, составляет 35,9-37,9 км при малом сопротивлении питающей ЭЭС. Это хорошо согласуется с результатами натуральных экспериментов, когда в схеме питания потребителя по ВЛ 220 кВ длиной около 40 км зафиксированы резонансные явления на указанных гармониках. При этом увеличение пульсности схемы выпрямления, которое, как известно, улучшает КЭЭ, в данном случае способствует увеличению напряжений и токов ВГ за счёт резонанса.

#### Литература

1. Чжан, Ц. Влияние нелинейной нагрузки на конденсаторные батареи и режимы работы систем электроснабжения среднего напряжения / Ц. Чжан, В. А. Сериков, В. Н. Костин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 419-423. doi: 10.24412/2071-6168-2023-9-414-415.
2. Костин В.Н., Кривенко А.В., Сериков В.А. Влияние высших гармоник на качество напряжения и на работу конденсаторных батарей в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 431-441.
3. Badoni M., Singh A. and Singh B. Power Quality Enhancement Using Euclidean Direction Search Based Control Technique // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 67, N 3, pp. 2231-2240, March 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2905835.
4. Гилязов В.Р. Анализ наиболее важных показателей качества электрической энергии: причины ухудшения, зависимость потребителей и методы борьбы с отклонениями // Мавлютовские чтения : Материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции; 25–27 октября 2022 г. Том 3. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – С. 365-369.
5. Zhang X.-P., Yan Z. Energy Quality: A Definition // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. Vol. 7. pp. 430-440. doi: 10.1109/OAJPE.2020.3029767.
6. Макашева, С.И. Анализ качества электрической энергии в питающей сети 220 кВ с присоединенными тяговыми подстанциями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 4(72). – С. 143-151. – DOI 10.26731/1813-9108.2021.4(72).143-151..
7. Наумов, И. В. Минимизация последствий искажения качества электрической энергии при несимметрично-несинусоидальном электропотреблении / И. В. Наумов, Э. С. Федорова, М. А. Якупова // Промышленная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 52-61. doi: 10.34831/EP.2023.56.49.007.
8. Овечкин, И. С. Разработка технических решений по уменьшению искажения синусоидальности кривой напряжения воздушных линий, питающих устройства автоблокировки / И. С. Овечкин, Е. Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. №3(79). С. 112-123. doi: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).112-123.
9. Коваленко Д.В. Определение резонансной частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности и наличии высших гармоник // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 8-1. С. 16-21.
10. Fedosov D.S. Research of multipulse rectification circuits for alternating current by the example of Taishet aluminum plant // Proceedings «Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future». Vol. I. Magdeburg-Irkutsk: OvGU, 2012.
11. Федосов Д.С., Пудов А.Н., Медведев Р.Ю. Исследование схем выпрямления переменного тока на алюминиевых заводах // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012.
12. Способ определения комплексного значения совокупных потерь полной мощности в системе электроснабжения / В. С. Ливенцов, С. С. Костинский, А. И. Троицкий, Н. С. Савелов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2022. Т. 65, № 4. С. 97-107. doi: 10.17213/0136-3360-2022-4-97-107.
13. Федосов Д.С., Тарасов И.А., Воронцов Д.В. Исследование резонансных явлений на высших гармониках в схеме внешнего электроснабжения нелинейной нагрузки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 4(111). С. 145-154. doi: 10.21285/1814-3520-2016-4-145-154.

14. Чадов С.Н. Численное исследование модели энергетической системы // Вестник ИГЭУ. 2009. №4. С. 49-52.
15. Муkenди К.Л., Тигунцев С.Г. Исследование несинусоидальных режимов в частной электрической сети "КАМОТО COPPER COMPANY" с выпрямительной нагрузкой // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием; 22–26 апреля 2019 года. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. Т. 2. С. 253-257.
16. Kulikov A., Pyushin P., Suslov K., Filippov S. Organization of Control of the Generalized Power Quality Parameter Using Wald's Sequential Analysis Procedure // *Inventions*. 2023. Vol. 8, No. 1. P. 17. doi: 10.3390/inventions8010017.
17. Шепелев А.О., Шепелева Е.Ю. Исследование несинусоидальных режимов работы электрооборудования в системе электроснабжения с 6-пульсным преобразователем // Вестник Югорского государственного университета. 2022. № 2(65). С. 68-78. doi: 10.18822/byusu20220268-78.
18. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Исследование работы прогностических регуляторов установки распределенной генерации в системе электроснабжения с мощным накопителем электроэнергии // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 4. С. 448-458. doi: 10.17516/1999-494X-0325.
19. Gerasimiyuk A.Y., Smokovenko N.V., Nasyrov R.R., Kalenkin D.A. Development of a methodology for the assessment of the actual contribution of a certain consumer to the distortion of the voltage sinusoid // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2021. pp. 1-5. doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9388000.
20. Плащанский Л.А., Зарипов Ш.У. Влияние высших гармоник на состояние электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 2. С. 61-66.

#### Авторы публикации

**Зубова Екатерина Васильевна** – аспирант, специалист по учебно-методической работе кафедры электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета. *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0914-2027>. E-mail: [zubova@ex.istu.edu](mailto:zubova@ex.istu.edu)*

**Федосов Денис Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета. *ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5989-9549>. E-mail: [fedosov\\_ds@ex.istu.edu](mailto:fedosov_ds@ex.istu.edu)*

#### References

1. Zhang Z., Serikov VA, Kostin VN. Influence of nonlinear load on capacitor batteries and operating modes of medium voltage power supply systems. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2023; 9: 419-423. (In Russ). doi: 10.24412/2071-6168-2023-9-414-415.
2. Kostin VN, Krivenko AV, Serikov VA. Influence of high harmonics on the quality of voltage and on the operation of capacitor banks in electric supply systems with non-linear load. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2020; 5: 431-441. (In Russ).
3. Badoni M., Singh A., Singh B. Power quality enhancement using Euclidean direction search based control technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020; 67(3): 2231-2240. doi: 10.1109/TIE.2019.2905835.
4. Gilyazev VR. Analiz naibolee vazhnykh pokazatelei kachestva elektricheskoi energii: prichiny ukhudsheniya, zavisimost' potrebitelei i metody bor'by s otkloneniyami. In: *Mavlyutovskie chteniya: proceedings of the XVI All-Russian youth scientific conference; 25-27 Oct 2022; Ufa, Russia*. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet, 2022. Vol. 3. Pp. 365-369. (In Russ).
5. Zhang X.-P., Yan Z. Energy quality: a definition. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. 2020; 7: 430-440. doi: 10.1109/OAJPE.2020.3029767.
6. Makasheva SI. Power quality analysis in the 220 kV supply network with connected traction substations. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2021; 4(72): 143-151. (In Russ). doi: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).143-151.
7. Naumov IV, Fedorinova ES, Yakupova MA. Minimization of the consequences of power quality distortion in case of asymmetric-non-sinusoidal power consumption. *Industrial Power Engineering*. 2023; 3: 52-61. (In Russ). doi: 10.34831/EP.2023.56.49.007.
8. Ovechkin IS, Puzina EYu. Development of technical solutions to reduce the distortion of the sinusoidal voltage curve of overhead lines feeding automatic blocking devices. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2023; 3(79): 112-123. (In Russ). doi: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).112-

123.

9. Kovalenko DV. Determining the resonance frequency of the power supply system when changing the degree of compensation of reactive power and higher harmonics. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2017; 8(1): 16-21. (In Russ.).

10. Fedosov D.S. Research of multipulse rectification circuits for alternating current by the example of Taishet aluminum plant. In: *Proceedings «Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future»; 2012; Magdeburg, Irkutsk*. Magdeburg: OvGU; 2012. Vol. I. Pp. 85-91.

11. Fedosov DS, Pudov AN, Medvedev RYu. Issledovanie skhem vypryamleniya peremennogo toka na aluminievyykh zavodakh. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation; 2012; Irkutsk, Russia*. Irkutsk: ISTU Publishing House, 2012. Pp. 277-283. (In Russ.).

12. Liventsov VS, Kostinskiy SS, Troitskiy AI, et al. Method for determining the complex value of the total power losses in the power supply system. *Russian Electromechanics*. 2023; 65: 97-107. (In Russ.). doi: 10.17213/0136-3360-2022-4-97-107.

13. Fedosov DS, Tarasov IA, Vorontsov DV. Studying resonance higher harmonic phenomena in the external power supply scheme of a non-linear load. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016; 4(111): 145-154. (In Russ.). doi: 10.21285/1814-3520-2016-4-145-154.

14. Chadov SN. Numerical study of a model power system. *Vestnik IGEU*. 2009; 4: 49-52. (In Russ.).

15. Mukendi KL, Tiguntsev SG. Issledovanie nesinusoidal'nykh rezhimov v chastnoi elektricheskoi seti "KAMOTO COPPER COMPANY" s vypryamitel'noi nagruzkoi. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation; 22-26 Apr 2019; Irkutsk, Russia*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2019. Vol. 2. Pp. 253-257. (In Russ.).

16. Kulikov A., Ilyushin P., Suslov K., et al. Organization of control of the generalized power quality parameter using Wald's sequential analysis procedure. *Inventions*. 2023; 8(1): 17. doi: 10.3390/inventions8010017.

17. Shepelev AO, Shepeleva EYu. Analysis of non-sinusoidal operating modes of electrical equipment in electrical supply system with 6-pulse transducer. *Yugra State University Bulletin*. 2022; 18(2): 68-78. (In Russ.). doi: 10.18822/byusu20220268-78.

18. Bulatov YuN, Kryukov AV, Suslov KV. Research of operation of predictive controllers of distributed generation plant in power supply system with energy storage. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol*. 2021; 14(4): 448-458. (In Russ.). doi: 10.17516/1999-494X-0325.

19. Gerasimyuk A.Y., Smokovenko N.V., Nasyrov R.R., et al. Development of a methodology for the assessment of the actual contribution of a certain consumer to the distortion of the voltage sinusoid. In: *2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE); Moscow*. Moscow: MPEI; 2021. Pp. 1-5. doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9388000.

20. Plashansky LA, Zaripov ShU. Vliyanie vysshikh garmonik na sostoyanie elektricheskikh setei. *Minerals and Mining Engineering*. 2010; 2: 61-66. (In Russ.).

### **Authors of the publication**

**Ekaterina V. Zubova** – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

**Denis S. Fedosov** – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы».*

**Получено** **23.04.2024 г.**

**Отредактировано** **03.05.2024 г.**

**Принято** **16.05.2024 г.**



## СНИЖЕНИЕ КРАТНОСТИ КОММУТАЦИОННОГО ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ГЕНЕРАТОРНЫХ СЕТЯХ

Бельский Р.А., Фролов В.Я., Жилиготов Р.И., Сафонов Е.П.

ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4545-1086>, [belskij\\_ra@spbstu.ru](mailto:belskij_ra@spbstu.ru)

**Резюме:** ЦЕЛЬ исследования заключается в изучении проблемы коммутационных перенапряжений в генераторных сетях 10 кВ. Используя пакет MATLAB Simulink, создать модель собственных нужд электростанции на 10/0,4 кВ, рассчитать перенапряжение при разных срезях тока, оценить влияние вакуумных выключателей друг на друга, оценить эффективность нелинейных ограничителей перенапряжений, при параллельной коммутации. НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ состоит в получении метода расчёта переходных процессов при одновременной коммутации нескольких выключателей. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ заключается в возможности использовать полученную модель для более точного подбора защитного оборудования. МЕТОДЫ. Для создания модели собственных нужд 10/0,4 кВ и расчётов переходных процессов в ней использовался пакет MATLAB Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье рассмотрены коммутационные перенапряжения в собственных нуждах 10/0,4 кВ. Оценено влияние параллельной коммутации вакуумных выключателей на рост кратности перенапряжений. Так же было оценено влияние удельной энергоёмкости нелинейных ограничителей перенапряжений на кратность перенапряжений. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Данная модель показала, что параллельная коммутация двух вакуумных выключателей может повысить кратность перенапряжения на 20-40 %, что может привести к повышению износа, как изоляции защищаемого оборудования, так и к вероятности повторного пробоя в вакуумной камере. Причём чем выше срез тока, тем выше будет рост кратности перенапряжения, также кратность будет расти, если будет уменьшаться время отключения между выключателями. Основным средством защиты от коммутационных перенапряжений является нелинейный ограничитель перенапряжений, но при их выборе учитывается в первую очередь номинальное рабочее напряжения, что приводит к тому, что рост кратности перенапряжения от параллельной коммутации может нивелировать эффективность нелинейного ограничителя.

**Ключевые слова:** Собственные нужды электростанций; коммутационные перенапряжения; вакуумные выключатели; нелинейные ограничители перенапряжений; компьютерное моделирование; MATLAB Simulink

**Благодарности:** Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по Государственному заданию FSEG-2023-0012

**Для цитирования:** Бельский Р.А., Фролов В.Я., Жилиготов Р.И., Сафонов Е.П. Снижение кратности коммутационного перенапряжения в генераторных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 96-107. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-96-107.

## REDUCING THE FREQUENCY OF SWITCHING OVERVOLTAGE IN GENERATOR NETWORKS

Belsky R.A., Frolov V.Y., Zhilgotov R.I., Safonov E.P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4545-1086>, [belskij\\_ra@spbstu.ru](mailto:belskij_ra@spbstu.ru)

**Abstract:** THE PURPOSE of the study is to study the problem of switching overvoltages in 10 kV generator networks. Using the Matlab Simulink package, create a model of common auxiliaries of a 10/0.4 kV power station, calculate the overvoltage at different sections of the current, evaluate the effect of vacuum switches on each other, evaluate the effectiveness of

*nonlinear overstrain limiters, with parallel switching. THE SCIENTIFIC SIGNIFICANCE consists in obtaining a method for calculating transients with simultaneous switching of several switches. THE PRACTICAL SIGNIFICANCE lies in the possibility of using the resulting model for a more accurate selection of protective equipment. METHODS. To create a model of common auxiliaries of 10/0.4 kV and the calculations of transition processes, it used a Matlab Simulink package. RESULTS. The article discusses switching overvoltages in their own needs of 10/0.4 kV. The influence of parallel switching of vacuum circuit breakers on the increase in the multiplicity of overvoltages is estimated. The influence of the specific energy intensity of nonlinear surge limiters on the multiplicity of overvoltages was also evaluated. CONCLUSION. This model showed that the parallel switching of two vacuum circuit breakers can increase the frequency of overvoltage by 20-40 %, which can lead to an increase in wear of both insulation of the protected equipment and the probability of re-breakdown in a vacuum chamber. Moreover, the higher the current cut, the higher the increase in the frequency of the overstrain, the multiplicity will also increase if the shutdown time between the switches is reduced. The main means of protection against switching overvoltages is a non-linear overstrain limiter, but when they are selected, the nominal working voltage is primarily taken into account, which leads to the fact that the increase in the frequency of overstrain from parallel switching can level the effectiveness of a nonlinear limiter.*

**Keywords:** Common auxiliaries; switching overvoltage; vacuum circuit breakers; surge arrester; computer modelling; Matlab Simulink.

**Acknowledgments:** This work, based on the results of which the article was completed, was carried out according to the State task of FSEG-2023-0012

**For citation:** Belsky R.A., Frolov V.Y., Zhiligitov R.I., Safonov E.P. Reducing the frequency of switching overvoltage in generator networks. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (3): 96-107. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-96-107.

#### **Введение (Introduction)**

На сегодняшний день в России продолжается модернизация распределительных подстанций и генераторных сетей, в частности происходит замена вакуумными выключателями воздушных и масляных выключателей [1,2,3]. Выбор в пользу вакуумных выключателей происходит благодаря ряду его преимуществ: автономность, высокая эксплуатационная надежность, высокое быстродействие и т.д. Но из-за неустойчивости дуги при малых токах, вакуумные выключатели способны создавать коммутационные перенапряжения, приводящие к износу оборудования и изоляции. С этой точки зрения наиболее тяжелым является случай, при котором происходит одновременное отключение нескольких потребителей вакуумными выключателями [4]. Подобное возможно:

- 1) При работе устройства резервирования отключения выключателя (УРОВ).
- 2) При использовании дифференциальной защиты шин (ДЗШ).
- 3) Частотная разгрузка сети.

Как указано в [1] и [5], подобные перенапряжения могут быть и в системе электроснабжения собственных нужд электростанций. Как можно увидеть из типичной однолинейной схемы собственных нужд атомной электростанции (рис 1) здесь имеет место быть подключению к одной шине множества коммутационной аппаратуры, что создаёт высокий риск одновременной ее коммутации. Поскольку такие режимы возможны и в генераторных сетях АЭС, то данная проблема требует более тщательного рассмотрения с точки зрения анализа коммутационных перенапряжений, генерируемых вакуумными выключателями. Данная работа представляет актуальность, поскольку она предоставляет метод расчёта переходных процессов в сетях собственных нужд электростанций при одновременном отключении нескольких выключателей. Цель исследования заключается в анализе переходных процессов в генераторных сетях при одновременном отключении нескольких вакуумных выключателей, а также в разработке метода снижения кратности перенапряжения с помощью ОПН.

Для того чтобы определить, имелись ли решения подобной проблемы ранее, был проведен анализ материалов, посвящённых проблеме коммутации вакуумных выключателей:

– В [1] рассмотрены эксплуатационные преимущества вакуумных выключателей для средних классов напряжений. Описано устройство и развитие вакуумной техники. Даны основные преимущества вакуумных выключателей над остальными. Большая часть работы посвящена отключению вакуумными выключателями электрических двигателей и

конденсаторных батарей. Авторы рекомендуют использовать для защиты ОПН. Все опыты проходили только с одним выключателем.

– [4] – одна из немногих работ, в которых рассматривается проблема взаимодействия вакуумных камер между собой. В данной работе отмечен рост тока короткого замыкания вместе с ростом числа вакуумных камер, но возникающие осложнения компенсировались равномерным распределением тока по камерам. Все опыты проходили на одной шине и одном потребителе.

– В [5] указано, что при высокочастотных перенапряжениях ОПН малоэффективны, не оказывают влияния на частоту воздействующего напряжения. Для защиты от высокочастотных предполагается использование RC-цепочек, но указано, что они являются дорогими и могут возникнуть проблемы с выбором ёмкости и размещением, особенно если это двигатель.

– Авторами статьи [6] была создана модель в виде идеального выключателя с подключёнными параллельно пассивными элементами. Все расчёты посвящены взаимодействию вакуумного выключателя и трансформатором. В данной статье рассматривается только высокочастотный ток.

– В работе [7] рассматривалась модель ВВ, работающего с шунтирующим реактором. Показано, что напряжение при отключении шунтирующего реактора может возрастать с 24 кВ до 41 кВ, что может отрицательно сказаться на изоляции трансформаторов.

– В работа [8] были проведены опыты с ОПН на напряжения 10 кВ с целью определения импеданса цепи заземления. По результатам что увеличение импеданса способно увеличить остаточное напряжение, что может привести к увеличению кратности перенапряжений.

– В статье [9] приведена модель вакуумного выключателя - созданная в программе АТР-ЕМТР – отключающая ёмкостной элемент. Авторы указывают на какие параметры стоит опираться в первую очередь при моделировании: ток среза и наклон тока. Все приведённые ниже исследования проводились на основе исследований данных в этой статье.

– Статья [10] также разбирает отключение шунтирующего реактора вакуумными выключателями, но на напряжение 35 кВ. Авторы утверждают, что на рост перенапряжения влияет не только срез тока, но и одновременное отключение фаз в вакуумном выключателе. В статье моделируется отключение первой фазы и последующего отключения второй и третьей фазы. Моделирование осуществлялось в программе PSCAD/EMTDC. Основным источником перенапряжения является срез тока при отключении первой фазы, к которому добавляются перенапряжения от срезов тока второй и третьей фазы.

Для решения проблемы с повышением перенапряжения предлагается использовать асинхронное отключение фаз: последние два полюса не будут двигаться пока не будет открыта первая фаза. За счёт этого формируется значительный временной промежуток, который снижает кратность перенапряжения.

– Вакуумные выключатели широко используются в морских ветряных электростанциях и из-за частых коммутация генерируют перенапряжения, ухудшающие качество изоляции. Авторы [11] предлагают для защиты, помимо ОПН и RC-цепи использовать умный дроссель (smart choke). Перенапряжения моделировались с помощью INPSCAD/EMTDC, при моделировании учитывались крутизна, амплитуда и повторное зажигание. Результаты показывают, что комбинация ОПН и умного дросселя способна обеспечить достаточную защиту от высокой амплитуды напряжения и повторных зажиганий.

– В статье [12] рассматривается проблема отключения шунтирующих реакторов вакуумными выключателями в сети 20 кВ. Дана оценка различным методам защиты от перенапряжений - ОПН и RC-цепи. Результаты моделирования, сделанные в программе PSCAD/EMTDC, показывают, коммутационные перенапряжения, вызванные вакуумными выключателями способны приводить к повторным пробоям, что в свою очередь приводит к износу, изоляции Авторы предлагают использовать RC-цепи, благодаря гибкости подбора параметров. Одновременно с этим авторы предлагают использовать ОПН благодаря его простоте и доступности, при этом в статье указано, что для установки ОПН необходимо проводить компьютерное моделирование и проверять вольтамперную кривую, для оптимизации работы в сети. Одновременно отключение нескольких выключателей в статье не рассматривалось.

– В статье приведена [13] модель трансформаторной подстанции на 10 кВ в АТР-ЕМТР. В модели были учтены срезы тока, диэлектрическая прочность изоляции и модель высокочастотной дуги. Модель делалась с учётом повторного зажигания дуги. Смоделированы условия, при которых выходит из строя шунтирующий реактор. Основной упор делался на влияние перенапряжений на кабели и шины. Результаты исследования

показывают, что тип кабеля не оказывают существенного влияния на перенапряжение, а оказывают режим работы трансформатора и длина кабеля. По мере увеличения длины кабеля уменьшается перенапряжение на оборудовании. Перенапряжение на реакторах и трансформаторах можно уменьшить, увеличив поперечное сечение кабеля.

– Работа [14] посвящена параллельному отключению вакуумных выключателей. Схему с параллельным отключением предполагается использовать для отключения высоких значений тока короткого замыкания. Данную схему авторы предлагают использовать для отключения емкостных цепей. Модель была создана на базе Matlab и содержит в себе ударный генератор с током короткого замыкания 160 кА. По результатам работы показано, что асимметрии ветвей, к которым подключены выключатели мало влияет на результат отключения, также параллельное использование выключателей мало влияет на переходное восстанавливающееся напряжение.

– В статье [15] была построена в MATLAB с учётом тока среза, высокочастотной дуги и повторных пробоев. Особенность модели заключается в большом количестве параметров, закладываемых при моделировании. Данную модель можно использовать для отслеживания анализа и оценки риска перенапряжения при постоянных отключениях.

На основе проанализированного можно сделать вывод: на сегодняшний день проблемы параллельной коммутации рассмотрены недостаточно подробно, хотя создаваемые им аварийные режимы, могут иметь место в генераторных сетях и приводить к эскалации перенапряжения. Поэтому и были произведены исследования, представленные в данной работе, чья научная значимость состоит в разработке метода расчёта переходных процессов при одновременно отключении нескольких выключателей, который в дальнейшем можно использовать для расчёта не только генераторных сетей, но и любых сетей средних напряжений; а практическая значимость состоит в возможности использования данной модели для улучшения защиты собственных нужд электростанций за счёт более точного подбора ОПН.

#### Материалы и методы (Materials and methods)

Схема системы собственных нужд (рис 1), на основе которой создана модель, представлена на рисунке 2. Особенностью модели, представленной в данной статье, является то, что в ней учитывается как тока среза, так и ток высокой частоты, который может возникать при отключении выключателя.

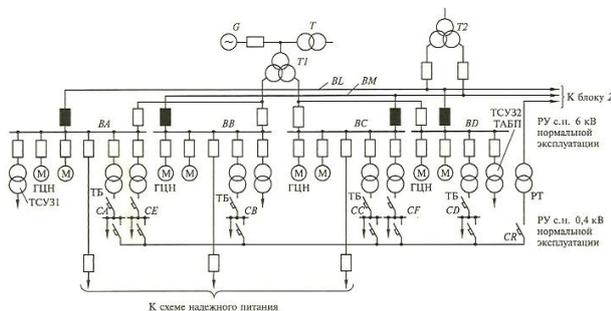


Рис. 1. Схема электроснабжения потребителей собственных нужд третьей группы одного блока АЭС

Fig. 1. The scheme of power supply to consumers of their own needs of the third group of one NPP unit AES

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

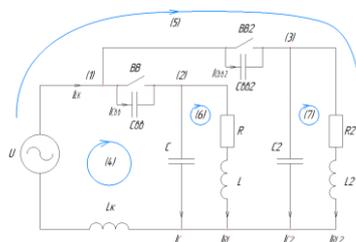


Рис. 2. Схема замещения цепи, отключаемой двумя вакуумными выключателями

Fig. 2. Replacement circuit diagram of a circuit switched off by two vacuum switches

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Контур, отвечающий за ток высокой частоты, состоящий из емкостей  $C_{вв}$  (вакуумный выключатель) и  $C$  (эквивалентная ёмкость потребителя.), а также из индуктивности  $L$  (индуктивность первого потребителя).  $C_{вв}$  также отвечает за рост перенапряжения при срезе тока в вакуумном выключателе. Основные колебательные процессы происходят в контуре  $C$  и  $L$ .

Система операторных уравнений для расчёта переходных процессов операторным методом в схеме с двумя выключателями (рис 2), которая учитывает всё вышеперечисленное, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} I_{LK} = I_{C_{BB}} + I_{C_{BB2}} \\ I_{C_{BB}} = I_C + I_{RL} \\ I_{C_{BB2}} = I_{C_2} + I_{RL2} \\ E(p) = I_{L_K} \cdot L_K \cdot p + I_{C_{BB}} \cdot 1/(C_{\text{св}} \cdot p) + I_C \cdot 1/(C \cdot p) \\ E(p) = I_{L_K} \cdot L_K \cdot p + I_{C_{BB2}} \cdot 1/(C_{\text{св}2} \cdot p) + I_{C_2} \cdot 1/(C2 \cdot p) \\ I_C \cdot 1/(C \cdot p) = I_{RL} \cdot (R + L \cdot p) \\ I_{C_2} \cdot 1/(C2 \cdot p) = I_{RL2} \cdot (R_2 + L_2 \cdot p) \end{cases}$$

где  $U$  – источник питания,  $L_K$  – индуктивность шины,  $R$  – активное сопротивление первого потребителя,  $L$  – индуктивность первого потребителя,  $C$  – эквивалентная ёмкость первого потребителя,  $C_{\text{св}}$  – эквивалентная ёмкость первого выключателя,  $R_2$  – активное сопротивление второго потребителя,  $L_2$  – индуктивность второго потребителя,  $C_2$  – эквивалентная ёмкость второго потребителя,  $C_{\text{св}2}$  – эквивалентная ёмкость второго выключателя,  $I_{LK}$  – ток в шине,  $I_{C_{BB}}$  – ток через эквивалентную ёмкость первого выключателя,  $I_C$  – ток через эквивалентную ёмкость первого потребителя,  $I_{RL}$  – ток первого потребителя,  $I_{RL2}$  – ток второго потребителя.

Поскольку уравнение имеет семь переменных, было принято решение рассчитать переходный процесс в программе MATLAB Simulink, модель для 10 кВ в данной среде представлена на рисунке 3, где  $C$  – эквивалентная ёмкость потребителей,  $RL$  – активно-индуктивное сопротивление потребителей,  $BB$  – вакуумный выключатель,  $ОПН$  – нелинейный ограничитель потребителей.

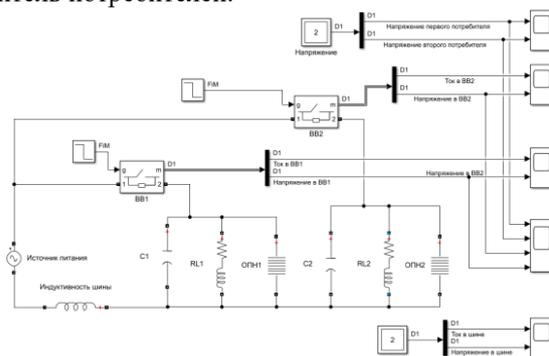


Рисунок 3. Подключение ОПН к нагрузкам. Модель в MATLAB Simulink. Отключение двух выключателей в программе MATLAB Simulink.

Figure 3. Connection of the surge arrester to loads. The model in MATLAB Simulink. Disabling two switches in the MATLAB Simulink program.

Сам расчёт для модели, представленной на рисунке 3, строится по следующему алгоритму:

- 1) Задаём значение напряжения источника, активных и индуктивных сопротивлений потребителей и эквивалентной мощности потребителей для модели на рисунке 3.
- 2) Производится расчёт для нормального режима (контакты обоих выключателей замкнуты для выключателей, находящихся в замкнутом положении).
- 3) Выбираем точки, соответствующие срезам тока 0,5 А, 1 А и 2А в нагрузках.
- 4) Производим расчёт коммутации одного выключателя.
- 5) Производим расчёт при отключении двух выключателях при промежутке между отключениями на 1,2,4,6,8,10,20 и 40 мкс.

Для проверки эффективности нелинейных ограничителей для снабжения кратности перенапряжений, аналогичные расчёты были произведены для модели на 10 кВ при подключенных ОПН. На рис 3 ОПН подключен к потребителям.

#### Результаты (Results)

Из расчёта получаем графики для напряжений на конденсаторах и токов в индуктивностях при нормальном режиме работы на рисунках 4-5. Результаты для коммутации одного выключателя при токе среза 2 А представлены на рисунках 6-8. Для оценки частоты, на рисунке 12 представлен период колебаний напряжения на первом вакуумном выключателе.

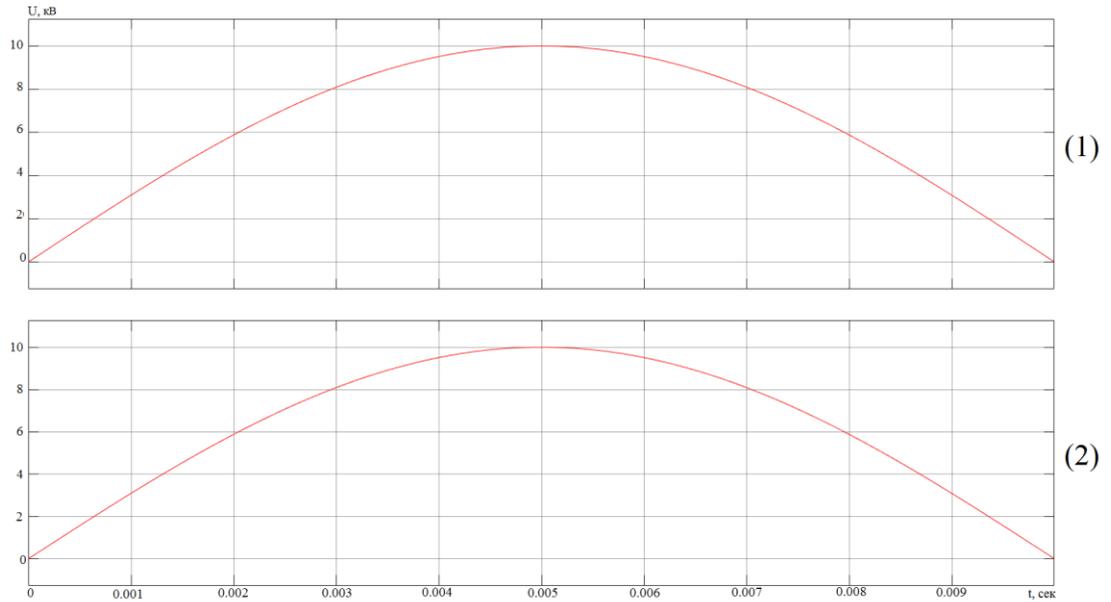


Рис. 4. Начальное напряжение. 1 – напряжение на эквивалентной ёмкости первого потребителя, 2 – напряжение на эквивалентной ёмкости второго потребителя

Fig. 4. Initial voltage. 1 – voltage at the equivalent capacity of the first consumer, 2 – voltage at the equivalent capacity of the second consumer

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 4 представлены напряжения на потребителях при нормальном режиме работы. Данный график нужен для того, чтобы определить начальные точки для расчёта переходного процесса.

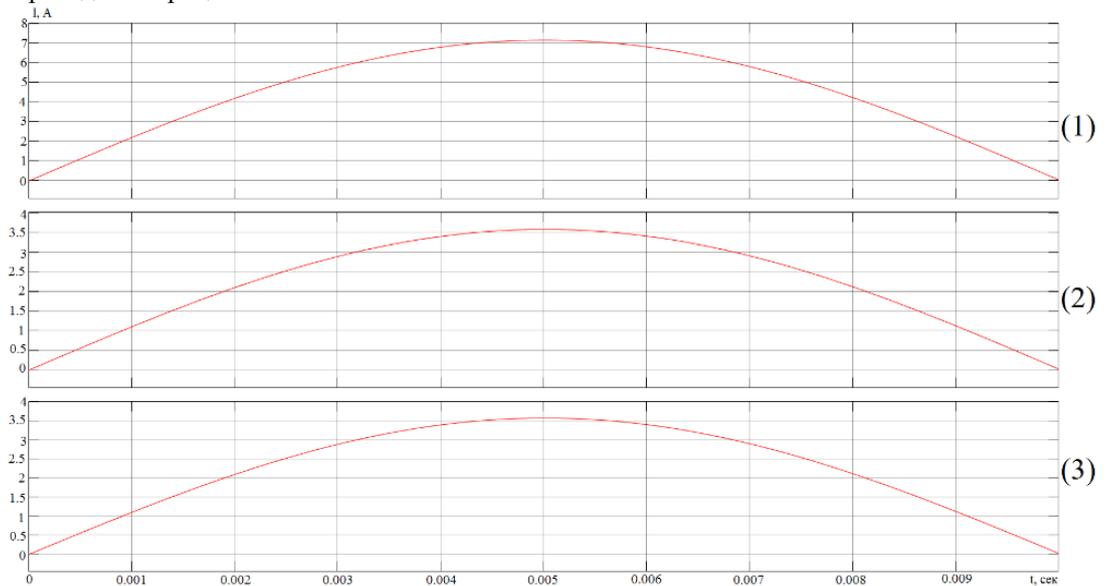


Рис. 5. Начальный ток. 1 – ток шины, 2 – ток через индуктивность первого потребителя, 3 – ток через индуктивность второго потребителя

Fig. 5. Initial current. 1 – bus current, 2 – current through the inductance of the first consumer, 3 – current through the inductance of the second consumer

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 5 (также, как и на рис 4.) представлена работа модели при нормальном режиме, но представлены токи в потребителях и общий ток, который является суммой токов в потребителях. Именно по этому графику выбираются токи среза согласно вышеприведённому алгоритму. Выключатель должен отключаться при достижении током 2, 1 и 0,5 А соответственно.

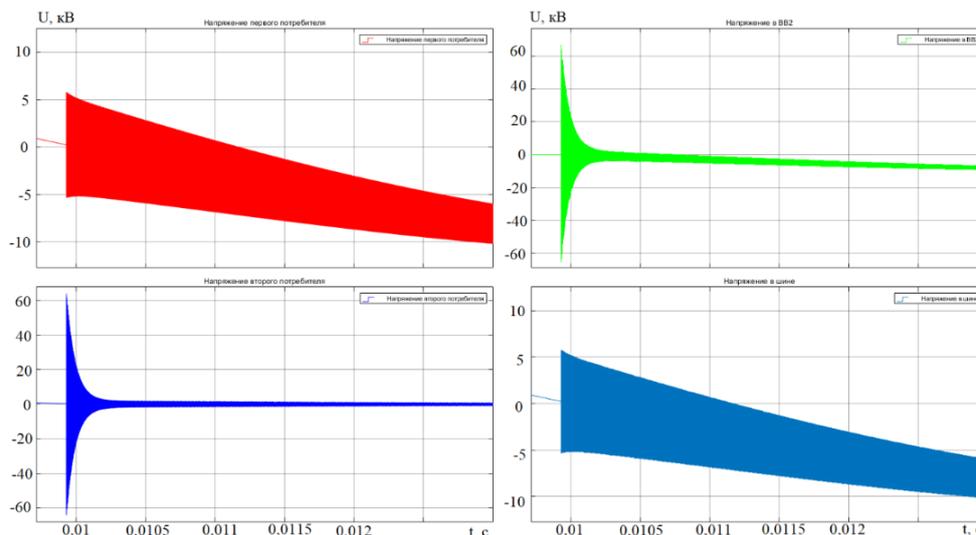


Рисунок 6. Напряжение при отключении одного выключателя. Срез тока 2А  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результат переходного процесса при выключении одного выключателя со срезом тока 2 А представлен на рисунке 6. На данных графиках можно увидеть переходный процесс на первом и втором потребителе, шине и между контактами отключаемого выключателя. В данном опыте напряжение выросло в шесть раз относительно номинального как на потребителе, так и между контактами самого выключателя. Также можно видеть, что перенапряжение перешло на потребителя, который ещё не был отключен. Сам переходный процесс длится 500 мкс и содержит гармонические составляющие.

Аналогичные графики можно наблюдать и при срезах тока 1 и 0,5 А, но кратность перенапряжения при этом будет снижаться.

Так же были сделаны опыты с отключением двух выключателей с разностью времени отключения в 1,2,4,6,8,10,20 и 40 мкс. Кратности полученных перенапряжений приведены на гистограммах в Обсуждении.

На рисунке 7 показан срез тока в 2 А и вызванный им переходный процесс между контактами выключателя.

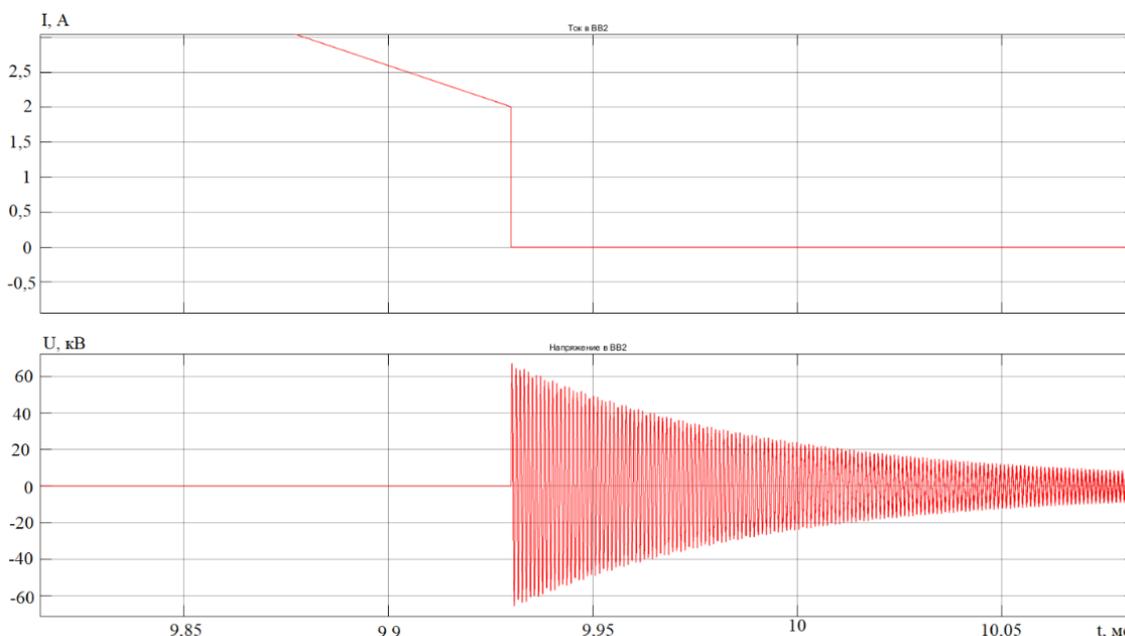


Рис. 7. Ток и напряжение при отключении одного выключателя. Срез тока 2А  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 8 представлено увеличенное напряжение между контактами отключаемого выключателя. С помощью этого рисунка можно оценить кратность перенапряжения и оценить его частоту.



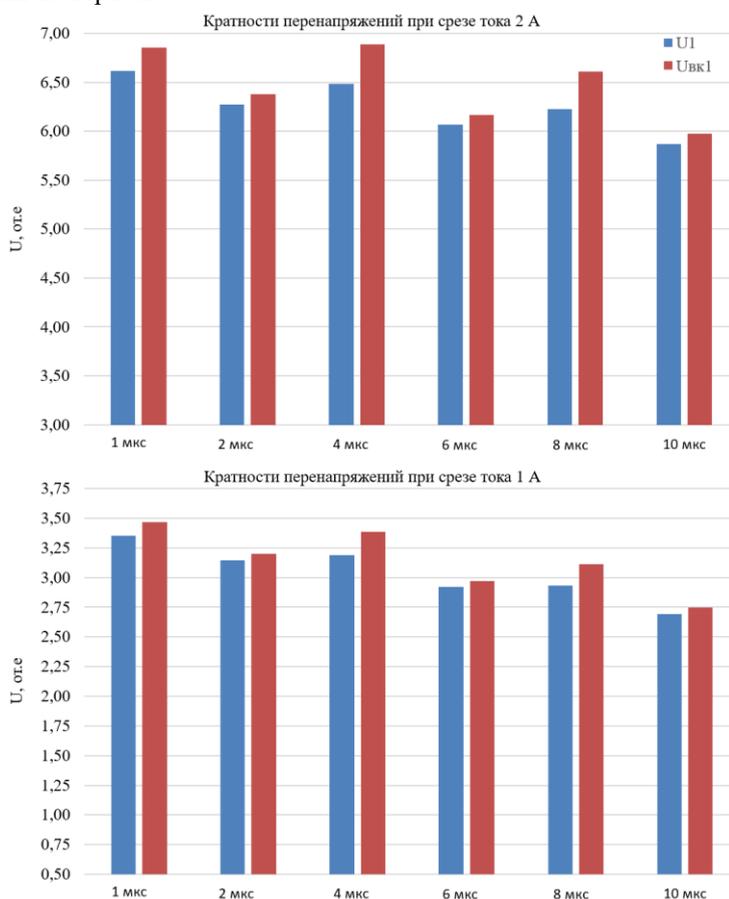
Рис. 8. Напряжение на первом вакуумном выключателе Fig. 8. Voltage at the first vacuum circuit breaker

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Обсуждение (Discussions)

Получив, данные необходимо выяснить кратность перенапряжений и их зависимость от времени между отключаемыми выключателями. Для всех опытов на 10 кВ, при отключении двух выключателей, составлена гистограмма рис. 9 для всех максимальных напряжений первого выключателя и первого потребителя. Для аналогичных опытов с ОПН представлена гистограмма на рис. 10 для ОПН с разной пропускной способностью на 400, 550 и 650 А. Переходный процесс происходил с частотой 1,1 кГц.

По гистограмме представленной на рисунке 9 оценить влияние среза тока и времени отключения между выключателями на кратность перенапряжения. Видно, что кратность перенапряжения увеличивается как при росте среза тока, так и при уменьшении времени отключения между выключателями, при этом наибольшей кратности перенапряжения достигает при 2 мкс, а при 1 и 4 мкс может быть меньше, это обуславливается тем, что напряжение при переходном процессе обладает высокочастотными составляющими и при отключении второго выключателя может начаться не в пике напряжения при перенапряжении на первом.



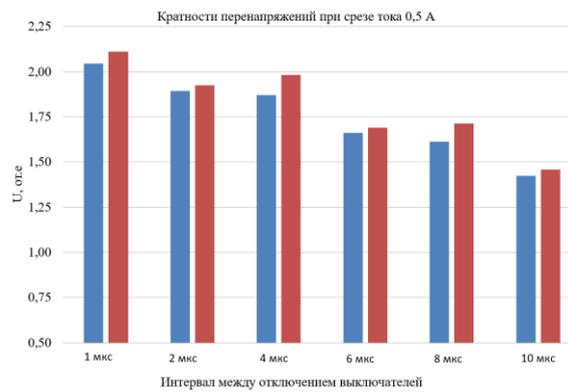


Рис. 9. Кратности перенапряжений относительно амплитудного в зависимости от времени отключения между выключателями для разных срезов тока. 10 кВ.  $U_1$  – напряжение первого потребителя,  $U_{вк1}$  – напряжение первого выключателя

Fig. 9. Multiplicities of overvoltages relative to the amplitude, depending on the time of disconnection between switches for different current chopping.  $U_1$  – the voltage of the first consumer,  $U_{вк1}$  – the voltage of the first switch

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

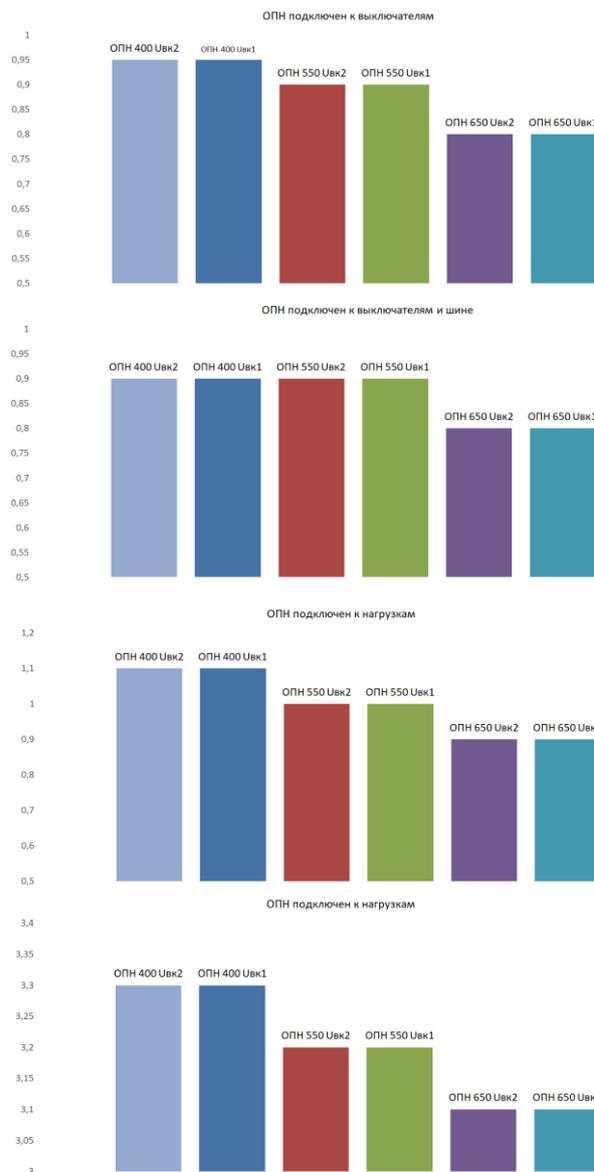


Рис. 10. Кратности перенапряжений при работе ОПН в MATLAB Simulink при перенапряжениях на 10 кВ

Fig. 10. Overvoltage multiplicities during operation of the surge arrester in MATLAB Simulink at overvoltages of 10 kV

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для оценки эффективности защитных функций ОПН, были произведены дополнительные опыты на модели (рис 3) с тремя видами нелинейных ограничителей при разных способах подключения относительно потребителей и выключателей. Результаты представлены на гистограмме на рис 10. Из гистограмм видно, что для снижения кратности перенапряжений лучше брать ОПН с большей удельной энергоёмкостью и устанавливать непосредственно у потребителей или выключателей.

#### **Заключение или Выводы (Conclusions)**

В данной работе в среде MATLAB Simulink были созданы модели для расчёта переходных процессов в генераторной сети. А также четыре модели с нелинейными ограничителями перенапряжений. Оценены кратности перенапряжений при работе разных ОПН в сетях среднего напряжения и разных способах подключений этих ОПН. Установлено, что эффективное снижение перенапряжений даст любой способ подключения ОПН, но наиболее подходящими при этом будут варианты:

- 1) с подключением двух ОПН параллельно выключателям,
- 2) с подключение двух ОПН параллельно выключателям и одного дополнительного ОПН на общей шине.

При этом наилучшие показатели были у ОПН с малым напряжением срабатывания и высокой удельной энергоёмкостью.

При невозможности изменения схемы подключения варисторов, необходимо выбирать ОПН с большей поглощаемой энергией, которую не редко используют только при возможности однофазного короткого замыкания с высокими значениями ток. Также при подборе защитного оборудования следует обращать внимание на ВАХ варистора. Также отметим, что помимо снижения уровня перенапряжений можно добиться снижения уровня шума, возникающие при отключении выключателей.

#### **Литература**

1. Евдокунин Г.А., Тилер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики). 2-е изд., перераб. и доп. СПб: Издательство Терция, 2006. 148 с.
2. Сафонов Е.П., Фролов В.Я. Особенности переходных процессов в генераторных цепях мощных электротехнических комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 105-118.
3. Червонченко С.С., Фролов В.Я. Исследование работы автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом резервных источников питания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 90-104.
4. Перцев А.А., Белкин Г.С. Коммутационные процессы в вакуумных выключателях с параллельным соединением дугогасительных камер // Электротехника. 2011. № 3. С. 39.
5. Халилов, Ф.Х., Евдокунин Г. А., В. С. Поляков. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений. СПб.: Энергоатомиздат. С.-Петербург. отд-ние, 2002. 271 с.
6. Abdulahovic. T., Thiringer T. Vacuum Circuit Breaker Parameter Calculation and Modelling for Power System Transient Studies // Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). 2010. Vol. 32, Issue: 3. pp. 1165 - 1172.
7. Buyung M., Satyagraha K. Application of Surge Arrester on Vacuum Circuit Breaker: Proceedings of the 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 27-29 March 2012; Shanghai, China; 2012.
8. Адамьян Ю.Э., Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И. Зависимость уровня перенапряжений ОПН разных классов напряжения от параметров заземляющих устройств. Эксперимент и моделирование // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. №5-13(39). С. 29
9. Wróblewski Z., Budzisz J. Overvoltage and overcurrent in a capacity circuit generated by a vacuum switch: Proceedings of the 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering; 16-19 May 2010; Prague, Czech Republic; 2010.
10. Huang Z., Tan W., Mao Q, et al. Controlled Breaking Strategy of Shunt Reactor Based on Fast Vacuum Switch: Proceedings of the 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST); 13-16 October 2019; Kitakyushu, Japan, 2019; pp. 698-701.
11. Xin Y. Development of Improved Suppression Measures Against Reignition Overvoltages Caused by Vacuum Circuit Breakers in Offshore Wind Farms //IEEE Transactions on Power Delivery. 2022.Vol. 21, N1, pp. 517-527.
12. Asadi Q., Qasemi M., Amini A., et al. Minimizing Overvoltages on Medium Voltage VCBs Due to Shunt Reactor Switching: Proceedings of the 2020 15th International Conference on Protection and Automation of Power Systems; 30-31 December 2020; Shiraz, Iran; 2020. pp. 25-29.

13. Liu G., Guo F., Yuan K. Overvoltage Simulation and Analysis of Switching-off Shunt Reactor with 12kV Vacuum Circuit Breaker: Proceedings of the 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering; 04-07 June 2020; Chengdu, China, 2020. pp. 1610-1614.

14. Su X., Luo J., Xu B., et al. Research on parallel mean flow technology of high-voltage vacuum circuit breaker: Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA); Changchun, China; 2022. pp. 146-149,

15. Zhou F., Tang W., Ma Y., et al. Research on Circuit Breaker Switching Model Modified Based on Measured Data Considering Multi Stochastic Factors: Proceedings of 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application; Beijing, China; 2020. pp. 1-4.

### Авторы публикации

**Бельский Родион Артёмович** – старший преподаватель ФГАОУ ВО «СПбПУ». ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4545-1086>. [belskij\\_ra@spbstu.ru](mailto:belskij_ra@spbstu.ru)

**Фролов Владимир Яковлевич** – д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «СПбПУ». ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1744-4375>. [frolov\\_vya@spbstu.ru](mailto:frolov_vya@spbstu.ru)

**Жилиготов Руслан Игоревич** – канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «СПбПУ». ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0244-8998>. [zhiligitov\\_ri@spbstu.ru](mailto:zhiligitov_ri@spbstu.ru)

**Сафонов Евгений Павлович** – ассистент, ФГАОУ ВО «СПбПУ». ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7294-1588>. [safonov\\_ep@spbstu.ru](mailto:safonov_ep@spbstu.ru)

### References

1. Evdokunin GA, Tiler G. Modern vacuum switching equipment for medium voltage networks (technical advantages and operational characteristics). 2nd ed. SPb: Publishing house Tertsiya; 2006. (In Russ).

2. Safonov E.P, Frolov V.Ya. Features of fault transient's in generator network of powerful electric power stations // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2021. 23(1):105-118. (In Russ). DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-1-105-118

3. Chervonchenko S.S, Frolov V.Ya. Research of the operation of an autonomous electrical complex with a combined composition of backup power sources // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2022. 24(4):90-104. (In Russ). DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-10

4. Pertsev A.A, Belkin G.S. Switching processes in vacuum circuit breakers with parallel connection of arc extinguishing chambers // Elektrotehnika. 2022. (4):39. (In Russ).

5. Khalilov F.Kh. Protection of 6-35 kV networks from overvoltage. SPb: Energoatomizdat. 2002. (In Russ).

6. Abdulahovic. T, Thiringer T. Vacuum Circuit Breaker Parameter Calculation and Modelling for Power System Transient Studies. *Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. 2010; 32 (3): 1165 - 1172. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2357993

7. Buyung M, Satyagraha K. *Application of Surge Arrester on Vacuum Circuit Breaker: Proceedings of the 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 27-29 March 2012; Shanghai, China*; 2012. doi: 10.1109/APPEEC.2012.6307348

8. Adam'yan Yu.E, Bocharov Yu.N, Krivosheev S.I. Dependence of the level of overvoltage of surge arrester of different voltage classes on the parameters of grounding devices. Experiment and simulation. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2016; 5-13(39):29. (In Russ).

9. Wróblewski Z, Budzisz J. *Overvoltage and overcurrent in a capacity circuit generated by a vacuum switch: Proceedings of the 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering; 16-19 May 2010; Prague, Czech Republic*; 2010. doi: 10.1109/EEEIC.2010.5489980

10. Huang Z, Tan W, Mao Q, et al. *Controlled Breaking Strategy of Shunt Reactor Based on Fast Vacuum Switch: Proceedings of the 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST); 13-16 October 2019; Kitakyushu, Japan*, 2019; pp. 698-701. doi: 10.1109/ICEPE-ST.2019.8928747.

11. Xin Y. Development of Improved Suppression Measures Against Reignition Overvoltages Caused by Vacuum Circuit Breakers in Offshore Wind Farms //IEEE Transactions on Power Delivery. 2022; 21(1):517-527. doi: 10.1109/TPWRD.2021.3064306.

12. Asadi Q, Qasemi M, Amini A, et al. *Minimizing Overvoltages on Medium Voltage VCBs Due to Shunt Reactor Switching: Proceedings of the 2020 15th International Conference on Protection and*

*Automation of Power Systems; 30-31 December 2020; Shiraz, Iran; 2020. pp. 25-29. doi: 10.1109/IPAPS52181.2020.9375585.*

13. Liu G, Guo F, Yuan K. *Overvoltage Simulation and Analysis of Switching-off Shunt Reactor with 12kV Vacuum Circuit Breaker: Proceedings of the 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering; 04-07 June 2020; Chengdu, China, 2020. pp. 1610-1614. doi: 10.1109/ACPPEE48638.2020.9136172.*

14. Su X, Luo J, Xu B, et al. Research on parallel mean flow technology of high-voltage vacuum circuit breaker: *Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA); Changchun, China; 2022. pp. 146-149, doi: 10.1109/EEBDA53927.2022.9744928.*

15. Zhou F, Tang W, Ma Y, et al. Research on Circuit Breaker Switching Model Modified Based on Measured Data Considering Multi Stochastic Factors: *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application; Beijing, China; 2020. pp. 1-4, doi:10.1109/ICHVE49031.2020.9279912.*

#### **Authors of the publication**

**Rodion A. Belsky** - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4545-1086>. [belskij\\_ra@spbstu.ru](mailto:belskij_ra@spbstu.ru)

**Frolov Y. Vladimir** - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1744-4375>. [frolov\\_vya@spbstu.ru](mailto:frolov_vya@spbstu.ru)

**Zhiligotov I. Ruslan** - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0244-8998>. [zhiligotov\\_ri@spbstu.ru](mailto:zhiligotov_ri@spbstu.ru)

**Safonov P. Evgenii** - Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7294-1588>. [safonov\\_ep@spbstu.ru](mailto:safonov_ep@spbstu.ru)

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки).*

**Получено** **19.10.2023 г.**

**Отредактировано** **09.11.2023 г.**

**Принято** **27.11.2023 г.**



## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ НА ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

Зиганшин Ш.Г., Загретдинов А.Р., Ваньков Ю.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

shz@list.ru, azagretdinov@yandex.ru, yvankov@mail.ru

**Резюме:** **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Газоперерабатывающая промышленность является довольно энергоемкой и требует значительных затрат энергии для осуществления своей деятельности. Поиск путей повышения энергоэффективности предприятий этой отрасли является необходимой и актуальной задачей. **ЦЕЛЬ.** Определение возможностей повышения энергоэффективности работы действующих промышленных печей газоперерабатывающего предприятия с разработкой энергосберегающих мероприятий. **МЕТОДЫ.** Для реализации поставленной цели проведено исследование действующих промышленных печей газоперерабатывающего предприятия на предмет возможности полезного использования низкопотенциального тепла уходящих дымовых газов. Проведено технико-экономическое обоснование предлагаемых энергосберегающих мероприятий. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Анализ предприятия выявил низкий коэффициент полезного действия технологических печей. Причинами низкого КПД является завышенный коэффициент избытка воздуха и высокая температура уходящих дымовых газов. Предложены следующие направления повышения эффективности печей: утилизация тепловой энергии дымовых газов и поддержание коэффициента избытка воздуха на нормативном уровне. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Рассчитанный потенциал энергосбережения при снижении температуры уходящих дымовых газов до 160 °С составил 82348,8 Гкал, а при снижении коэффициента избытка воздуха до нормативных 5 % - 8986 Гкал. В сумме эта величина составит около 23% от общей выработки тепловой энергии промышленными печами. Предложенные энергосберегающие мероприятия позволят осуществить утилизацию тепловой энергии дымовых газов и снизить коэффициент избытка воздуха для достижения нормативного соотношения топливо/воздух. Эффект от предложенных мероприятий составит 79694 Гкал, что равно около 20% от общей выработки тепловой энергии промышленными печами.

**Ключевые слова:** промышленные печи; эффективность; энергосбережение; дымовые газы; утилизация тепловой энергии.

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2024-226 от 15.02.2024 года.

**Для цитирования:** Зиганшин Ш.Г., Загретдинов А.Р., Ваньков Ю.В. Энергосберегающие мероприятия при эксплуатации промышленных печей на газоперерабатывающем предприятии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 108-119. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-108-119.

## ENERGY-SAVING MEASURES FOR THE OPERATION OF INDUSTRIAL FURNACES AT A GAS PROCESSING PLANT

Ziganshin Sh.G., Zagretdinov A.R., Vankov Y.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

shz@list.ru, azagretdinov@yandex.ru, yvankov@mail.ru

**Abstract:** **THE RELEVANCE.** The gas processing industry is quite energy intensive and requires significant energy costs to carry out its activities. Finding ways to improve the energy efficiency of enterprises in this industry is a necessary and urgent task. **THE PURPOSE.** Identification of opportunities to improve the energy efficiency of the operation of existing industrial furnaces of a gas processing enterprise with the development of energy-saving

measures. **METHODS.** To achieve this goal, a study of existing industrial furnaces of a gas processing enterprise was conducted for the possibility of useful use of low-potential heat of outgoing flue gases. A feasibility study of the proposed energy-saving measures has been carried out. **RESULTS.** The analysis of the enterprise revealed a low efficiency of technological furnaces. The reasons for the low efficiency are the overestimated excess air coefficient and the high temperature of the exhaust flue gases. The following directions for improving the efficiency of furnaces are proposed: utilization of the thermal energy of flue gases and maintenance of the excess air coefficient at the regulatory level. **CONCLUSION.** The calculated energy saving potential with a decrease in the temperature of outgoing flue gases to 160 ° C was 82348.8 Gcal, and with a decrease in the excess air coefficient to the standard 5% - 8986 Gcal. In total, this amount will amount to about 23% of the total heat generation by industrial furnaces. The proposed energy-saving measures will make it possible to utilize the thermal energy of flue gases and reduce the excess air coefficient in order to achieve a standard fuel/air ratio. The effect of the proposed measures will amount to 79694 Gcal, which is about 20% of the total heat generation by industrial furnaces.

**Keywords:** industrial furnaces, efficiency; energy saving; flue gases; heat energy utilization.

**Acknowledgments:** This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2024-226 from 15.02.2024.

**For citation:** Ziganshin Sh.G., Zagretidinov A.R., Vankov Y.V. Energy-saving measures for the operation of industrial furnaces at a gas processing plant. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (3): 108-119. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-108-119.

#### **Введение (Introduction)**

Газоперерабатывающая промышленность является довольно энергоемкой и требует значительных затрат энергии для осуществления своей деятельности [1]. Поиск путей повышения энергоэффективности предприятий этой отрасли является необходимой и актуальной задачей. В настоящее время удельное потребление энергоресурсов в отечественных предприятиях подготовки и переработки газоконденсатного сырья (ППГКС) составляет в среднем 84...85 кг у. т./1000 м<sup>3</sup>, отличаясь для каждого производства в десятки раз. Такие различия объясняются разным составом и давлением углеводородного сырья, и, следовательно, разной технологией его подготовки и переработки. На рисунке 1 приведено удельное энергопотребление различных ППГКС [2].

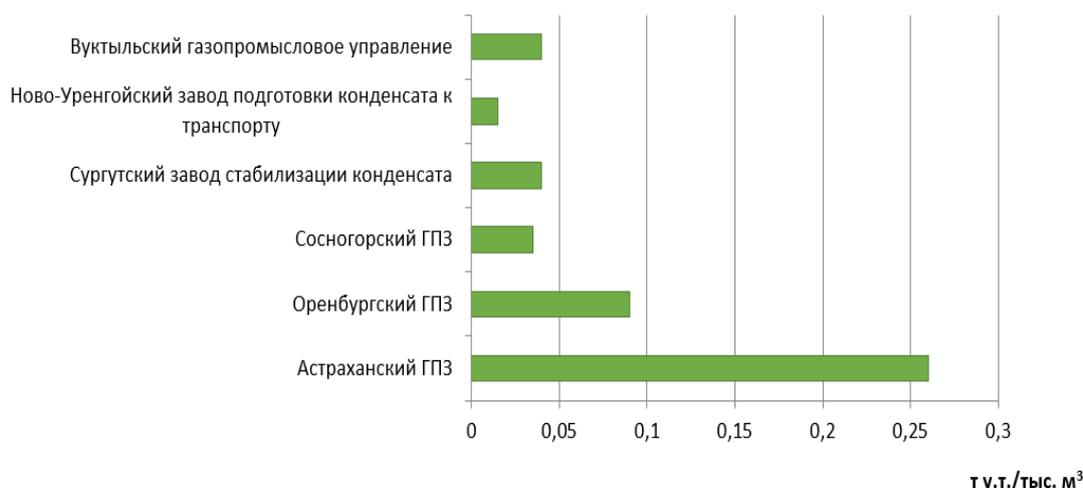


Рис. 1. Удельное энергопотребление предприятий подготовки и переработки газоконденсатного сырья

Fig. 1. Specific energy consumption of enterprises for the preparation and processing of gas condensate raw materials

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors

Снижения потребления энергоресурсов на ППГКС с максимальным эффектом

можно достичь при системном решении задач оптимизации энергокомплекса с учетом связи его с внешней системой энергоснабжения, влияния технико-экономических и эколого-климатических факторов. Следует стремиться к внедрению инновационных оборудования и технологий для производства энергоресурсов с утилизацией вторичных энергоресурсов, низконапорных газов, сточных вод, жидких и газофазных горючих отходов [2].

Одними из наиболее энергоемких устройств на ППГКС являются промышленные (технологические) печи. В основном они используются для подвода тепла в кубы ректификационных колонн либо дожига газообразных, жидких или твердых веществ. Тепловая эффективность промышленных печей играет важную роль в снижении энергозатрат всего предприятия и повышении качества выпускаемой продукции. Для поддержания эффективной работы печей необходимо своевременно выявлять негативные факторы, влияющие на расход топлива [3].

Целью данной работы является определение возможностей повышения энергоэффективности работы действующих промышленных печей газоперерабатывающего предприятия с разработкой энергосберегающих мероприятий.

#### ***Литературный обзор (Literature Review)***

Вопросам снижения энергопотребления и повышения энергоэффективности печей посвящено большое количество исследований. В тепловом балансе печи потери тепла с уходящими дымовыми газами составляют 70-80% от общих потерь. Снижение температуры отходящих газов возможно с помощью рекуперации их тепла. При этом возникает проблема низкотемпературной коррозии теплопередающих поверхностей [4,5]. Поэтому теплообменная поверхность, контактирующая с дымовыми газами, должна обладать не только требуемыми теплообменными характеристиками, но и антикоррозийными свойствами [6]. Применение в конденсационных теплообменниках антикоррозионных материалов, таких как нержавеющая сталь, полимерные покрытия, керамика и т.п., позволяют решить эту проблему.

Исследователями [7] было доказано положительное влияние рекуперации отработанного тепла дымовых газов на энергоэффективность и снижение выбросов углерода из нагревательных печей нефтеперерабатывающих заводов. Показаны результаты теоретических расчетов при снижении температуры дымовых газов со 180 °С до 20-40 °С. В исследовании [8] показана возможность рекуперации воды и тепла из дымовых газов с помощью технологии транспортных мембранных конденсаторов. Общая теплопередача в мембранных конденсаторах, изготовленных из пучков нанопористых мембранных трубок, на 50-80% выше, чем в трубе из нержавеющей стали [9]. В статье [10] приводится сравнение конденсационных теплообменников на металлической и полимерной основе (из фторированного этиленпропилена). Показаны преимущества теплообменников на основе полимеров при рекуперации тепла из дымовых газов, проведен расчет их теплогидравлических характеристик. В статье [11] Ли и Джо используют утилизированные дымовые газы для повышения температуры предварительно нагретого поступающего воздуха для снижения потерь тепловой энергии и повышения КПД печи с целью экономии энергопотребления и снижения выбросов углекислого газа. Показано, что при снижении избыточной концентрации кислорода в воздухе с 4% до 3% эффективность печи повышается на 0,6%.

Другими составляющими теплового баланса печи, оказывающими влияние на КПД, являются потери через ограждающие поверхности и завышенный коэффициент избытка воздуха. Несмотря на широкий спектр видов теплоизоляции, для обмуровки печей до сих пор применяют надёжные, но малоэффективные материалы. Для повышения энергоэффективности печей важно использовать современные обмуровочные материалы и поддерживать обмуровку в надлежащем состоянии. В работе [12] показано негативное влияние подсосов воздуха через некачественную обмуровку, которое приводит к завышенным затратам топлива. В статье [13] показано влияние угла наклона заслонки дымохода печи на общую тепловую эффективность и расход топлива. Результаты показывают, что уменьшение угла наклона заслонки с 45 до 39 ° приводит к снижению избыточной концентрации кислорода в воздухе на 0,9%, увеличению средней эффективности печи на 2% при небольшом падении давления в топке. В работе [14] был произведен расчет показателей котла при замене обмуровки из шамотного кирпича на волокнистые теплоизоляционные материалы. Результаты показали снижение тепловых потерь через обмуровку на 15 %, расхода топлива на 4,5 %, массы котлов –в 7,8 раза.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

В качестве объекта исследования выбран газоперерабатывающий комплекс.

Основными потребляемыми топливно-энергетическими ресурсами на предприятии являются электрическая энергия (на привод компрессоров, насосов, освещение и т.д.) и котельно-печное топливо (для работы промышленных печей и котельной) (таблица 1). Тепловая энергия в виде горячей воды на нужды отопления, вентиляции и горячего водоснабжения вырабатывается собственными источниками теплоты (в котельной и в экономайзерах промышленных печей). Закупка тепловой энергии от сторонних поставщиков не осуществляется.

Таблица 1  
Table 1

Структура потребления ТЭР на предприятии\*  
The structure of fuel and energy consumption in the enterprise

Показатель	Единица измерения	Потребление в отчетный период
Электроэнергия	тыс.кВт*ч	378 112
	т.у.т.	46 445
Котельно-печное топливо	тыс. м <sup>3</sup>	91 521
	т.у.т.	93 208

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors.

Рассмотрев структуру использования топливно-энергетических ресурсов на рассматриваемом предприятии, можно сделать вывод о преобладающем характере потребления котельно-печного топлива (рис. 2).

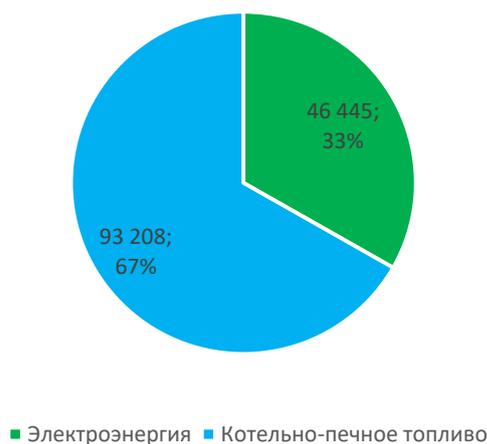


Рис. 2. Общее потребление по видам ТЭР, т.у.т. Fig. 2. Total consumption by type of fuel and energy complex

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors

Основным топливоиспользующим оборудованием на предприятии являются технологические печи трубчатого типа. В основном они предназначены для нагрева углеводородного сырья (керосина), направляемого для подогрева продукта в ректификационных колоннах. Для работы технологических печей на предприятии используется собственный топливный газ, образующийся в технологическом цикле переработки попутного газа.

Основные характеристики технологических печей предприятия, полученные по данным режимных карт, представлены в таблице 2.

Таблица 2  
Table 2

Характеристики печей \*  
Characteristics of furnaces

№ п.п.	Наименование	Теплопроизводительность, Гкал/ч	КПД, %	Коэффициент избытка воздуха	Температура уходящих газов, град. С	Дата ввода в эксплуатацию
1.	Печь № 1	0,05	67	6,55	325	1984

2.	Печь № 2	12,62	50	1,82	538	1964
3.	Печь № 3	14,55	68	1,82	356	1964
4.	Печь № 4	9,9	75	1,3	428	1964
5.	Печь № 5	0,528	64	2,14	365	1973
6.	Печь № 6	0,424	70	2,14	282	1973
7.	Печь № 7	23,3	72	1,24	445	1964
8.	Печь № 8	21,74	76	1,4	365	1964
9.	Печь № 9	0,049	63	1,94	484	1995
10.	Печь № 10	2,58	72	1,71	450	2007
11.	Печь № 11	0,22	81	1,3	290	2004
12.	Печь № 12	0,382	80	1,82	219	2004

*\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors*

Из анализа данных, представленных в таблице, видно, что коэффициент полезного действия почти всех печей имеет значение ниже 80%.

Главными причинами такого низкого КПД является:

- завышенный коэффициент избытка воздуха;
- высокая температура дымовых газов.

Повышение КПД технологических печей предлагается осуществлять по следующим двум направлениям:

- a) утилизация тепловой энергии дымовых газов;
- b) поддержание обмуровки печей в надлежащем состоянии для снижения коэффициента избытка воздуха и достижения нормативного соотношения топливо/воздух.

*a) Утилизация тепловой энергии дымовых газов.*

Обследование предприятия показало, что утилизация теплоты дымовых газов осуществляется лишь в печах №7 и №8. В них установлены экономайзеры для подогрева горячей воды. Однако экономайзеры работают не в круглогодичном режиме и используются в основном на покрытие отопительной нагрузки. Согласно представленным данным, в отчетном году с помощью экономайзеров было выработано 14280,6 Гкал тепловой энергии. Однако это составляет лишь около 50% от максимально возможного потенциала теплоты уходящих дымовых газов от этих печей.

Для более полного использования потенциала теплоты уходящих дымовых газов предлагается установка воздухоподогревателей за промышленными печами для подогрева воздуха, поступающего на горелки.

Предлагаемая модернизация будет включать:

- установку воздухоподогревателя для утилизации тепловой энергии уходящих дымовых газов. Современные воздухоподогреватели позволяют снизить температуру уходящих газов до 120-180 °С;
- установку дутьевого вентилятора и дымососа;
- замену горелочных устройств на горелочные устройства с принудительной подачей воздуха.

Расчет потенциала тепловой энергии при снижении температуры дымовых газов можно выполнить по следующей формуле:

$$Q_{\text{пот}} = V_{\text{дг}} \cdot (i_{\text{дгвых}} - i_{\text{дгi}}), \text{ кДж/ч}$$

где

$V_{\text{дг}}$  – расход уходящих дымовых газов, кг/ч;

$i_{\text{дгвых}}$  – энтальпия уходящих дымовых газов при отсутствии воздухоподогревателя, кДж/кг;

$i_{\text{дгi}}$  – энтальпия уходящих дымовых газов при снижении их температуры после установки воздухоподогревателя, кДж/кг.

Расход, массу и объем уходящих дымовых газов  $G_{\text{дг}}$  можно найти по методике [15].

Масса дымовых газов при сжигании 1 м<sup>3</sup> сухого газообразного топлива

определяется по формуле:

$$G_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} + \frac{d_{\Gamma}}{1000} + 1.306 \alpha V_0^H, \text{ кг/м}^3$$

где  $\rho_{\Gamma}$  – плотность сухого газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>,

$d_{\Gamma}$  – влагосодержание газообразного топлива, г/м<sup>3</sup>,

$V_0^H$  – объем воздуха при сжигании 1 м<sup>3</sup> сухого газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

$$\rho_{\Gamma} = 0,01(1,96CO_2+1,52H_2S+1,25N_2+1,43O_2+1,25CO+0,0899H_2+\Sigma(0,536m+0,045n)C_mH_n)$$

$$V_0^H = 0,0476(0,5CO+0,5H_2+1,5H_2S+\Sigma(m+n/4)C_mH_n-O_2)$$

Объем дымовых газов:

$$V_{\Gamma}^H = V_{RO_2}^H + V_{ON_2}^H + V_{H_2O}^H + (\alpha - 1) V_0^H, \text{ м}^3/\text{кг}$$

Объем водяных паров:

$$V_{H_2O}^H = V_{oH_2O}^H + 0,0161(\alpha - 1)V_0^H, \text{ м}^3/\text{кг}$$

Теоретический (минимальный) объем азота, полученного при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха:

$$V_{oN_2}^H = 0,79V_0^H + 0,01N_2, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический (минимальный) объем трехатомных газов:

$$V_{RO_2}^H = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \Sigma m C_m H_n), \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический (минимальный) объем водяных паров:

$$V_{oH_2O}^H = 0,01(H_2S + H_2 + \Sigma 0,5n C_m H_n + 0,124 d_{\Gamma}) + 0,0161 V_0^H, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Энтальпии уходящих дымовых газов при различной температуре можно найти по методике, представленной в [15].

В таблице 3 показаны результаты расчета потенциала тепловой энергии уходящих дымовых газов для двух вариантов:

- при снижении температуры дымовых газов до 200°С,
- при снижении температуры дымовых газов до 160°С.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчета потенциала тепловой энергии при снижении температуры дымовых газов до 200°С и 160°С \*

*The results of calculating the thermal energy potential when the flue gas temperature decreases to 200°С and 160°С*

№ п.п.	Наименование	Тепло произв одител ьность, Гкал/ч	КПД, %	Q <sub>пот</sub> при снижении температу ры дымовых газов до 160°С, Гкал/ч	Q <sub>пот</sub> при снижени и темпера туры дымовы х газов до 160°С, %	Q <sub>пот</sub> при снижени и темпера туры дымовы х газов до 200°С, Гкал/ч	Q <sub>пот</sub> при снижении температу ры дымовых газов до 200°С, %
1.	Печь № 1	0,05	67	0,01	17,5	0,01	14,8
2.	Печь № 2	12,62	50	3,23	25,6	3,59	28,5
3.	Печь № 3	14,55	68	1,82	12,5	1,46	10,0

4.	Печь № 4	9,9	75	1,85	18,6	1,58	15,9
5.	Печь № 5	0,528	64	0,12	22,3	0,10	18,1
6.	Печь № 6	0,424	70	0,06	14,1	0,04	9,8
7.	Печь № 7	23,3	72	1,91	8,2	1,65	7,1
8.	Печь № 8	21,74	76	1,48	6,8	1,20	5,5
9.	Печь № 9	0,049	63	0,01	25,6	0,01	22,6
10.	Печь № 10	2,58	72	0,50	19,6	0,42	16,3
11.	Печь № 11	0,22	81	0,01	6,7	0,01	4,6
12.	Печь № 12	0,382	80	0,02	6,4	0,01	2,2
	<b>ИТОГО</b>			<b>11,03</b>		<b>10,1</b>	

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors

Таким образом, при снижении температуры уходящих дымовых газов до 160 °С, при условии круглогодичной работы можно получить дополнительное количество тепловой энергии в количестве:

$$Q_{\text{пот}} = 11,03 \text{ Гкал/ч} * 8760 \text{ ч} = 96628,8 \text{ Гкал}$$

С учетом того, что в печах №7 и №8 уже стоят экономайзеры и производится частичная утилизация теплоты дымовых газов (за отчетный год в количестве 14280 Гкал), итоговый потенциал составит:

$$Q_{\text{пот}} = 96628,8 - 14280 = 82348,8 \text{ Гкал.}$$

*b) Поддержание обмуровки печей в надлежащем состоянии*

В процессе эксплуатации печей в обмуровке возникают неплотности за счет трещин, разрывов обшивки, сжатия эластичных набивок в уплотнительных и расширительных швах, узлах прохода труб через обмуровку в нижней части топки, потолочном перекрытии, конвективной шахте. Кроме того, неплотности в обмуровке ведут к увеличению присосов воздуха в газоходы котла и снижению экономичности его работы. Нормативные потери тепла через обмуровку в трубчатых печах составляют 3 — 5 %. Нижний предел соответствует печам большой тепловой мощности, верхний — печам малой мощности [16].

При проведении энергетического обследования и анализе режимных карт промышленных печей было выявлено, что имеются завышенные коэффициенты избытка воздуха и потери тепла в окружающую среду через ограждающие поверхности для печей №1-3, №5-8, №12 (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Потери тепла в окружающую среду через ограждающие поверхности печей \*

*Heat loss to the environment through the enclosing surfaces of furnaces*

№ п.п.	Наименование	Теплопроизводительность, Гкал/ч	КПД, %	Коэф. избытка воздуха	Потери тепла в окружающую среду $\alpha$ , %
1.	Печь № 1	0,05	67	6,55	8,5
2.	Печь № 2	12,62	50	1,82	11,2
3.	Печь № 3	14,55	68	1,82	8,1
4.	Печь № 4	9,9	75	1,3	2,66
5.	Печь № 5	0,528	64	2,14	6,2
6.	Печь № 6	0,424	70	2,14	6,5
7.	Печь № 7	23,3	72	1,24	5,1
8.	Печь № 8	21,74	76	1,4	5,4
9.	Печь № 9	0,049	63	1,94	2,0
10.	Печь № 10	2,58	72	1,71	2,0
11.	Печь № 11	0,22	81	1,3	4,2

№ п.п.	Наименование	Теплопроизводительность, Гкал/ч	КПД, %	Коэф. избытка воздуха	Потери тепла в окружающую среду $\alpha$ , %
12.	Печь № 12	0,382	80	1,82	6,9

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors

Рассчитаем экономию мероприятия при сокращении потерь тепла в окружающую среду до 5% (табл. 5).

Количество выработанной теплоты при круглогодичной работе печи:

$$Q_{\text{выр}} = Q \cdot n, \text{ Гкал},$$

где  $Q$  – теплопроизводительность печи, Гкал/ч,  
 $n$  – фактическое время работы печи в году, час.

Количество теплоты, теряемой в окружающую среду при работе печи по фактическим долям потерь  $\alpha$ , Гкал:

$$Q_{\alpha} = Q_{\text{выр}} \cdot \alpha / 100.$$

Количество теплоты, теряемой в окружающую среду при работе печи с нормативной долей потерь  $\alpha$ , равной 5%, Гкал:

$$Q_{\text{норм}} = Q_{\text{выр}} \cdot 0,05.$$

Экономия тепловой энергии при внедрении мероприятия, Гкал:

$$\Delta = Q_{\alpha} - Q_{\text{норм}}$$

Таблица 5  
Table 5

Расчет экономии при сокращении потерь тепла в окружающую среду до 5%\*  
 Calculation of savings by reducing heat losses to the environment by up to 5%

№ п.п.	Наименование	Q, Гкал/ч	Время работы печи, час	$\alpha$ , %	$Q_{\text{выр}}$ , Гкал	$Q_{\alpha}$ , Гкал	$Q_{\text{норм}}$ , Гкал	$\Delta$ , Гкал
1	Печь № 1	0,05	8760	8,5	438	37,2	21,9	15,3
2	Печь № 2	12,62	8136	11,2	102676,3	11499,7	5133,8	6365,9
3	Печь № 3	14,55	4104	8,1	59713,2	4836,8	2985,7	1851,1
4	Печь № 4	9,9	648	2,66	6415,2	170,6	320,8	
5	Печь № 5	0,528	8760	6,2	4625,28	286,8	231,3	55,5
6	Печь № 6	0,424	8760	6,5	3714,24	241,4	185,7	55,7
7	Печь № 7	23,3	2928	5,1	68222,4	3479,3	3411,1	68,2
8	Печь № 8	21,74	5872	5,4	127657,3	6893,5	6382,9	510,6
9	Печь № 9	0,049	8760	2	429,24	8,6	21,5	
10	Печь № 10	2,58	8760	2	22600,8	452,0	1130,0	
11	Печь № 11	0,22	8760	4,2	1927,2	80,9	96,4	
12	Печь № 12	0,382	8760	6,9	3346,32	230,9	167,3	63,6
	<b>Итого</b>				<b>401765,5</b>	<b>28217,9</b>	<b>20088,3</b>	<b>8986,0</b>

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors

Как видно из таблицы, итоговый потенциал экономии тепловой энергии составляет 8986 Гкал.

**Результаты (Results)**

Для более полного использования потенциала теплоты уходящих дымовых газов

предлагается установка воздухоподогревателей за промышленными печами для подогрева воздуха, поступающего на горелки.

В качестве воздухоподогревателей используются статические рекуперативные теплообменники, работа которых основывается на передаче тепла от сжигания отходящих газов воздуху, который подается в горелки. Это помогает значительно уменьшить потребности в топливе для сжигания. Поверхность теплообмена, как правило, изготавливается из оребренных литых чугунных труб либо нержавеющей стали. Для промышленных печей предприятия предлагается установить воздухоподогреватели, сконструированные трубками из боросиликатного стекла. В таком случае теплообменник полностью устойчив к коррозии, т.к. входящий холодный воздух предварительно нагревается в стеклянном модуле до попадания в чугунную часть. Конструкция защищает чугунные трубы от конденсата и кислотного воздействия и позволяет снизить температуру уходящих дымовых газов до 160 °С.

В таблице 6 представлен расчет экономического эффекта при внедрении воздухоподогревателей и снижении температуры дымовых газов до 160°С. При этом установку воздухоподогревателей предполагаем только в печах с наибольшим потенциалом использования теплоты уходящих газов.

Экономия в денежном выражении  $\Delta S$ , тыс. руб. рассчитывалась исходя из теплотворной способности топливного газа  $Q_n = 7900$  ккал/м<sup>3</sup> и его стоимости, равной 6,1 руб/м<sup>3</sup>. Потенциал теплоты уходящих газов  $Q_{пот}$ , Гкал определялся при круглогодичном режиме работы печей ( $n=8760$  ч). Также учитывалась выработка тепловой энергии в экономайзерах печей №7 (равна 6157 Гкал за отчетный год) и печи №8 (равна 8123 Гкал за отчетный год). Инвестиционные затраты на установку воздухоподогревателей включают в себя стоимость установки дымососа и замены горелок. Затраты на проектно-изыскательские и строительно-монтажные работы приняты равными 20% и 30% от стоимости оборудования соответственно.

Таблица 6  
Table 6

Расчет экономического эффекта при внедрении воздухоподогревателей\*  
*Calculation of the economic effect of the introduction of air heaters*

Наименование печи	$Q_{пот}$ , Гкал	$\Delta S$ , тыс. руб./год	Необходимые инвестиции, тыс. руб.	Срок окупаемости, лет
Печь № 2	22103,38	17067	45000	2,64
Печь № 3	15952,84	12318	45000	3,65
Печь № 4	16195,16	12505	45000	3,60
Печь № 7	16715,44	12907	75000	5,81
Печь № 8	4876,357	3765	75000	19,92
Итого, без учета печи № 8	70967	54797	210000	3,8

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors

Так как срок окупаемости установки воздухоподогревателя для печи №8 составляет около 20 лет, предлагается ее оставить без изменений и включать только в отопительный сезон совместно с экономайзером. На оставшиеся печи рекомендуется установить воздухоподогреватели. Учитывая сроки окупаемости, рассматриваемое мероприятие рекомендуется к внедрению.

Поддержание обмуровки печей в надлежащем состоянии предполагает своевременный ремонт и использование современных обмуровочных материалов при этом. В таблице 7 представлен расчет экономического эффекта этого мероприятия. Рассмотрены печи с наибольшим энергопотреблением.

Расчет экономического эффекта при поддержании обмуровки печей в надлежащем состоянии\*

*Calculation of the economic effect of maintaining the lining of the furnaces in proper condition*

Наименование печи	Э, Гкал	$\Delta S$ , тыс. руб./год	Необходимые инвестиции, тыс. руб.	Срок окупаемости, лет
Печь № 2	6365,9	4915	2500	0,5
Печь № 3	1851,1	1429	2500	1,7
Печь № 7	68,2	53	2500	47,5
Печь № 8	510,6	394	2500	6,3
<b>Итого, без печи № 7</b>	<b>8727</b>	<b>6739</b>	<b>7500</b>	<b>1,1</b>

\*Источник: составлено авторами. \*Source: compiled by authors

Учитывая сроки окупаемости, рассматриваемые мероприятия рекомендуются к внедрению для всех печей, указанных в табл. 7, кроме печи №7.

### Заключение

В работе был произведен подбор и расчет энергосберегающих мероприятий для промышленных печей газоперерабатывающего комплекса. Было выявлено завышенные коэффициенты избытка воздуха и потери тепла в окружающую среду через ограждающие поверхности для печей. Эти факторы негативно влияют на коэффициент полезного действия промышленных печей и энергоэффективность предприятия в целом. Рассчитанный потенциал энергосбережения при снижении температуры уходящих дымовых газов до 160 °С составил 82348,8 Гкал, а при снижении коэффициента избытка воздуха до нормативных 5 % - 8986 Гкал. В сумме эта величина составит около 23% от общей выработки тепловой энергии промышленными печами.

Предложены энергосберегающие мероприятия, позволяющие осуществить утилизацию тепловой энергии дымовых газов и снизить коэффициент избытка воздуха с целью достижения нормативного соотношения топливо/воздух. Эффект от предложенных мероприятий составил 79694 Гкал, что составляет около 20% от общей выработки тепловой энергии промышленными печами.

### Литература

1. A. R. Trott, and T. Welch, "Refrigeration and air conditioning," Butterworth-Heinemann, Third edition, 2000.
2. Долотовский, И. В. Повышение системной эффективности энергетического комплекса предприятий подготовки и переработки газоконденсатного сырья: специальность 05.14.01 "Энергетические системы и комплексы": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Долотовский Игорь Владимирович. – Саратов, 2018. – 439 с.
3. Mahinroosta, Mostafa. (2013). A Review on Energy Efficiency Improvement methods for Oil and Gas Industries. 2nd Conference on Emerging Trends in Energy Conservation. Tehran
4. P. Wang, C.F. Xie, S.M. Xu, Y.L. Ge. Application of energy-saving technology on furnaces of oil refining units. Proc. Environ Sci, 12 (2012), pp. 387-393, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.294>
5. A.M. Paramonov. Heating Furnaces Efficiency Improvement. Procedia Engineering, Volume 113, 2015, Pages 181-185, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.315>.
6. L. Mu, G. Liu, S. Wang, L. Wang, W. Sun, Z. Yang. Multi-layered composite coatings with enhanced corrosion and abrasion resistance for industrial flue gas waste heat recovery. Materials Letters, Volume 364, 2024, 136366, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136366>.
7. L. Mu, S. Wang, J. Lu, G. Liu, L. Zhao, Y. Lan. Effect of flue gas condensing waste heat recovery and its pressure drop on energy saving and carbon reduction for refinery heating furnace. Energy, Volume 279, 2023, 128081, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128081>.
8. J. Huang, H. Chen, J. Yang, Z. Du, H. Zhang, Z. Li. Enhancing performance of ceramic membranes for recovering water and heat from flue gas. Chemical Engineering Research and Design. Volume 192. 2023. Pages 208-222, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.02.028>.
9. A. Bao, D. Wang, C. Lin. Nanoporous membrane tube condensing heat transfer enhancement study. Int. J. Heat Mass Trans., 84 (2015), pp. 456-462.

10.N. Mohammadaliha, M. Amani, M. Bahrami. A Thermal-hydraulic assessment of condensing tube bank heat exchangers for heat and water recovery from flue gas. Applied Thermal Engineering. Volume 215, 2022, 118976, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118976>.

11. C.L. Lee, C.J.G. Jou. Saving fuel consumption and reducing pollution emissions for industrial furnace. Fuel Process Technol, 92 (2011), pp. 2335-2340. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.08.005

12. Бадьин, Ю. А. Повышение эффективности технологических нагревательных печей НПЗ / Ю. А. Бадьин, В. Ф. Решетов, В. М. Ящук // Химическая техника. – 2016. – № 3. – С. 10

13. C.L. Lee, C.J.G. Jou. Improving furnace and boiler cost-effectiveness and CO<sub>2</sub> emission by adjusting excess air. Environ Prog, 31 (2012), pp. 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.043>

14. Никифоров А.С., Приходько Е. В., Карманов А.Е. Модернизация обмуровки водогрейных котлов малой мощности с целью снижения тепловых потерь. Вестник ПГУ им. Торайгырова, серия Энергетическая, 2013 г. № 2. С. 222-228.

15. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – Издание 3, перераб. и доп. – СПб. : Изд. НПОЦКТИ, 1998. – 256 с.

16. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000, с. 514

#### Авторы публикации

**Шамиль Гаязович Зиганин** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Айрат Рифкатович Загретдинов** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Ваньков Юрий Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

#### References

1. A. R. Trott, and T. Welch, "Refrigeration and air conditioning," Butterworth-Heinemann, Third edition, 2000.

2. Dolotovskiy, I. V. Improving the systemic efficiency of the energy complex of enterprises for the preparation and processing of gas condensate raw materials: specialty 05.14.01 "Energy systems and complexes": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Dolotovskiy Igor Vladimirovich. – Saratov, 2018. – 439 p.

3. Mahinroosta, Mostafa. (2013). A Review on Energy Efficiency Improvement methods for Oil and Gas Industries. 2nd Conference on Emerging Trends in Energy Conservation. Tehran

4. P. Wang, C.F. Xie, S.M. Xu, Y.L. Ge. Application of energy-saving technology on furnaces of oil refining units. Proc. Environ Sci, 12 (2012), pp. 387-393, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.294>

5. A.M. Paramonov. Heating Furnaces Efficiency Improvement. Procedia Engineering, Volume 113, 2015, Pages 181-185, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.315>.

6. L. Mu, G. Liu, S. Wang, L. Wang, W. Sun, Z. Yang. Multi-layered composite coatings with enhanced corrosion and abrasion resistance for industrial flue gas waste heat recovery. Materials Letters, Volume 364, 2024, 136366, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136366>.

7. L. Mu, S. Wang, J. Lu, G. Liu, L. Zhao, Y. Lan. Effect of flue gas condensing waste heat recovery and its pressure drop on energy saving and carbon reduction for refinery heating furnace. Energy, Volume 279, 2023, 128081, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128081>.

8. J. Huang, H. Chen, J. Yang, Z. Du, H. Zhang, Z. Li. Enhancing performance of ceramic membranes for recovering water and heat from flue gas. Chemical Engineering Research and Design. Volume 192. 2023. Pages 208-222, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.02.028>.

9. A. Bao, D. Wang, C. Lin. Nanoporous membrane tube condensing heat transfer enhancement study. Int. J. Heat Mass Trans., 84 (2015), pp. 456-462.

10.N. Mohammadaliha, M. Amani, M. Bahrami. A Thermal-hydraulic assessment of condensing tube bank heat exchangers for heat and water recovery from flue gas. Applied

Thermal Engineering. Volume 215, 2022, 118976,  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118976>.

11. C.L. Lee, C.J.G. Jou. Saving fuel consumption and reducing pollution emissions for industrial furnace. *Fuel Process Technol*, 92 (2011), pp. 2335-2340. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.08.005

12. Badin, Yu. A. Improving the efficiency of technological heating furnaces of refineries / Yu. A. Badin, V. F. Reshetov, V. M. Yaschuk // *Chemical engineering*. – 2016. – No. 3. – p. 10

13. C.L. Lee, C.J.G. Jou. Improving furnace and boiler cost-effectiveness and CO<sub>2</sub> emission by adjusting excess air. *Environ Prog*, 31 (2012), pp. 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.043>

14. Nikiforov A.S., Prikhodko E. V., Karmanov A.E. Modernization of the lining of low-power hot water boilers in order to reduce heat losses. *Bulletin of the PSU named after Toraighyrova, Energy series*, 2013 No. 2. pp. 222-228.

15. *Thermal calculation of boilers (Normative method)*. – Edition 3, revised. and additional – St. Petersburg : Ed. NPO CCTI, 1998. – 256 p.

16. *Processes and devices of oil and gas processing and petrochemistry: Textbook for universities*. — 3rd ed., reprint. and additional — M.: Nedra-Businesscenter LLC, 2000, p. 514.

#### **Authors of the publication**

**Shamil G. Ziganshin** –Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Ayrat R. Zagretidinov** –Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Yury V. Vankov** – of Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Получено* *23.04.2024 г.*

*Отредактировано* *27.04.2024 г.*

*Принято* *03.05.2024 г.*



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ

Набиуллина М.Ф.<sup>1</sup>, Мингалеева Г.Р.<sup>2</sup>, Афанасьева О.В.<sup>3</sup>, Тимофеева С.С.<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН,  
г. Казань, Россия

madinanabiullina@yandex.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* На сельскохозяйственных предприятиях образуются растительные отходы, которые сложно утилизировать. Такие отходы могут быть использованы для сжигания в котлах, обеспечивая тепловой и электрической энергией сельскохозяйственный энергокомплекс. Гибридная мини-ТЭС, объединяющая возобновляемые источники энергии и растительное биотопливо, сможет обеспечить более экономичные, экологически чистые и надежные поставки тепловой и электрической энергии при любых условиях спроса по сравнению с использованием одной из этих систем. **ЦЕЛЬ:** Определение расхода топлива при сжигании различных видов растительных отходов сельского хозяйства в гибридной мини-ТЭС с параллельным подключением концентраторов солнечной энергии в условиях солнечной инсоляции Республики Татарстан. **МЕТОДЫ.** В статье рассмотрены химический состав и характеристики различных видов растительных отходов сельского хозяйства. Определена средняя суммарная нагрузка энергопотребления сельскохозяйственного предприятия. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Для определения расхода биотоплива для работы котла KE10-14CO проведен расчет теоретических объемов продуктов сгорания и тепловой расчет котла. Определена потребность во вспомогательном топливе на мини-ТЭС при параллельном подключении концентрационных установок солнечной энергии. Произведен расчет тепла, собираемого солнечным коллектором. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Использование концентраторов солнечной энергии при параллельном подключении с котлом на биотопливе дает возможность равномерного энергоснабжения предприятия и формирования запасов биотоплива. Расчеты показали, что использование гибридных установок для сжигания биомассы и солнечных коллекторов способствует снижению расхода топлива.

**Ключевые слова:** растительные отходы; гибридная мини-ТЭС; солнечная инсоляция, концентратор солнечной энергии, расход топлива.

**Для цитирования:** Набиуллина М.Ф., Мингалеева Г.Р., Афанасьева О.В., Тимофеева С.С. Использование растительных отходов для обеспечения функционирования сельскохозяйственных энергокомплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 120-131. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-120-131.

## THE USE OF PLANT WASTE TO ENSURE THE FUNCTIONING OF AGRICULTURAL ENERGY COMPLEXES

Nabiullina<sup>1</sup> M.F., Mingaleeva<sup>2</sup> G.R., Afanaseva<sup>3</sup> O.V., Timofeeva<sup>4</sup> S.S.

<sup>1,2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>3</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

<sup>4</sup>Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC, Kazan, Russia  
madinanabiullina@yandex.ru

**Abstract:** *RELEVANCE.* Agricultural enterprises generate vegetable waste, which is difficult to utilize. Such waste can be used for combustion in boilers, providing thermal and electric energy to an agricultural energy complex. A hybrid mini-thermal power plant combining

*renewable energy sources and plant biofuels will be able to provide more economical, environmentally friendly and reliable supplies of heat and electricity under any demand conditions compared to using one of these systems. OBJECTIVE. Determination of fuel consumption during combustion of various types of vegetative agricultural waste in a hybrid mini-thermal power plant with parallel connection of solar energy concentrators under conditions of solar insolation of the Republic of Tatarstan. METHODS. The article considers the chemical composition and characteristics of various types of plant waste from agriculture. The average total energy consumption load of an agricultural enterprise has been determined. RESULTS. To determine the consumption of biofuels for the operation of the KE10-14CO boiler, the calculation of the theoretical volumes of combustion products and the thermal calculation of the boiler were carried out. The need for auxiliary fuel at mini-thermal power plants with parallel connection of solar energy concentration plants has been determined. The calculation of the heat collected by the solar collector has been performed. CONCLUSION. The use of solar energy concentrators when connected in parallel with a biofuel boiler makes it possible to evenly supply energy to the enterprise and form biofuel reserves. Calculations have shown that the use of hybrid biomass combustion plants and solar collectors helps to reduce fuel consumption.*

**Keywords:** *plant waste; hybrid mini-thermal power plant; solar insolation, solar energy concentrator, fuel consumption.*

**For citation:** Nabiullina M.F., Mingaleeva G.R., Afanaseva O.V., Timofeeva S.S. The use of plant waste to ensure the functioning of agricultural energy complexes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (3): 120-131. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-120-131.

#### **Введение (Introduction)**

Биомасса является одной из форм возобновляемых источников, которые могут быть преобразованы в твердое, жидкое и газообразное энергетическое топливо, и на основе которого может быть произведена тепловая и электрическая энергии.

В настоящее время биомасса вносит примерно 12% в производство первичной энергии в мире, а в развивающихся странах она покрывает 40-50% необходимой энергии. В настоящее время использование возобновляемых топливных материалов, таких как древесные отходы, для производства биотоплива повышает шансы биомассы перейти на уровень доступности на энергетическом рынке [1].

Биомасса является экологически чистой и нейтральной энергией по отношению к выбросам углекислого газа. Углекислый газ поглощается растениями в процессе выращивания и образует замкнутый контур, поскольку количество углекислого газа, которое было поглощено растениями в процессе выращивания, будет примерно соответствовать тому, которое было удалено в процессе полного сжигания. Биомасса может служить значительным дополнением к возобновляемым источникам энергии, таким как ветер и солнце. Однако для максимально эффективного использования биомассы и минимизации негативных воздействий на окружающую среду, необходимо разрабатывать и внедрять более эффективные методы ее обработки и использования. Это включает в себя повышение урожайности культур, оптимизацию процессов сжигания и создание более эффективных способов хранения и транспортировки биомассы.

Наиболее доступными ресурсами для производства топлива из возобновляемых источников сырья являются древесина, солома зерновых культур, шелуха подсолнечника, стебли кукурузы и навоз крупного рогатого скота.

Использование древесины, которая традиционно применяется в качестве источника энергии с древних времен, в настоящее время во многих странах регулируется на государственном уровне, поскольку большинство стран Европейского союза озабочены сохранением естественных лесных биотопов [2]. Из-за этих правил, введенных на национальном уровне, древесина даже низкого качества (получаемая из веток и сучьев-обрубков) становится менее доступной [3]. Биомасса является возобновляемым источником энергии, поскольку ее количество увеличивается из года в год, она широко распространена по всему миру и имеет низкую стоимость по сравнению с ископаемым топливом. Ресурсы биомассы, из которых производится топливный материал, могут включать древесину и древесные отходы, сельскохозяйственные злаки и

отходы, образующиеся в результате их производства, водную биомассу и водоросли [4]. Побочные продукты деревообрабатывающей промышленности, такие как опилки, успешно использовались для производства брикетов с удовлетворительной теплотворной способностью, но в настоящее время большое внимание уделяется другим видам материалов, получаемых из биомассы, таких как солома, лузга подсолнечника, стебли кукурузы и подсолнуха и другие [5].

Процесс получения жидкого биотоплива является более сложным: путем ферментации крахмала или сахара (биоэтанол), из масличных растений (биодизель), из биомассы (диметилловый эфир) и др. Низкая плотность жидкого биотоплива по сравнению с дизельным, предполагает использование топливных баков с большим объемом. Биодизель является одним из видов жидкого биотоплива и используется в дизельных двигателях. Он производится из растительных масел, животных жиров и синтетических добавок. Биодизель обладает рядом преимуществ по сравнению с обычным дизельным топливом, таких как более низкая стоимость, меньшие выбросы вредных веществ и возможность использования в обычных дизельных двигателях без модификаций. Однако, производство биодизеля также имеет свои недостатки, такие как необходимость в больших площадях для выращивания растений, высокая стоимость оборудования для переработки и возможность использования только определенных видов масел и жиров.

Газообразное биотопливо состоит в основном из метана и углекислого газа в различных пропорциях в зависимости от состава органического вещества, из которого оно было получено. Основными источниками биогаза являются отходы животноводства и сельского хозяйства, сточные воды и органика из бытовых отходов. Биогаз образуется в результате процессов биологического разложения без доступа кислорода (анаэробное сбраживание). Одним из главных преимуществ газообразного биотоплива является его экологичность. Биологическое происхождение этого топлива означает, что при его использовании не происходит выброса парниковых газов, которые являются причиной глобального потепления. Использование газообразного биотоплива также имеет свои недостатки. Одним из них является то, что для производства этого топлива требуется большое количество земли и воды, что может привести к конфликтам с другими видами землепользования. Кроме того, некоторые виды газообразного биотоплива могут быть менее эффективными по сравнению с традиционными видами топлива, такими как природный газ. Газообразное биотопливо является перспективным источником энергии, который может помочь снизить зависимость от ископаемых видов топлива и уменьшить выбросы парниковых газов.

Развитие малой энергетики на промышленных или сельскохозяйственных предприятиях более экономически выгодно в условиях постоянного повышения платы за подключение к централизованным сетям или за увеличение мощности. Подключение собственных мини-ТЭС целесообразно в лесообрабатывающей, сельскохозяйственной промышленности, где вместе с выработкой электричества необходимо производство пара для технологических процессов производства. При этом само производство имеет отходы в виде опилок и шелухи семян сельскохозяйственных культур, которые могут быть преобразованы в pellets и использоваться для энергетических нужд.

Работа лесообрабатывающей промышленности не имеет ограничений по производительности отходов, однако, в сельском хозяйстве имеются ограничения в зависимости от сезона. Таким образом, для бесперебойной выработки тепловой и электрической энергии необходимо комбинирование различных источников энергии. Существуют различные виды гибридных электростанций, использующих различные виды возобновляемой энергии, такие как солнечная, ветровая энергии и энергия биотоплива.

Совместимость солнечных тепловых электростанций и котлов на биотопливе может быть использована для проектирования электростанции, которая использует солнечные концентраторы в течение дня и биомассу в периоды пониженной интенсивности солнечного излучения (ночь, облачные периоды, переходные периоды). Следовательно, гибридная технология сжигания биомассы с использованием концентрированной солнечной энергии основана на эффективной интеграции солнечного коллектора в водно-паровой цикл электростанции на биомассе [6].

Системы выработки энергии на биомассе и ветровые электростанции могли бы дополнять друг друга. Система на биомассе обеспечивает резервную выработку энергии, необходимой ветропарку для покрытия возможных несоответствий между прогнозируемыми и реальными значениями его выходной мощности. Работа

непрерывно для производства электроэнергии, система на биомассе обеспечивает дополнительную гибкость и надежность энергосистемы в целом. Чтобы оптимизировать использование установки на биомассе, она должна быть установлена на территории ветропарка и работать все время для производства электроэнергии [7].

Целью исследования является оценка эффективности гибридных мини-ТЭС для сравнительного анализа различных вариантов комбинирования возобновляемых источников энергии и биотоплива.

Научная значимость исследования состоит в получении зависимости годового цикла изменения расхода топлива в зависимости от изменения интенсивности солнечного излучения с учетом региональных климатических особенностей Республики Татарстан.

Практическая значимость исследования заключается в том, что на основе проведенных расчетов могут быть получены данные по расходу топлива, в качестве которого используются отходы сельскохозяйственного производства - солома, шелуха семян подсолнечника и стебли кукурузы, - для использования автономной гибридной тепловой электростанции необходимой мощности с учетом региональных климатических особенностей.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

В данной работе проведен анализ имеющихся энергетических ресурсов для сельскохозяйственных предприятий Республики Татарстан. В республике ежегодно образуется более 20 тыс. тонн сельскохозяйственных отходов, основную часть которых составляют отходы от переработки зерновых культур: пшеницы, ржи, кукурузы, рапса, подсолнечника, перспективные в развитии альтернативной энергетики Республики Татарстан. В таблице 1 представлен химический состав и характеристики различных видов твердой биомассы, используемой для получения тепловой и электрической энергии.

Таблица 1.

Химический состав и характеристики различных видов биомассы

Наименование показателя	Подсолнечная лузга	Стебли кукурузы	Солома	Древесина
Влажность W, %	8,4	16,5	15	40
Зольность на сухую массу A, %	2,7	7	4,5	1,0
C, %	50,1	45,5	45	51,0
S, %	0,14	0,2	0,01	-
H, %	6,3	5,5	5,8	6,1
N, %	2,36	0,3	0,4	0,6
O, %	41,4	41,5	39	42,1
Теплота сгорания, МДж/кг	15,4	16,7	11,7	10,2

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В процессе работы маслоэкстракционных заводов образуется большое количество шелухи, являющейся крупнотоннажным ресурсом для вторичного использования. Сейчас ее применяют в сфере энергетики, сельском хозяйстве, медицинской, пищевой и химической промышленности [8]. Состав лузги, высушенной при 110 °С: углерод – 49%, водород – 5,75%, кислород и азот 43,11%, сера – 0,10%, зола – 2%. Средняя влажность промышленной лузги около 10%, а низшая теплотворная способность составляет 14,5–16,5МДж/кг. Зола лузги подсолнечника относится к золе средней плавкости. Лузга подсолнечника сгорает с минимальными выбросами летучих органических соединений в атмосферу, что делает ее полезной в качестве альтернативного экологического топлива [9].

Солома имеет низшую теплотворную способность рабочего топлива в среднем 11,7 МДж/кг. Допустимый диапазон влажности соломы для сжигания составляет 10–23%, оптимальное значение – 15%, зольность 4,5-6,1 %. Однако содержание хлора и калия в соломе примерно на порядок выше, чем в древесной щепе. Максимальное содержание хлора в соломе наблюдается непосредственно после обмолота урожая. Высокое содержание щелочных металлов обуславливает низкую температуру плавления золы соломы [9]. В отличие от древесины, этот вид биомассы, как правило, является отходом, на утилизацию которого требуются относительно высокие затраты. В среднем за 2001-2008 гг. в России собирали 38 млн. т соломы озимых культур. В странах с высокоразвитым животноводством, например, в Дании, 36,5% собираемой соломы используется в животноводстве. Следовательно, около 24 млн. т может быть использовано в качестве топлива.

Элементарный состав соломы и теплота ее сгорания (табл. 2) не слишком отличаются от соответствующих показателей для древесины, хотя теплота сгорания соломы ниже, чем у сухой древесины [10].

Побочная продукция переработки кукурузы на зерно имеет достаточно хорошие топливные свойства, близкие к свойствам древесного топлива. Биотопливо, изготовленное из кукурузы, может сжигаться в котельном оборудовании, предназначенном для сжигания твердого топлива. Содержание золы в кукурузе является основным фактором качества для дальнейшего производства биотоплива и зависит от технологии сборки (этот показатель увеличивается вследствие контакта биомассы с грунтом). Учитывая это, существует два типа золы: структурная зола и неструктурная. К неструктурным компонентам относятся различные растворимые и нерастворимые вещества. Часть из них можно извлекать из древесины водой или органическими растворителями. Структурная зола состоит из неорганических веществ в растении, которые остаются после ее сжигания. Обычная зольность кукурузы - 3,5%. По характеристикам плавкости золы кукурузы приближается к древесной биомассе, обеспечивает лучшие условия для сжигания. Для сравнения: у древесины температура плавления золы составляет около 1200 °С, а температура плавления стеблей кукурузы - около 1100 °С. По элементному составу кукуруза почти не отличается от соломы зерновых колосовых, поэтому у них и сравнима теплотворная способность. Свойства побочной продукции растениеводства зависят от места выращивания, времени сбора и погоды, почвы и удобрений. Наибольшее влияние на теплотворную способность кукурузы оказывает влажность [11]. Стебли кукурузы, подсолнечника после обмолота на зерно не срезаются, а остаются зимовать в поле. После зимовки влажность стеблей уменьшается до 20–25%, и высохшие стебли убираются. Низшая теплотворная способность таких стеблей составляет 13,6 МДж/кг, зольность – 4–10% [9].

На основе обзора известных технологических схем гибридных электростанций, использующих биомассу [12], проведен расчет гибридной мини-ТЭС в конфигурации параллельной установки солнечных коллекторов и парового котла на биомассе для климатических условий Республики Татарстан [13]. Схема, представленная на рис.1 работает следующим образом.

Теплоноситель из солнечного коллектора 1 подается в котел 2 для дополнительного подогрева. Разогретый до необходимой температуры теплоноситель поступает в теплообменник, состоящий из экономайзера 9, испарителя 10 и перегревателя 11 для парообразования поступающей в теплообменник воды. Перегретый пар из перегревателя подается в паровую турбину 3, после которой отработавший пар конденсируется в конденсаторе 5, затем конденсатными насосами 6 подается к деаэратору 7. После деаэратора вода подается в экономайзер теплообменника. Блок подготовки топлива 12 включает хранилище готового к использованию топлива и устройство топливоподготовки.

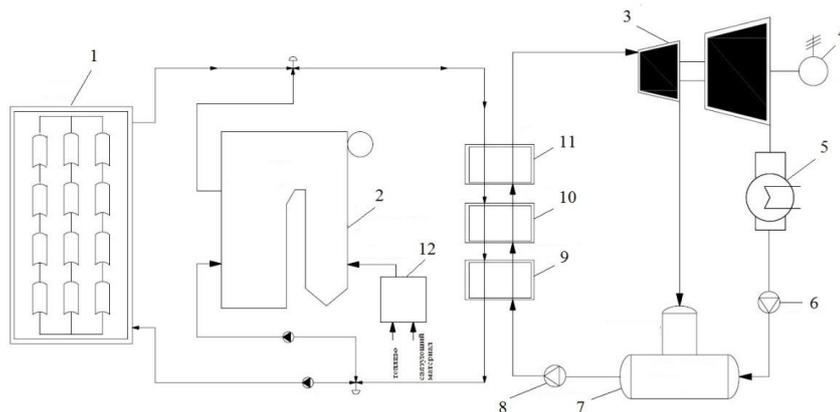


Рис. 1. Схема параллельного подключения котла на биотопливе и солнечной тепловой электростанции с параболическим желобом: 1 – солнечные коллекторы; 2 – котел; 3 – паровая турбина; 4 – электрогенератор; 5 – конденсатор; 6 – конденсатный насос; 7 – деаэратор; 8 – питательный насос; 9 – экономайзер; 10 – испаритель; 11 – перегреватель; 12 – блок подготовки биотоплива

Fig. 1. Diagram of parallel connection of a biofuel boiler and a solar thermal power plant with a parabolic trough: 1 – solar collectors; 2 – boiler; 3 – steam turbine; 4 – electric generator; 5 – condenser; 6 – condensate pump; 7 – deaerator; 8 – feed pump; 9 – economizer; 10 – evaporator; 11 – superheater; 12 – biofuel preparation unit

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследования показывают, что наиболее популярными теплоносителями для систем солнечной энергетики являются синтетические углеводородные масла на основе дифенилоксида [14]. Эксплуатация гибридной электростанции при низких температурах возможна только с теплоносителями с низкой температурой замерзания и температурой самовоспламенения выше расчетных показателей котла.

Теплофизические свойства теплоносителя, выбранного для исследования, указаны в таблице 2.

Таблица 2.

Теплофизические характеристики теплоносителя

Наименование показателя	Единица измерения	Значение
Название и производитель теплоносителя		Therminol 59, Solutia
Состав	-	Дифенилоксид / дифенил
Максимальная рабочая температура	°С	315
Температура застывания	°С	-49
Удельная теплоемкость жидкости при 100 °С	Дж/кг°С	1940
Плотность жидкости при 100°С	кг/м³	916
Номинальный массовый расход на контур коллектора	кг/с	7

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для определения необходимой мощности гибридной мини-ТЭС необходимо знать нагрузки отдельных энергопотребителей. В сельском хозяйстве можно выделить следующих основных потребителей: жилые дома рабочих и служащих; производственные потребители (животноводческие фермы, теплицы, хранилища с/х продукции, мельницы, гаражи, котельные и т.п.); предприятия АПК (молокозаводы, птицефабрики, маслоэкстракционные заводы и т.п.) и прочие.

В таблице 3 представлены основные вероятностные характеристики нагрузок сельскохозяйственных потребителей.

Таблица 3.

Электрические нагрузки сельскохозяйственных потребителей

Объект	Дневной максимум нагрузки, кВт	Вечерний максимум нагрузки, кВт	Установленная мощность, кВт
Птичник на 5-6 тыс. кур	20	20	40
Кормоцех птицефермы на 2530 тыс. кур	20	10	60
Коровник привязного содержания с механическим доением, уборкой навоза и электронагревом на 1000 коров	10	10	20-30
Кормоцех фермы КРС на 800-1000 голов	50	50	130
Зернохранилище с передвижными механизмами вместимостью 1000...2000 т.	20	10	60
Семеновохранилище вместимостью 1000 т.	80	80	100
Склад минеральных удобрений	12	1	16
Склад нефтепродуктов и гараж	20	10	45
Административное здание на 15-25 рабочих мест	15	8	-
Жилой дом	4,1	7	-

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Суммарная нагрузка энергопотребления для всех указанных в таблице 3 потребителей составляет от 470 до 500 кВт. Для обеспечения тепло- и электроэнергией сельскохозяйственного предприятия необходимо в схеме гибридной мини-ТЭС предусмотреть турбину на 500 кВт и котельное оборудование, обеспечивающее выходную мощность. Таким образом, формируется энергокомплекс, состоящий из хозяйственных объектов и гибридной мини-ТЭС, работающей на отходах данного производства и солнечной энергии.

В схеме гибридной мини-ТЭС предполагается установка котла КЕ-10-14-С, подходящий для сжигания низших сортов топлива [15]. Расход топлива для работы гибридной мини-ТЭС мощностью 500 кВт определен нормативным методом расчета котла с механической топкой, предназначенной для сжигания твердого топлива в паровых котлах паропроизводительностью до 10 т/ч, на различных видах биомассы. Технические характеристики котла представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Тип котла	КЕ10-14СО, БКЗ, топка ТЛЗМ 2,7/3,0
Паропроизводительность, т/ч	10
Рабочее давление пара на выходе, МПа ( кгс / см <sup>2</sup> )	2,3(23,0)
Температура пара на выходе, °С	250 (перегретый)
Температура питательной воды, °С	100
Расчетный КПД, %	82

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Результаты (Results)

Для определения необходимого количества биотоплива для работы рассматриваемого котла проведен расчет теоретических объемов продуктов сгорания и тепловой расчет котла, результаты которого представлены в таблицах 5, 6.

Таблица 5.

Результаты расчета теоретического расхода воздуха и теоретических объемов продуктов сгорания

Наименование параметров	Обозначение	Размерность	Численное значение (лузга подсолнечника)	Численное значение (солома)	Численное значение (стебли кукурузы)
Теоретический объем воздуха по составу топлива	$V^0$	$\frac{м^3}{кг}$	4,75	4,24	4,13
Теоретический объем трехатомных газов	$V_{RO_2}^0$	$\frac{м^3}{кг}$	0,14	0,14	0,14
Теоретический объем азота	$V_{N_2}^0$	$\frac{м^3}{кг}$	3,77	3,35	3,26
Теоретический объем водяных паров	$V_{H_2O}^0$	$\frac{м^3}{кг}$	0,90	0,84	0,88
Теоретический объем дымовых газов	$V_T^0$	$\frac{м^3}{кг}$	7,03	6,38	6,25

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 6.

Результаты теплового расчета

Наименование	Обозначение	Размерность	Численное значение (лузга подсолнечника)	Численное значение (солома)	Численное значение (стебли кукурузы)
Потери тепла с уходящими газами	$q_2$	%	5,44	7,10	4,88
Суммарные потери тепла в котельном агрегате	$\sum q$	%	17,19	18,85	16,63

Коэффициент полезного действия котельного агрегата	$\eta_k$	%	82,81	81,15	83,83,37
Расход топлива, подаваемого в топку	В	$\frac{кг}{с}$	0,49	0,72	0,44

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Экономии биотоплива на мини-ТЭС при параллельном подключении концентрационных установок солнечной энергии можно рассчитать по следующему выражению [16]:

$$M_p = \frac{Q_n - Q_c}{h_k Q_p}, \quad (1)$$

где  $Q_n$  - тепло, необходимое для производства с полной нагрузкой, Дж/кг;  $Q_c$  - тепло, собираемое солнечным коллектором, Вт;  $\eta_k$  - коэффициент полезного действия котла на биомассе. Значение КПД установлено на 82,81%, 81,15%, 83,37% для котла на биотопливе при сжигании лузги подсолнечника, соломы и стеблей кукурузы соответственно;  $Q_p$  - теплотворная способность биомассы, Дж/кг.

Тепло, собираемое солнечным коллектором, определяется по формуле [17]:

$$Q_c = c \cdot M \cdot (t_k - t_n), \quad (2)$$

где,  $c$  – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°C);  $M$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $t_k$  – температура теплоносителя на выходе из последнего контура солнечного концентратора, °C;  $t_n$  – температура теплоносителя на входе в солнечный коллектор, °C.

На рисунках 2, 3, 4 представлены графики расхода биотоплива на гибридной мини-ТЭС с параллельным подключением установок концентрации солнечной энергии (concentrated solar power - CSP) и без подключения CSP для интенсивности солнечного излучения, характерной для Республики Татарстан в течение года.

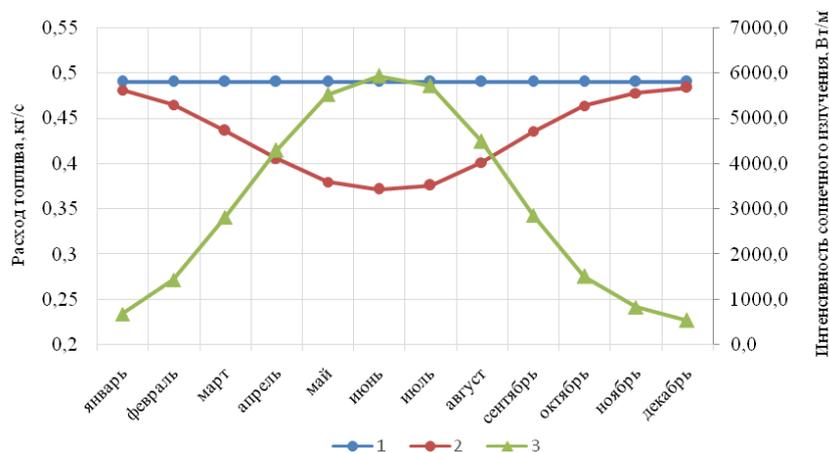


Рис. 2. Расход топлива (лузга подсолнечника) на гибридной мини-ТЭС в зависимости от интенсивности солнечного излучения: 1- без использования солнечного нагревателя; 2 – с солнечным нагревателем; 3 – интенсивность солнечного излучения

Fig. 2. Fuel consumption (sunflower husk) at a hybrid mini-thermal power plant depending on the intensity of solar radiation: 1 - without using a solar heater; 2 – with a solar heater; 3 – the intensity of solar radiation

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Использование гибридных установок для сжигания биомассы и солнечных коллекторов способствует снижению расхода топлива с 0,49 до 0,43 кг/с для лузги подсолнечника. Общая экономия топлива за год составляет 1854,4 т.

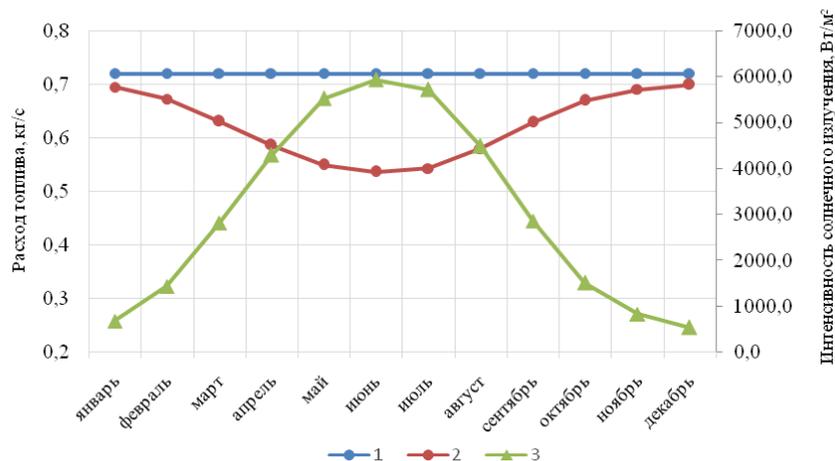


Рис. 3. Расход топлива (солома) на гибридной мини-ТЭС в зависимости от интенсивности солнечного излучения: 1 - без использования солнечного нагревателя; 2 - с солнечным нагревателем; 3 - интенсивность солнечного излучения

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Расход топлива при сжигании соломы в топке котла составляет 0,72 кг/с. Параллельное подключение солнечных коллекторов в данную схему снижает расход топлива до 0,54 кг/с, общая экономия биотоплива составляет 3052,18 т в год.

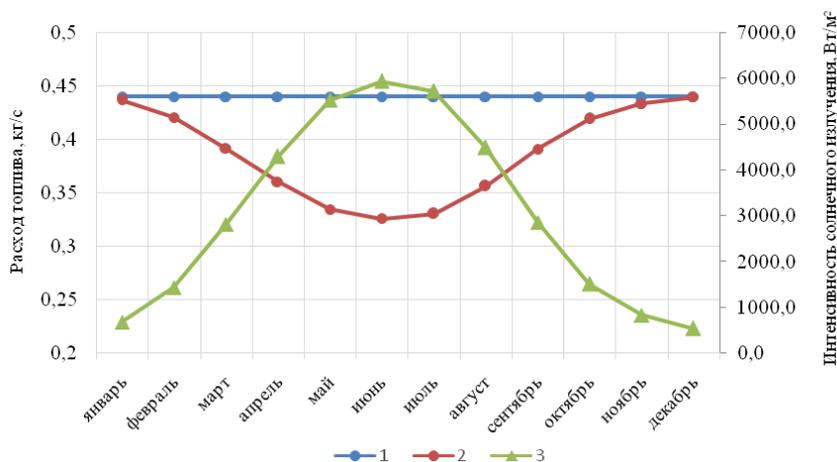


Рис. 4. Расход топлива (стебли кукурузы) на гибридной мини-ТЭС в зависимости от интенсивности солнечного излучения: 1 - без использования солнечного нагревателя; 2 - с солнечным нагревателем; 3 - интенсивность солнечного излучения

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В связи с более высокой теплотой сгорания наименьший расход топлива из рассмотренных видов биотоплива оказался у стеблей кукурузы и составил 0,44 кг/с. При подключении солнечных коллекторов в контур котла экономия биотоплива за год составила 1687,09 т, расход топлива снизился до 0,33 кг/с.

При подключении солнечных коллекторов в схему мини-ТЭС на биотопливе обеспечивается равномерная выработка энергии и могут быть созданы необходимые запасы топлива. Максимальная эффективность данной схемы достигается в летний период, когда обеспечивается максимум нагрева теплоносителя в солнечных коллекторах и требуется минимальное количество биотоплива для дополнительного подогрева, в то время как максимальная нагрузка на котел приходится на декабрь.

Использование биомассы для производства энергии может сократить зависимость от поставок ископаемого топлива и уменьшить расходы на его закупку, что приведет к

экономии средств сельхозпредприятия. Применение гибридной мини-ТЭС для энергообеспечения сельскохозяйственного предприятия позволит минимизировать или вовсе исключить затраты на топливо, поскольку используются отходы местного производства.

#### **Заключение или Выводы (Conclusions)**

1. Проведен анализ химического состава и характеристик имеющихся энергетических ресурсов (биотоплива) для сельскохозяйственных предприятий Республики Татарстан.

2. Для тепло- и электроснабжения сельскохозяйственного предприятия предложена технологическая схема гибридной мини-ТЭС с использованием солнечной энергии мощностью 500 кВт. Проведен расчет расхода биотоплива на гибридной мини-ТЭС с параллельным подключением установок концентрации солнечной энергии для солнечной инсоляции Республики Татарстан.

3. Получены зависимости, показывающие динамику изменения расхода топлива по месяцам года в зависимости от изменения интенсивности солнечного излучения для климатических условий Республики Татарстан.

4. Результаты расчетов показывают, что энергоснабжение сельскохозяйственного энергокомплекса может обеспечиваться за счет местных ресурсов – отходов растениеводства и солнечной энергии, – без дополнительных затрат на топливо.

#### **Литература**

1. Mehmet A.D., Samuel A.S., Ernest F.A. Does biomass energy drive environmental sustainability? An SDG perspective for top five biomass consuming countries // Biomass and Bioenergy, 2021, Vol. 149, pp.1-8.

2. Bridgwater A.V. Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading // Biomass bioenergy, 2012, Vol. 38, pp. 68-94.

3. Demirbas A. Resource Facilities and Biomass Conversion Processing for Fuels and Chemicals // Energy Conversion Management, 2011, Vol. 42, N11, pp. 1357-1378.

4. Okello C., Pindozzi S., Faugno S., Boccia L. Bioenergy potential of agricultural and forest residues in Uganda // Biomass Bioenergy, 2013, Vol. 56, pp. 515-525.

5. N. Kaliyan, R.V. Morey Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Product, Biomass Bioenerg, 2009, Vol. 33, N3, pp. 379-359.

6. Nathan G.J., Jafarian M., Dally B.B., et al. Solar thermal hybrids for combustion power plant: Agrowing opportunity // Progress in Energy and Combustion Science, 2018, Vol. 64. pp. 4-28.

7. Perez-Navarro A., Alfonso D., Alvarez C., et al. Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation // Renewable Energy, 2010, Vol. 35, N7, pp. 1436-1443.

8. Караева Ю.В., Тимофеева С.С., Гильфанов М.Ф., Камалов Р.Ф., Марфин Е.А. Термохимическая конверсия лузги подсолнечника // Химия растительного сырья. 2023. № 2. С. 335-344.

9. Забарный Г.Н., Ключ С.В., Довженко Д.С. Использование растительных отходов для производства энергии // Альтернативная энергетика и экология. 2011. Т. 8. С. 100–106.

10. Солома как энергетическое топливо: возможные решения проблем, возникающих при производстве и сжигании гранулированной соломы и других отходов растениеводства. Доступно по: <http://www.energsovet.ru/stat803.html>. Ссылка активна на 13 февраля 2024.

11. Стебли кукурузы - замечательное биотопливо. Доступно по: <https://bio.ukr.bio/ru/articles/11019>. Ссылка активна на 13 февраля 2024.

12. Srinivas T., Reddy B.V. Hybrid solar–biomass power plant without energy storage // Case Studies in Thermal Engineering. 2014. Vol. 2, pp. 75-81.

13. Значение солнечной инсоляции в г. Казань (Республика Татарстан). Доступно по: <https://www.betaenergy.ru/insolation/kazan>. Ссылка активна на 10 февраля 2024.

14. Теплоносители для солнечной энергетики. Доступно по: <https://termolan.ru/teplonositeli-dlya-solnechnoy-energetiki>. Ссылка активна 18 марта 2024.

15. Савина М.В., Ндлову Э.Т., Мингалеева Г.Р. Оценка эффективности парового котла типа КЕ при сжигании низкосортного топлива // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. № 1 (45). Т. 12. С. 3-12.

16. Servert J., San Miguel G., Lopez D., Hybrid solar - biomass plants for power generation; technical and economic assessment // Global NEST Journal, 2011, Vol. 13, N3, pp.

266-276.

17. Шишкин Н.Д., Манченко Е.А. Системный анализ и алгоритмы расчета комбинированных солнечно-ветровых установок // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. №1. С. 100-108.

#### Авторы публикации

**Набиуллина Мадина Фаридовна** – преподаватель кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID\**: <https://orcid.org/0009-0004-2499-3761>. *E-mail*: [madinanabiullina@yandex.ru](mailto:madinanabiullina@yandex.ru).

**Мингалева Гузель Рашидовна** – д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Энергетическое машиностроение» (ЭМС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0002-7230-6776>. *E-mail*: [mingaleeva-gr@mail.ru](mailto:mingaleeva-gr@mail.ru)

**Афанасьева Ольга Валерьевна** - канд. техн. наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0002-6614-2728>. *E-mail*: [afanaseva\\_ov@spbstu.ru](mailto:afanaseva_ov@spbstu.ru).

**Тимофеева Светлана Сергеевна** - канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0003-4168-2442>. *E-mail*: [zvezdochka198512@mail.ru](mailto:zvezdochka198512@mail.ru)

#### References

1. Mehmet A.D., Samuel A.S., Ernest F.A., Does biomass energy drive environmental sustainability? An SDG perspective for top five biomass consuming countries, *Biomass and Bioenergy*, 2021, 149: 1-8.
2. Bridgwater A.V., Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading, *Biomass bioenergy*, 2012, 38:68-94.
3. Demirbas A. Resource Facilities and Biomass Conversion Processing for Fuels and Chemicals? *Energy Conversion Management*, 2011, 42 (11): 1357-1378.
4. Okello C., Pindozi S., Faugno S., Boccia L. Bioenergy potential of agricultural and forest residues in Uganda // *Biomass Bioenergy*, 2013, 56: 515-525.
5. N. Kaliyan, R.V. Morey Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Product, *Biomass Bioenergy*, 2009, 33 (3): 379-359.
6. Nathan G.J., Jafarian M., Dally B.B., et al. Solar thermal hybrids for combustion power plant: Agrowing opportunity, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 64: 4-28.
7. Perez-Navarro A., Alfonso D., Alvarez C., et al. Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation, *Renewable Energy*, 2010, 35 (7): 1436-1443.
8. Karaeva Yu.V., Timofeeva S.S., Gil'fanov M.F. et al. Termohimicheskaya konversiya luzgi podsolnechnika. *Himiya rastitelnogo syrya*. 2023, 2: 335-344.
9. Zabarny G.N., Klyus S.V., Dovzhenko D.S. Ispolzovanie rastitelnykh othodov dlya proizvodstva energii. *Alternativnaya Energetika i Ekologiya*. 2011. 8. С. 100–106. (In Russ).
10. Straw as an energy fuel: possible solutions to problems arising in the production and burning of granular straw and other crop waste. Available at: <http://www.energsovet.ru/stat803.html>. Accessed: 13 Feb 2024. (In Russ).
11. Corn stalks are a wonderful biofuel. Available at: <https://bio.ukr.bio/ru/articles/11019>. Accessed: 13 Feb 2024. (In Russ).
12. Srinivas T., Reddy B.V. Hybrid solar–biomass power plant without energy storage. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2014, 2: 75-81.
13. The importance of solar insolation in Kazan (Republic of Tatarstan). Available at: <https://www.betaenergy.ru/insolation/kazan>. Accessed: 10 Feb 2024. (In Russ).
14. Heat carriers for solar energy. Available at: <https://termolan.ru/teplonositeli-dlya-solnechnoy-energetiki>. Accessed: 18 March 2024. (In Russ).
15. Savina M.V., Ndlovu E.T., Mingaleeva G.R. Ocenka effektivnosti parovogo kotla tipa KE pri szhiganii nizkosortnogo topliva. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2020, 1 (12): 3-12.
16. Servert J., San Miguel G., Lopez D. Hybrid solar - biomass plants for power generation; technical and economic assessment. *Global NEST Journal*, 2011, 13 (3): 266-276.
17. N.D. Shishkin, E.A. Manchenko. Sistemniy analiz I algoritmi rascheta

konbinirovannih solnechno-ventrovih ustanovok. *Vestnik of ASTU. Series: Management, computer science and informatics*. 2013, 1: 100-108.

**Authors of the publication**

**Madina F. Nabiullina** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID\**: <https://orcid.org/0009-0004-2499-3761>. *E-mail*: [madinanabiullina@yandex.ru](mailto:madinanabiullina@yandex.ru).

**Guzel R. Mingaleeva** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0002-7230-6776>. *Email* [mingaleeva-gr@mail.ru](mailto:mingaleeva-gr@mail.ru).

**Olga V. Afanaseva** - Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0002-6614-2728>. *E-mail*: [afanaseva\\_ov@spbstu.ru](mailto:afanaseva_ov@spbstu.ru).

**Svetlana S. Timofeeva** - Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC, Kazan, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0003-4168-2442>. *E-mail*: [zvezdochka198512@mail.ru](mailto:zvezdochka198512@mail.ru)

*Шифр научной специальности по паспорту научной специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы*

**Получено** **20.03.2024 г.**

**Отредактировано** **03.05.2024 г.**

**Принято** **14.05.2024 г.**



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДЫМОВОГО ФАКЕЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

Грибков А.М., Чичирова Н.Д., Мирсалихов К.М.

Казанский государственный энергетический университет,  
Г. Казань, Россия

[gribovalmi@mail.ru](mailto:gribovalmi@mail.ru), [ndchichirova@mail.ru](mailto:ndchichirova@mail.ru), [mirsalihovkm@gmail.com](mailto:mirsalihovkm@gmail.com)

**Резюме:** В ряде случаев, например, как средство верификации вариантных расчетов в среде ANSYS, требуется исследование траектории дымового факела в натуральных условиях. Одним из наиболее простых, удобных и дешевых способов определения траектории является ее фотографирование с дальнейшей расшифровкой фотоснимка. Так, например, вертикально стоящая дымовая труба, в том случае, если направление съемки фотоаппарата приподнято над горизонтом, а труба расположена не по центру снимка, на фотоснимке она выглядит наклонной. Угол, под который был установлен фотоаппарат, можно рассчитать по фотографии. Чем дальше расположен предмет, тем меньше места он занимает на снимке. Таким образом, чтобы рассчитать траекторию дымового факела по фотоснимку, нужно знать ориентацию главной оптической оси во время снимка и расстояние до плоскости снимка. **ЦЕЛЬ.** Разработка новой, более простой методики пересчета траектории дымового факела от дымовой трубы с использованием доступных карт Google для расчета исходных масштабов на фотографии. **МЕТОДИКА.** Позволяет проследить всю последовательность действий от определения координат точки съемки до пересчета на ортогональную плоскость координат выбранных точек границ факела на фотоснимке относительно источника выброса. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработана новая методика расчета траектории дымового факела по одиночному фотоснимку, точность которой проверена по известным размерам исходных объектов, и которая оказалась выше, чем применявшаяся для этих целей ранее.

**Ключевые слова:** дымовая труба, дымовой факел, траектория, фотоснимок, карты Google.

**Благодарности:** Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки «Изучение процессов в гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина» шифр проекта FZSW-2022-0001

**Для цитирования:** Грибков А.М., Чичирова Н.Д., Мирсалихов К.М. Определение траектории дымового факела с использованием спутниковых снимков // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 132-145. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-132-145.

## DETERMINING THE TRAJECTORY OF A SMOKE FLAME USING SATELLITE IMAGES

Gribov AM., Chichirova ND., Mirsalikhov KM.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

[gribovalmi@mail.ru](mailto:gribovalmi@mail.ru), [ndchichirova@mail.ru](mailto:ndchichirova@mail.ru), [mirsalihovkm@gmail.com](mailto:mirsalihovkm@gmail.com)

**Abstract:** In a number of cases, for example, when choosing the design of the exit part of a chimney, when taking into account the characteristics of the underlying surface and meteorological characteristics of the area, or as a means of verifying variant calculations in the ANSYS environment, a study of the trajectory of the smoke plume in natural conditions is required. One of the simplest, most convenient and cheapest ways to determine a trajectory is to photograph it and then decipher it. So, for example, a vertical chimney, if the direction of the camera is raised above the horizon, and the chimney is not located in the center of the photo, it looks inclined in the photo. This means that at the top of the image and at the bottom there are different horizontal

linear scales of the image. The angle at which the camera was installed can also be calculated from the photograph. In addition, the same vertical height interval occupies a smaller length in the upper part of the pipe and a larger one in the lower part. This means that in the upper part of the image and in the lower part there are different vertical linear scales of the image. It is also necessary to take into account the fact that objects of the same size have different sizes in the picture. The further away an object is located, the less space it takes up in the photo. Thus, in order to calculate the trajectory of a smoke plume from a photograph, we need to know the orientation of the main optical axis during the photograph and the distance to the photograph plane, which we choose perpendicular to the main optical axis and passing through the object, from which we can determine the initial average linear scales, and the direction smoke plume spread. **TARGET.** Development of a new, simpler method for recalculating the trajectory of a smoke plume from a chimney using available Google maps to calculate the original scales in a photograph. **METHODOLOGY** Allows you to trace the entire sequence of actions from determining the coordinates of the shooting point to recalculating the coordinates of the selected points of the torch boundaries in the photograph relative to the emission source onto an orthogonal plane. **RESULTS.** A new method for calculating the trajectory of a smoke plume from a single photograph has been developed, the accuracy of which was tested using known sizes in the original objects, and which turned out to be higher than that previously used for these purposes.

**Key words:** flue gas stack, smoke torch, trajectory, photograph, Google maps.

**Acknowledgements:** The results were obtained with financial support from the Ministry of Science and Higher Education «Study of processes in a hybrid power plant fuel cell - gas turbine» project code FZSW-2022-0001

**For citation:** Gribkov AM., Chichirova ND., Mirsalikhov KM. Determining the trajectory of a smoke flame using satellite images. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (3): 132-145. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-132-145.

#### **Введение (Introduction)**

Одной из основных проблем при исследовании траектории дымового факела является переменная метеорологическая обстановка во время эксперимента. При использовании теодолитного визирования в силу специфики методики для фиксации одной траектории может потребоваться несколько минут, то есть при использовании данного метода получаем осредненные результаты за данный отрезок времени. Такая методика требует фиксации нескольких траекторий для получения осредненной. Для оценки исследования всей видимой части дымового факела одновременно, была разработана методика, основанная на определении траектории дымового факела при помощи фотоснимка. Для этого производится фотосъемка дымовой трубы и всей видимой части дымового факела. Для повышения точности результатов желательно располагаться как можно более перпендикулярно направлению движения дымового факела. При использовании данной методики может применяться любая современная фотокамера. Знание ее характеристик не требуется. Вся необходимая для расчета информация может быть получена по характеристикам дымовой трубы и из плана места съемки, полученного по спутниковому снимку.

#### **Литературный обзор (Literature Review)**

Исследования траектории распространения дымового факела начали проводиться в основном с 60-х годов прошлого столетия. При этом для регистрации положения дымового факела чаще всего применялось его фотографирование, а также определение его границ с помощью теодолита [1]. Так, например, Хэмфрис проводил теодолитные наблюдения за дымовым факелом от труб тепловых электростанций высотой 125 и 150 м до расстояний 2,5 км [2]. Обширный материал наблюдений за дымовым факелом в Швеции представлен в работе Брингфелта, где фотографировались факелы более, чем от 30 дымовых труб [3].

Попытки применения для этого наземной стереофотосъемки [4] и аэрофотосъемку [5] показали, что, несмотря на высокую стоимость таких экспериментов, они не дают заметного увеличения точности, так как при их анализе неизбежные погрешности в определении метеорологических данных, таких, как скорость ветра или температура воздуха в области распространения дымового факела значительно перекрывают погрешности в определении координат дымового факела [6].

Методика расчета траектории дымового факела по одиночному фотоснимку с использованием теодолитных замеров в условиях видимости дымовой трубы приведена в [7]. Основные общепринятые методы оценки дисперсии примесей в атмосфере, в том числе и применительно к выбросам из дымовых труб ТЭС, приведены в [8]. Несмотря на то, что в настоящее время все более широко применяется CFD-моделирование при решении широкого круга задач, в т.ч. и определение влияния условий истечения дымовых газов в атмосферу, для надежного их решения требуется верификация применяемого программного обеспечения с помощью натурального эксперимента. Основным средством такого эксперимента является фотографирование дымового факела.

В настоящее время возникают задачи, в которых требуется определение траектории дымового факела. Так, например, в [9] проведено исследование траектории начального участка дымового факела при установке на трубе в районе устья двух соосных с трубой вентиляторов. Показано, что установка таких вентиляторов на относительно низкие дымовые трубы котельных позволяет интенсифицировать процессы разбавления дымовых газов в атмосфере и тем самым значительно уменьшить длину дымового факела с заданным уровнем концентрации примесей в нем.

В [10] с помощью универсальной программной системы анализа методом конечных элементов ANSYS проведено моделирование начального участка 4-ствольной дымовой трубы, где впервые был показан эффект взаимного сближения струй отдельных стволов за счет разрежения в центре объединенного факела, что приводит к более быстрому объединению дымовых струй отдельных стволов, чем считалось ранее.

Серия численных экспериментов с целью исследования влияния метеорологических условий на форму дымовых факелов от дымовых труб высотой 180 и 250 м. с учетом наличия в факеле твердых взвесей проведена в работе [11]. В результате были получены важные результаты для разработки мониторинговых исследований в районе оз. Байкал.

В работе [12] проводилось исследование траектории газового факела из дымовой трубы корабля для того, чтобы рассчитать возможность нагрева от него корабельных конструкций. Показано, что радиоэлектронная аппаратура может нагреваться дымовыми газами больше допустимых 70 °С. В качестве верификации разработанной методики расчета применялась тепловизионная съемка. Расшифровка тепловизионных снимков может проводиться аналогично расшифровке фотографических снимков.

В работе [13] исследовались траектории дымовых факелов Барнаульских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, имеющих дымовые трубы высотой от 100 до 230 м. Для анализа привлекались снимки с искусственного спутника земли, по которым оценивалось турбулентное состояние пограничного слоя атмосферы и поворот ветра с высотой. В рамках предложенных решений обратных задач предложено описание процесса распространения атмосферных примесей и с помощью численного моделирования были получены профили скорости ветра. В основу модели положены уравнения экмановского пограничного слоя. В результате получена метеорологическая информация для определения эффективной высоты выбросов в условиях реальной атмосферы. В [14] описана аналогичная работа, сделанная на базе Омских ТЭЦ-2 и ТЭЦ-5.

Исследование траектории дымового факела [15] позволили сделать важные выводы о том, что неблагоприятные метеорологические условия (НМУ) по рассеиванию вредных выбросов для высотных источников не совпадают с такими же для низких источников и что направление ветра для высотных источников существенно отличается от направления ветра, определенного по уровню флюгера.

В [16] приведен обзор методик, по которым проектируются дымовые трубы и как на это влияют параметры, влияющие на рассеивание выбрасываемых примесей.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

В условиях городской застройки основная часть дымовой трубы с расположенными на ней светофорными площадками как правило не видна, что затрудняет использование теодолита для определения исходных масштабов на фотоснимке. Избежать эти трудности позволяет использование спутниковых снимков для района фотографирования. Проверка с помощью теодолитных замеров показала, что для этого могут использоваться сервисы Яндекс Карты или Google Maps так как они позволяют определять расстояние между точками непосредственно на снимке с достаточной степенью точности и в то же время легко доступны.

На рисунке 1 схематично приведен спутниковый снимок места съемки. Направление главной оптической оси дает пересечение диагоналей снимка, (рис. 2), точка 0. Это направление может быть, по характерным особенностям попавшей в кадр местности, привязано к спутниковому снимку, (рис. 1).

На этом рисунке точка 1 – это точка съёмки, 2 – дымовая труба. Угол между направлением на трубу и направлением распространения дымового факела должен быть известен (угол 1-2-0). Плоскость снимка перпендикулярна главной оптической оси.

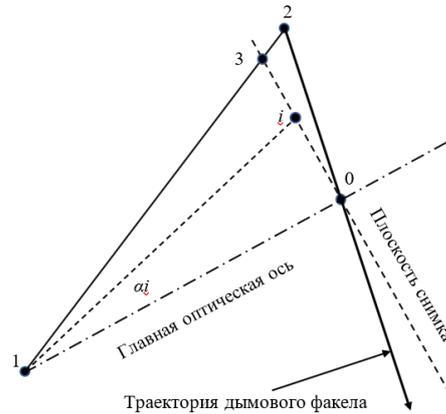


Рис. 1. Спутниковый снимок места съёмки *Fig.1 Satellite image of the shooting location*  
 \*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

На рисунке 2 приведена фотография дымового факела в полных границах снимка. По спутниковому снимку по характерным элементам местности определяем расстояние между точками 1 и 2 (обозначим его как  $L$ , м) и между точками 1 и 3 (обозначим его как  $mt$ , м), а также между точками 1 и 0 в метрах (обозначим его как  $L_0$ , м). Измеряем расстояние между точками 0 и 3 на фотоснимке, мм, рис. 2 (обозначим его как  $x$ ). Находим расстояние между точками 0 и 2 на спутниковом снимке, (обозначим его как  $mf$ ). Определяем расстояние между точками 0 и 3 на спутниковом снимке, м, рис. 1 (обозначим его как  $m$ ). Поделив одно на другое, получаем средний масштаб снимка на участке 0-3, м/мм. Обозначим его как  $ms_0$

$$ms_0 = m/x \quad (1)$$

где:  $m$  – расстояние между точками 0–3 на рис.1, м;  
 $x$  – расстояние между точками 0–3 на рис.2, мм.

В каждой точке фотографии разные масштабы. Например, средний масштаб на участке от точки  $i$  до точки 0 зависит от расстояния от этой точки до точки 0 (расстояние  $l(i)$  на рис.2).

Для того, чтобы рассчитать расстояния в перпендикулярной плоскости, нужно знать не только средние, но и местные масштабы в каждой точке.

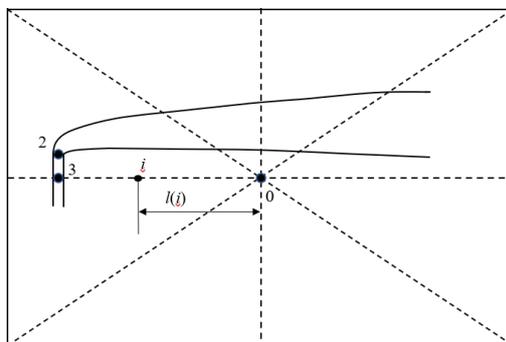


Рис. 2. Фотография дымового факела *Fig.2 Photo of a smoke plume*  
 \*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Поделим отрезок 0-3 на рис. 2 на достаточно большое количество одинаковых отрезков  $n$ . Тогда размер каждого отрезка будет  $d$ , м.

$$d = x/n, \quad (2)$$

где:  
 $n$  – количество отрезков одинаковой длины.

Длину текущего отрезка  $l(i-0)$  выразим как

$$l(i) = d \cdot i, \quad (3)$$

где:  $i$  изменяется от 1 до  $n$ .

Отношение текущего катета  $l(i)$  треугольника 1-3-0 к  $L_0$  обозначим как  $l_0(i)$

$$l_0(i) = l(i)/L_0. \quad (4)$$

Находим текущий угол  $\alpha i$ , рис. 1

$$\alpha i = \text{Arctg}(l_0(i)). \quad (5)$$

Находим текущий средний угловой масштаб  $ms(i)$  как

$$ms(i) = l(i)/\alpha i. \quad (6)$$

Находим текущую разность соседних углов  $\Delta \alpha i$

$$\Delta \alpha i = \alpha(i) - \alpha(i-1). \quad (7)$$

Находим текущий местный угловой масштаб  $mm(i)$  как

$$mm(i) = d/\Delta \alpha i. \quad (8)$$

Далее находим относительное расстояние от центра снимка

$$l_{\text{от}}(i) = l(i)/x \quad (9)$$

и относительное изменение среднего масштаба как отношение текущего среднего масштаба к масштабу на ближнем к точке 0 участке (на первом участке)

$$ms_{\text{от}}(i) = ms(i)/ms(1). \quad (10)$$

То же самое делается для местных масштабов

$$mm_{\text{от}}(i) = mm(i)/mm(1). \quad (11)$$

Для варианта  $L_0 = 2430$  м,  $x = 1040$  м и  $n = 30$  средние и местные относительные масштабы показаны на рис. 3.

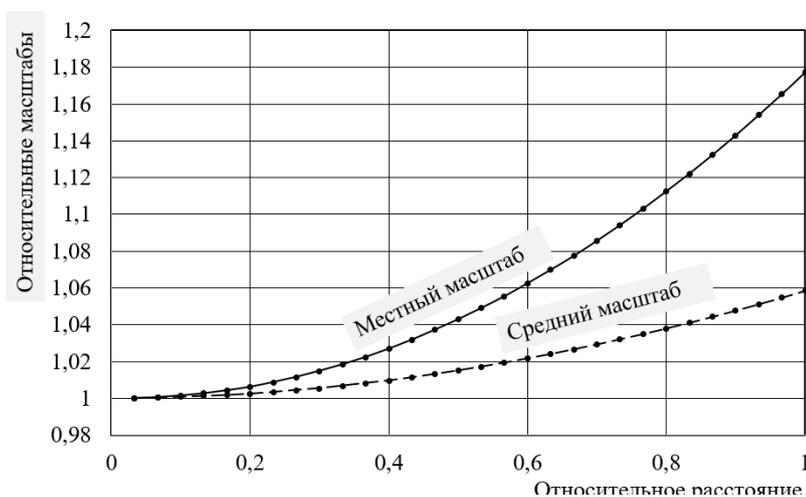


Рис. 3. Изменение текущих относительных масштабов Fig. 3. Change in current relative scales

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные зависимости аппроксимируем методом наименьших квадратов. В частности, для данного примера получено

$$ms_{OT}(i) = 0,0561 \cdot l_{OT}(i)^2 + 0,0028 \cdot l_{OT}(i) + 0,9997 \quad (12)$$

и

$$mm_{OT}(i) = 0,1828 \cdot l_{OT}(i)^2 - 0,0058 \cdot l_{OT}(i) + 1,0001. \quad (13)$$

В обоих случаях достоверность аппроксимации  $R^2 = 1$ .

Увеличение количества отрезков деления  $n$  от 20 до 30 позволило увеличить точность расчета масштабов на 0,2 %. Дальнейшее увеличение количества отрезков можно не делать, т.к. получаемое увеличение точности расчетов заведомо меньше погрешности визуального определения границ дымового факела.

Далее найдем масштабы снимка по вертикали, используя для этого известные размеры дымовой трубы, попавшей в кадр. Для этого необходимо разделить высоту дымовой трубы на достаточно большое количество участков. Из предварительного анализа установлено, что достаточно  $n = 30$ . При высоте дымовой трубы  $H = 150$  м длина каждого участка составит  $d_B = 5$  м. Дальнейшее увеличение их количества на точность расчёта практически не влияет.

Разделив высоту дымовой трубы на участки, составим расчетную схему для каждого участка и найдем текущее отношение противолежащего катета к прилежащему то есть отношение  $\frac{m_{Bi}}{L}$ . Затем найдем текущий угол  $\alpha_i$ , град., как

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{m_{Bi}}{L}\right).$$

Найдем текущий средний вертикальный угловой масштаб, м/град,  $M_i^{CB}$

$$M_i^{CB} = \frac{m_{Bi}}{\alpha_i}$$

Относительное изменение среднего вертикального углового масштаба определим как:

$$M_{OT}^{CB} = \frac{M_i^{CB}}{M_1^{CB}}.$$

Найдем разность углов соседних вертикальных участков как:

$$\Delta\alpha_{Bi} = \alpha_{Bi+1} - \alpha_{Bi}.$$

Текущий местный вертикальный угловой масштаб:

$$M_i^{MB} = \frac{d_B}{\Delta\alpha_{Bi}}.$$

Относительное изменение местного вертикального углового масштаба:

$$M_{OT}^{MB} = \frac{M_i^{MB}}{M_1^{MB}}.$$

Относительное расстояние по вертикальному участку:

$$l_{Vi} = \frac{n_i}{n} \cdot \quad (20)$$

Далее в таблице приведены результаты расчета каждого участка для вертикальной составляющей при  $L = 788$  м и  $h_B = 150$  м

Таблица 1  
Table 1

Вертикальная составляющая угловых масштабов  
The vertical component of angular scales

$n_i$	$m_{Vi}$	$\frac{m_{Vi}}{L}$	$\alpha_{Vi}$	$M_i^{CB}$	$M_{OT}^{CB}$	$\Delta\alpha_{Vi}$	$M_i^{MB}$	$M_{OT}^{MB}$	$l_{Vi}$
1	5	0,006	0,364	13,753	1,000	0,364	13,753	1,000	0,033
2	10	0,013	0,727	13,754	1,000	0,364	13,754	1,000	0,067
3	15	0,019	1,091	13,755	1,000	0,363	13,757	1,000	0,100
4	20	0,025	1,454	13,756	1,000	0,363	13,760	1,000	0,133
5	25	0,032	1,817	13,758	1,000	0,363	13,764	1,001	0,167
6	30	0,038	2,180	13,760	1,000	0,363	13,770	1,001	0,200
7	35	0,044	2,543	13,762	1,001	0,363	13,777	1,002	0,233
8	40	0,051	2,906	13,765	1,001	0,363	13,784	1,002	0,267
9	45	0,057	3,268	13,768	1,001	0,362	13,793	1,003	0,300
10	50	0,063	3,631	13,772	1,001	0,362	13,803	1,004	0,333
11	55	0,070	3,993	13,775	1,002	0,362	13,814	1,004	0,367
12	60	0,076	4,354	13,780	1,002	0,362	13,826	1,005	0,400
13	65	0,082	4,715	13,784	1,002	0,361	13,840	1,006	0,433
14	70	0,089	5,076	13,789	1,003	0,361	13,854	1,007	0,467
15	75	0,095	5,437	13,795	1,003	0,360	13,870	1,008	0,500
16	80	0,102	5,797	13,800	1,003	0,360	13,886	1,010	0,533
17	85	0,108	6,157	13,806	1,004	0,360	13,904	1,011	0,567
18	90	0,114	6,516	13,813	1,004	0,359	13,923	1,012	0,600
19	95	0,121	6,874	13,820	1,005	0,359	13,943	1,014	0,633
20	100	0,127	7,232	13,827	1,005	0,358	13,964	1,015	0,667
21	105	0,133	7,590	13,834	1,006	0,358	13,986	1,017	0,700
22	110	0,140	7,947	13,842	1,006	0,357	14,009	1,019	0,733
23	115	0,146	8,303	13,850	1,007	0,356	14,034	1,020	0,767
24	120	0,152	8,659	13,859	1,008	0,356	14,059	1,022	0,800
25	125	0,159	9,014	13,868	1,008	0,355	14,086	1,024	0,833
26	130	0,165	9,368	13,877	1,009	0,354	14,113	1,026	0,867
27	135	0,171	9,722	13,887	1,010	0,354	14,142	1,028	0,900
28	140	0,178	10,074	13,897	1,010	0,353	14,172	1,030	0,933
29	145	0,184	10,426	13,907	1,011	0,352	14,203	1,033	0,967
30	150	0,190	10,778	13,918	1,012	0,351	14,235	1,035	1,000

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные зависимости аппроксимируем методом наименьших квадратов. В частности, для данного примера получено

$$M_{OT}^{CB} = 0,0119(l_{Bi})^2 + 0,0001(l_{Bi}) + 0,9999$$

$$M_{OT}^{MB} = 0,0362(l_{Bi})^2 - 0,0012(l_{Bi}) + 1,0000$$

В обоих случаях достоверность аппроксимации  $R^2 = 1$ .

Далее могут иметь место два варианта расчета. Первый вариант, это когда дымовая труба в значительной своей части загорожена препятствиями или находится настолько далеко, что невозможно уверенно визуализировать наружные светофорные площадки (более 2 км), или неизвестны уровни светофорных площадок. И второй, когда расстояние до трубы составляет порядка 1 км, и когда видны светофорные площадки.

Рассмотрим первый вариант, (рис. 5). Нужно найти координаты точки 1 относительно дымовой трубы.

Если принять в уравнении (12)  $l_{OT}(i) = 1$ , то получим  $ms_{OT}(i) = 1,0586$ . Это означает, что средний масштаб на участке 0-3 в 1,0586 раза больше масштаба в центре снимка. Отсюда находим масштаб в центре снимка  $m_0$ , м/мм

$$m_0 = ms_0 / 1,0586. \quad (23)$$

Обозначим координаты рассчитываемой точки: абсцисса –  $x_1$  (отсчитывается от вертикальной средней линии снимка) и ордината –  $y_1$  (отсчитывается от горизонтальной средней линии снимка), рис. 5.

Находим относительное расстояние по формуле (9)  $l_{OT}(i)$ . Подставляем это значение в уравнение (12). Расстояние от центра до рассчитываемой точки по горизонтали по линии 0-3 на рис. 5 найдем как

$$L1 = x_1 \cdot m_0 \cdot ms_{OT}(i) \quad (24)$$

где  $m_0$  – средний исходный масштаб м/мм;

$x_1$  – расстояние по снимку, мм;

$L1$  – расстояние по горизонтали в натуре, м.

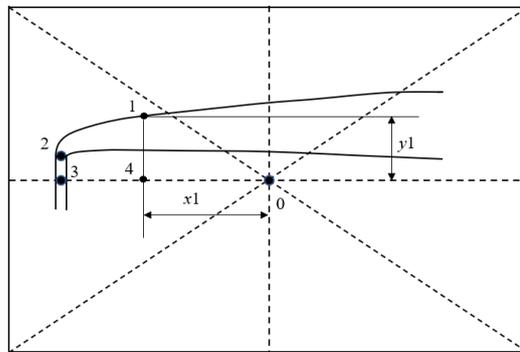


Рис. 5. Схема к определению координат точки *Fig. 5. The scheme for determining the coordinates of a point*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Учитываем, что нам нужны размеры не по линии 0-3, а по линии 0-2 на рис. 1, поэтому вводим поправку равную отношению  $mf/m$ . Если рассчитываемая точка располагается слева от средней вертикальной линии снимка, то расстояния должны увеличиваться и действительная ордината по направлению траектории факела будет равна

$$G1 = L1 \cdot mf / m. \quad (25)$$

Если рассчитываемая точка располагается справа от средней вертикальной линии снимка, то расстояния должны уменьшаться и действительная ордината по направлению траектории факела будет равна

$$G1 = L1 \cdot m / mf. \quad (26)$$

Далее находим относительное расстояние и средний масштаб по ординате и превышение данной точки над горизонтальной средней линией. Сначала находим местный масштаб в точке 4, рис. 5. Для этого найденное относительное расстояние  $l_{от}(i)$  подставляем в уравнение (13) и получаем  $mm_{от}(4)$ . Далее, зная расстояние  $y1$ , находим относительное расстояние для этого участка и, используя опять формулу для средних масштабов, находим  $L2$ , м

$$L2 = y1 \cdot m0 \cdot mm_{от}(4) \cdot ms_{от}(y1), \quad (27)$$

где  $m0$  – средний исходный масштаб м/мм;

$y1$  – расстояние по снимку, мм;

$W1$  – расстояние по вертикали в натуре, м;

$mm_{от}(4)$  – местный относительный масштаб в точке 4;

$ms_{от}(y1)$  – средний относительный масштаб на участке  $y1$ ;

Делаем пересчет с плоскости фотоснимка (по линии 3-0) на направление факела (линия 2-0 на рис. 2) по высоте.

$$W1 = L2 \cdot [1 + (L / mt - 1) \cdot x1 / m]. \quad (28)$$

Аналогично рассчитываем координаты устья трубы относительно точки 0. Вычисляя из координат устья координаты рассчитанной точки, находим координаты точки относительно устья.

Далее рассмотрим второй вариант, когда в качестве исходного можно использовать масштаб, определенный по известным размерам дымовой трубы. Для расчета траектории дымового факела должны быть: фотоснимок в полных границах с дымовой трубой в кадре, (рис. 6), и спутниковый снимок с планом места съемки.

Направление линии на карте проводится в соответствии с направлением средней линии на рисунке 6. по характерным координатам местности. Для простоты обработки подобных вычислений достаточно воспользоваться, например Microsoft Excel. На рисунке 7 показана начальная страница текста программы в Excel.

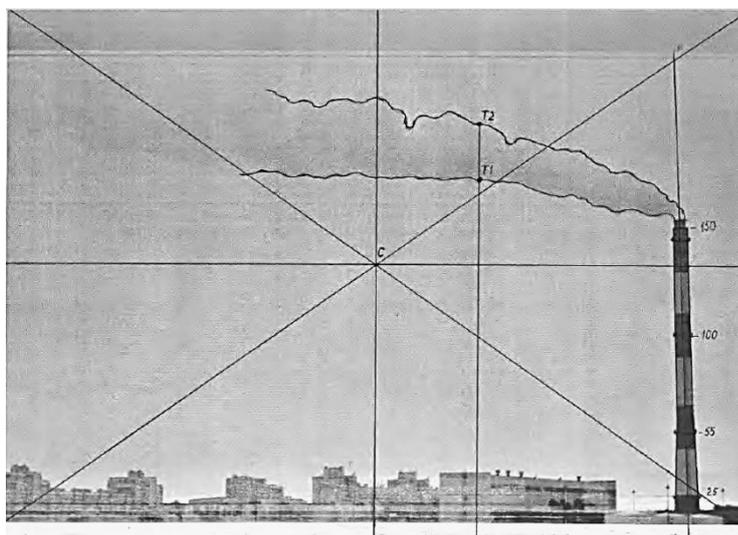


Рис. 6. Снимок траектории дымового факела с дымовой трубой в кадре  
Fig. 6. A snapshot of the trajectory of a smoke plume with a stack in the frame

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Результаты (Results)

Результатом реализации описанного алгоритма расчета стала программа, созданная в общедоступной среде Excel. Далее опишем порядок пользования и ввода исходных данных. На рис. 6 измеряем расстояние между устьем и нижней площадкой дымовой трубы. Уровень устья – 150 м, а нижней площадки 25 м. Получилось 106 мм. Вставляем это значение в ячейку С3, рис. 7. В ячейке С5 вычисляется средний масштаб по трубе на участке 25-150 м, который составляет 1,179 м/мм. Делаем первое приближение. Принимаем,

что такой же масштаб имеет место по всей трубе, тогда участок от 0 до 150 м будет занимать на снимке 127,2 мм. Это значение вычисляется в ячейке С7.

Далее по рисунку 2, (спутниковому снимку) определяем расстояние от точки съемки (точка 1) до дымовой трубы (точка 2). Это расстояние составляет 963 м. Заносим его в ячейку В10. В ячейку С10 вставляем высоту дымовой трубы, 150 м.

В ячейку D10 вставляем количество равных интервалов, на которые будем делить высоту дымовой трубы, чтобы определить, как изменяется угловой масштаб по вертикали от горизонта до устья трубы. Из предварительного анализа установлено, что достаточно иметь 30 отрезков. Дальнейшее увеличение их количества на точность расчетов практически не влияет. На рисунке 6 измеряем расстояние между устьем и нижней площадкой дымовой трубы. Уровень устья – 150 м, а нижней площадки 25 м. Получилось 106 мм. Вставляем это значение в ячейку С3, (рис. 7). В ячейке С5 вычисляется средний масштаб по трубе на участке 25-150 м, который составляет 1,179 м/мм.

▲	В	С	D	E	F	G	H	I	J	K	L	▲
1												
2		Участок трубы 25-150 м (125 м) на фотографии, мм										
3		106										
4		Средний масштаб по трубе на участке 25-150 м.; м/мм										
5		1,179245										
6		Первое приближение. Принимаем, что такой же масштаб имеет место по всей трубе, тогда участок от 0 до 150										
7		127,2										
8												
9	L, м	m, м	n		m/n, м, длина участка							
10	963	150	30		5					Вертикаль		
11												
12		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
13												
14		1	5	0,005192	0,297483	16,80767	1	0,297483204	16,80767	1	0,033333	
15		2	10	0,010384	0,59495	16,80812	1,000027	0,297467166	16,80858	1,000054	0,066667	
16		3	15	0,015576	0,892385	16,80888	1,000072	0,297435096	16,81039	1,000162	0,1	
17		4	20	0,020768	1,189772	16,80994	1,000135	0,297387003	16,81311	1,000323	0,133333	
18		5	25	0,025961	1,487095	16,8113	1,000216	0,297322903	16,81673	1,000539	0,166667	

Рис. 7. Начальная страница программы Fig. 7. The initial page of the calculation program

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

▲	F	G	H	I	J	K	L	M	▲
136	9,020892	16,91259	1,00833	0,386170051	17,17723	1,024108	0,76666667		
137	9,406237	16,92494	1,009066	0,385345408	17,21399	1,026299	0,8		
138	9,790726	16,9378	1,009832	0,384488658	17,25235	1,028586	0,83333333		
139	10,17433	16,95116	1,010629	0,383600251	17,29231	1,030968	0,86666667		
140	10,55701	16,96504	1,011456	0,382680653	17,33386	1,033446	0,9		
141	10,93874	16,97941	1,012313	0,381730341	17,37701	1,036018	0,93333333		
142	11,31949	16,99429	1,013201	0,380749804	17,42176	1,038686	0,96666667		
143	11,69923	17,00967	1,014118	0,379739545	17,46811	1,04145	1		
144									
145				Коэффициенты по трубе					
146			ms				mm		
147			$y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$				$y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$		
148			b	0,999985585			b	1,000000001	
149			c1	5,22238E-05			c1	-0,00080873	
150			c2	0,007993647			c2	0,02426176	
151			R2	0,999999347			R2	1	
152									
153									
154			ms - относительный средний масштаб						
155			mm - относительный местный масштаб						
156									
157			b, c1, c2 - коэффициенты квадратного трехчлена, которые вычисляются						
158			автоматически по данным столбцов 10, 6 и 9.						
159			R2 - показатель точности аппроксимации						
160			Если R-квадрат > 0,95, точность аппроксимации высокая						

Рис. 8. К алгоритму расчета Fig. 8. To the algorithm for calculating coefficients for scale

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Коэффициенты аппроксимации в двучленах вычислялись по процедуре =ИНДЕКС(ЛИНЕЙН(.....)), которая реализована в области Н-М:145-151, рис. 8. Из этих же ячеек значения коэффициентов берутся автоматически для дальнейшего расчета. В расчетные формулы вставляется интервал строк 46-75.

Результаты расчета коэффициентов приведены на рисунке 9.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
178									
179			Вертикаль (по трубе)						
180									
181			ms (средний масштаб)			mm (местный масштаб)			
182			$y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$			$y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$			
183			b	0,999986		b	1		
184			c1	5,22E-05		c1	-0,00081		
185			c2	0,007994		c2	0,024262		
186			R2	0,999999		R2	1		
	L	M	N	O	P	Q	R		
	Горизонталь								
	ms (средний масштаб)			mm (местный масштаб)					
	$y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$			$y=(c2*x^2)+(c1*x^1)+b$					
	b	0,99996739			b	1			
	c1	0,000161121			c1	-0,00143			
	c2	0,014003655			c2	0,042879			
	R2	0,99999801			R2	1			

Рис. 9. Результат расчета коэффициентов для масштабов

Fig. 9. The result of calculating the coefficients for the scales

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

После расчета масштабов координаты точек траектории определяются по методике, описанной формулами (23) – (28).

#### Обсуждение (Discussions)

Наличие известных размеров дымовой трубы и уровней светофорных площадок позволило провести тщательную проверку точности предлагаемой методики. В результате получено, что рассчитанные по фотографии уровни светофорных площадок отличались от размеров на строительных чертежах в пределах одного метра.

Сравнение расстояния с точки съемки до дымовой трубы по спутниковому снимку и с размером, определенным с помощью теодолита, показали их расхождение в пределах 10 м при расстояниях порядка 1000 м.

В качестве проверки были также введены координаты верхней части ж/б оболочки и верхней части диффузора. В результате должны были получить расстояние по горизонтали 0, уровень верхней части диффузора – 0, уровень верхней части ж/б оболочки дымовой трубы -4,7 м (высота диффузора Азинской дымовой трубы в Казани). Получили соответственно -0,007 м, -0,07 м и -4,09 м.

Ошибка в определении высоты диффузора составила 0,6 м. Таким образом при расчете фиксированных объектов методика позволят получить их координаты с расстояния примерно 1 км с точностью порядка 1 м. Однако при расчете траектории дымового факела вносится дополнительная погрешность при колебании направления ветра, что увеличивает погрешность в определении координат среднем до 2–3 м при длине траектории порядка 200–300 м.

#### Заключение (Conclusions)

В заключение можно отметить, что разработана новая, более простая, чем в [7] методика расчета траектории дымового факела по одиночному фотоснимку, требующая минимальный набор исходных данных и минимального набора экспериментального оборудования, реализованная в общедоступной вычислительной среде и позволяющая получить результат с приемлемой для задач, связанных с метеорологией, точностью.

Эксперименты по определению траектории дымового факела по данной методике можно проводить при любой погоде и в любое время суток. Единственным условием является хорошая видимость дымового факела. На рис. 10 приведена фотография, сделанная в ночное время 9 января 2023 г. при устойчивом состоянии атмосферы и температуре наружного воздуха –31 °С.



Рис. 10. Траектории дымового факела в ночное время *Fig. 10. Trajectories of a smoke plume at night*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

### Литература

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 446 с.
2. Humphreys J. The rise of plumes of the South African Hing // *Atmospheric Environment*, 1973; Vol. 7, №11. pp. 1071-1077.
3. Bringfelt B. Plume rise measurements at industrial chimneys // *Atmospheric Environment*, 1968; Vol. 2, №6. pp. 575-598.
4. Буров М.И., Елисеев В.С., Новаковский Б.А. Стереофотограмметрический метод исследования атмосферной диффузии // *Труды ГГО*. 1969, вып. 238, с. 77–85.
5. Руководство по аэрофотосъемке в картографических целях (РАФ-89) / Военно-топографическое управление генерального штаба, редакционно-издательский отдел / Отв. редактор А.И. Лосев. 1989. 105 с.
6. Елисеев В.С. К вопросу о фотографировании дымовых струй от промышленных источников // *Труды ГГО*. 1969, вып. 238, с. 86 – 95.
7. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Грибков А.М. Определение траектории дымового факела ТЭС по одиночному фотоснимку // *Труды МЭИ*. 1983, вып. 620, с. 6 –74.
8. D. Bruce Turner. *Practical Guide to Atmospheric Dispersion Modeling*. Chapel Hill: Trinity Consultants, Incorporated, 2007, 408 p.
9. Куфтырев К.А., Королев Д.В. Исследование процесса ассимиляции атмосферой токсичных компонентов дымовых газов котла // *Проблемы региональной экологии*. 2014. № 4. с. 131-136.
10. Грибков А.М., Чичирова Н.Д., Федоренков Д.И. Моделирование начального участка дымового факела от четырехствольной трубы ТЭС // *Теплоэнергетика*. 2020. № 10. с. 48-57.
11. Верховина Е.В., Сафаров А.С., Макухин В.Л. и др. Моделирование переноса выбросов твёрдых взвесей предприятиями теплоэнергетики на центральную экологическую зону байкальской природной территории // *Вода: химия и экология*. 2017. № 11-12 (113). с. 20-27.
12. Епифанов П.А., Карпова И.Е. Прогноз теплового состояния корабельных конструкций, находящихся в зоне действия газового факела корабельной энергетической установки // *Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова*. 2012. № 68(352). с. 65-68.
13. Леженин А.А., Рапута В.Ф., Ярославцева Т.В. Экспериментальные и численные исследования процессов распространения примесей от высотных источников // “Марчуковские научные чтения – 2019”: Тезисы Международной конференции, Новосибирск, 01–05 июля 2019 года. Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2019. – С. 72.
14. Рапута В.Ф., Леженин А.А., Амикишиева Р.А. и др. Оценки высоты подъема и потока плавучести дымовых шлейфов от высотных труб ТЭС по спутниковой информации // *Оптика атмосферы и океана*. 2023. Т. 36, № 6(413). с. 482-486.

15. Внуков А.К., Розанова Ф.А. Влияние высотного ветрового режима на рассеивание выбросов // Теплоэнергетика. 1991. № 4. с. 29-31.

16. Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. с. 131-145.

#### Авторы публикации:

**Грибков Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.  
<https://orcid.org/0000-0002-6805-2451>

**Чичирова Наталья Дмитриевна** – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные и тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

**Мирсалихов Кирилл Маратович** – аспирант, Казанский государственный энергетический университет. <https://orcid.org/0000-0002-3755-3827>

#### References

1. Berlyand ME. *Sovremennye problemy atmosfernoï diffuzii i zagryazneniya atmosfery*. Leningrad.: Gidrometeoizdat, 1975. (In Russ).

2. Humphereys J. The rise of plumes of the South African Hing. *Atmospheric Environment*, 1973;7(11):1071-77. doi: 10.1016/0004-6981(73)90216-3.

3. Bringfelt B. Plume rise measurements at industrial chimneys. *Atmospheric Environment*, 1968;2(6): 575-598. doi: 10.1016/0004-6981(68)90065-6.

4. Burov MI., Eliseev VS., Novakovskii BA. Stereofotogrammetricheskii metod issledovaniya atmosfernoï diffuzii. *Trudy GGO*. 1969; 238: 77-85. (In Russ).

5. Losev AI. editor *Rukovodstvo po aerofotos"emke v kartograficheskikh tselyakh (RAF-89)*. Voenno-topograficheskoe upravlenie general'nogo shtaba, redaktsionno-izdatel'skii otdel. 1989. (In Russ).

6. Eliseev VS. K voprosu o fotografirovaniï dymovykh strui ot promyshlennykh istochnikov. *Trudy GGO*. 1969; 238: 86 – 95. (In Russ).

7. Volkov EP., Gavrilov EI., Gribkov AM., et al. Opredelenie traektorii dymovogo fakela TES po odinochnomu fotosnimku. *Trudy MEI*. 1983; 620: 63 – 74. (In Russ).

8. D. Bruce Turner. *Practical Guide to Atmospheric Dispersion Modeling*. Chapel Hill: Trinity Consultants, Incorporated, 2007, 408 p.

9. Kuftyrev KA., Korolev DV. The study of the process of assimilation of toxic components of the boiler flue gas in the atmosphere. *Regional Environmental Issues*. 2014; 4: 131-136. (In Russ).

10. Gribkov AM., Chichirova ND., Fedorenkov DI. Modelling of the Initial Part of a Smoke Plume from a Four-Flue Stack at a Thermal Power Station. *Thermal Engineering*. 2020; 67(10):724-732. (In Russ). doi 10.1134/S0040601520100043. – EDN LQCCAZ.

11. Verkhozina EV., Safarov AS., Makukhin VL. et al. Modeling emissions of solid particles in thermal power companies central ecological zone of the Baikal natural territory. *Water: chemistry and ecology*. 2017; 11-12(113): 20-27. (In Russ).

12. Epifanov, PA, Karpova IE. Prognoz teplovogo sostoyaniya korabel'nykh konstruksii, nakhodyashchikhsya v zone deistviya gazovogo fakela korabel'noi energeticheskoi ustanovki. *Trudy Tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. akademika A.N. Krylova*. 2012; 68(352): 65-68. (In Russ).

13. Lezhenin, AA., Raputa VF. Eksperimental'nye i chislennye issledovaniya protsessov rasprostraneniya primesei ot vysotnykh istochnikov In Yaroslavtseva TV. *"Marchukovskie nauchnye chteniya - 2019"*; 01–05 Jul 2019; Novosibirsk: Novosibirskii natsional'nyi issledovatel'skii gosudarstvennyi universitet, 2019. – p. 72. (In Russ).

14. Raputa VF., Lezhenin AA., Amikishieva RA. Estimates of the Height of Rise and Buoyancy of Smoke Plumes from High Chimneys of Thermal Power Plants from Satellite Information. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2023; 36(6): 785–789.

15. Vnukov AK., Rozanova FA. Vliyanie vysotnogo vetrovogo rezhima na rasseivanie vybrosov. *Teploenergetika*. 1991; 4:29-31. (In Russ).

16. Mirsalikhov KM., Gribkov AM., Chichirova ND. Analysis of methods for selection of optimal parameters of stack. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):131-145. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-131-145>.

**Authors of the publication**

*Aleksandr M. Gribkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.*

*Kirill M. Mirsalikhov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.*

*Natalia D. Chichirova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.*

*Шифр научной специальности: 2.4.5 Энергетические системы и комплексы.*

**Получено** **15.05.2024 г.**

**Отредактировано** **17.05.2024 г.**

**Принято** **24.05.2024 г.**

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 536.24

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-3-146-155

## ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПОРИСТОМ СЛОЕ ПРИ «БЕСКОНЕЧНОМ» НАГРЕВЕ С ОТТОКОМ ТЕПЛОТЫ

Якимов Н.Д.<sup>1</sup>, Шагеев А.Ф.<sup>2</sup>, Дмитриев А.В.<sup>1</sup>, Мутугуллина И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет,  
г. Казань, Россия

<sup>2</sup>КФУ, Институт геологии и нефтегазовых технологий / Научный центр мирового  
уровня Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты (головной  
центр) / НИЛ методов увеличения нефтеотдачи, г. Казань, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-0253-3762>, [nyakimov@inbox.ru](mailto:nyakimov@inbox.ru)

<https://orcid.org/0009-0002-2852-9021>, [shageevalbert@rambler.ru](mailto:shageevalbert@rambler.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, [ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0009-1950-5002>, [vedgaeva@gmail.com](mailto:vedgaeva@gmail.com)

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В данной статье предлагается математическая модель для расчета температурного поля в кольцевом пористом слое внутрискважинного реактора при непрерывном разогреве призабойной зоны, содержащей высоковязкую нефть (ВВН) и природный битум (ПБ). Процесс нагрева считается бесконечным. *ЦЕЛЬ.* Для решения данной задачи необходимо использовать предложенную математическую модель. Получить профиль температуры в пористом слое при постоянном нагреве с оттоком теплоты. *МЕТОДЫ.* Уравнения математической модели построены на основе законов сохранения энергии и массы, для их исследования и оценки применяются аналитические методы теории дифференциальных уравнений, методы теории подобия и размерностей, а также численные методы решения краевых задач. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В ходе исследования были обнаружены зависимости расстояния, на котором достигается заданная температура в реакторе, прямо пропорционально массовому расходу, линейной плотности теплового потока и теплоемкости смеси. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Математическая модель показывает, как изменяется температура в кольцевом пористом слое внутри реактора при бесконечном нагреве и оттоке тепла.

**Ключевые слова:** пористый слой; температурное поле; бесконечный нагрев; высоковязкая нефть; внутрискважинный реактор

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору № 075-15-2022-299 в рамках программы развития Научного центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

**Для цитирования:** Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Мутугуллина И.А. Температурное поле в цилиндрическом пористом слое при «бесконечном» нагреве с оттоком теплоты // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 146-155. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-146-155.

## TEMPERATURE FIELD IN A CYLINDRICAL POROUS LAYER UNDER «INFINITE» HEATING WITH HEAT OUTFLOW

Yakimov N.D.<sup>1</sup>, Shageev A.F.<sup>2</sup>, Dmitriev A.V.<sup>1</sup>, Mutugullina I.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Development and Exploitation of deposits of hard-to-recover hydrocarbons of KFU,  
Institute of Geology and Oil and Gas Technologies / World-class Scientific Center for

**Rational Development of liquid Hydrocarbon reserves of the planet (head center) /**

**NIL methods of increasing oil recovery, Kazan, Russia**

<https://orcid.org/0000-0002-0253-3762>, [nyakimov@inbox.ru](mailto:nyakimov@inbox.ru)

<https://orcid.org/0009-0002-2852-9021>, [shageevalbert@rambler.ru](mailto:shageevalbert@rambler.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, [ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0009-1950-5002>, [vedgaeva@gmail.com](mailto:vedgaeva@gmail.com)

*Abstract: RELEVANCE. This article proposes a mathematical model for calculating the temperature field in the annular porous layer of an downhole reactor during continuous heating of a bottomhole zone containing high-viscosity oil (VVN) and natural bitumen (PB). The heating process is considered endless. purpose. OBJECT. To solve this problem, it is necessary to use the proposed mathematical model. To obtain a temperature profile in a porous layer under constant heating with heat outflow. METHODS. The equations of the mathematical model are based on the laws of conservation of energy and mass, analytical methods of the theory of differential equations, methods of the theory of similarity and dimensions, as well as numerical methods for solving boundary value problems are used for their study and evaluation. RESULTS. During the study, the dependences of the distance at which the set temperature in the reactor is reached were found to be directly proportional to the mass flow rate, the linear density of the heat flux and the heat capacity of the mixture. CONCLUSION. The mathematical model shows how the temperature in the annular porous layer inside the reactor changes with endless heating and heat outflow.*

**Keywords:** porous layer; temperature field; endless heating; high viscosity oil; downhole reactor

**For citation:** Yakimov N.D., Shageev A.F., Dmitriev A.V., Mutugullina I.A. Temperature field in a cylindrical porous layer during “endless” heating with heat outflow. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (3): 146-155. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-146-155.

***Введение и Литературный обзор (Introduction)***

В данной статье цель исследования заключается в нахождении решения профиля температуры поля в кольцевом пористом слое внутрискважинного реактора при непрерывном разогреве призабойной зоны, содержащей высоковязкую нефть (ВВН) и природный битум (ПБ).

Для этого предлагается использовать математическую модель. Уравнения математической модели построены на основе законов сохранения энергии и массы, для их исследования и оценки применяются аналитические методы теории дифференциальных уравнений, методы теории подобия и размерностей, а также численные методы решения краевых задач.

Научная значимость исследования заключается в получении распределения температур в проточной области внутрискважинного реактора при условии оттока теплоты от цилиндрической стенки. Зависимости получены в безразмерном виде.

Практическая значимость исследования заключается в том, что на основе полученных зависимостей можно рассчитать геометрические размеры внутрискважинного реактора в зависимости от характеристик и размеров нагревателя, а также от условий отвода теплоты от его стенок.

Проблема повышения эффективности добычи нефти является одной из наиболее весомых и дискутируемых в нефтедобывающих странах мира на протяжении многих десятков лет. Важность этой проблемы для России была неоднократно подтверждена исследованиями, прогнозами и решениями государственных органов. Однако, несмотря на это, достигнутые результаты пока не соответствуют важности этой темы для нефтяной отрасли. [1].

Нефтяные компании по всему миру уделяют повышенное внимание разработке новых и совершенствованию существующих методов добычи высоковязкой нефти. На сегодняшний день не существует альтернативы для разработки нефтегазовых месторождений с высоковязкой нефтью. Работа [2] посвящена изучению методов повышения нефтеотдачи пластов с высоковязкой нефтью. Авторы анализируют преимущества и недостатки используемых технологий и дают им оценку.

Использование новых энергосберегающих и экологически чистых технологий позволит повысить уровень добычи нефти в России. Для определения эффективности

методов поддержания пластовой температуры на небольших залежах высоковязкой нефти, авторы используют математическое моделирование. [3]. Для повышения эффективности поддержания пластовой температуры и экономии тепловой энергии рекомендуется теплоизолировать все элементы системы поддержания пластового давления и пластовой температуры. [3].

Одним из основных термических методов, используемых в настоящее время специалистами отрасли, является впрыск горячего агента. В статье [4] представлены результаты термического воздействия для условий формирования СЗ Красноярского месторождения.

По мнению авторов, если снижение дебита скважины вызвано локальным повышением вязкости нефти и (или) незначительными отложениями смолисто-парафиновых нефтяных отложений на стенках скважины или на поверхностях горных пород, термообработка призабойной зоны скважины будет достаточно эффективной для повышения производительности из колодца [5].

Для нахождения температурного поля целесообразно использовать аналитические и численные методы исследования.

Температурное поле в скважине было построено на основе «в среднем точного» решения [6]. Это решение позволяет изучать проблемы подземной термодинамики, тепло- и массообмена. Предложенный модифицированный асимптотический метод гарантирует, что решение осредненной задачи для остаточного члена обращается в нуль.

В работе [7] рассматривается задача нестационарного теплообмена при отборе флюида из слоисто-неоднородного ортотропного пористого пласта. Пласт состоит из трех слоев, разделенных плоскими границами. Формулируется постановка задачи, и исследуются свойства решения. Задача нестационарного теплообмена в слоисто-неоднородном ортотропном пористом пласте описывается уравнениями теплопроводности в каждом слое, а также уравнением конвективной теплопроводности с источниками, которые обусловлены нестационарными полями давления в режиме упругого течения.

Аналитическое моделирование методом Пуанкаре ламинарной термогравитационной конвекции в вертикальном пористом цилиндре радиуса  $R$  и высоты  $H$  ( $R$  много меньше  $H$ ) со слабосжимаемой жидкостью рассмотрено авторами [8]. Результатом исследований являются асимптотические представления полей температуры, скорости и концентрации в пористом слое в критериальном виде.

В статье [9] представлены результаты лабораторных и численных экспериментов по исследованию теплоотдачи в оболочковом пористом сетчатом материале. Расхождение между экспериментальными данными и расчетной зависимостью для внутренней теплоотдачи по объемной теплоотдаче при малых числах Рейнольдса объясняется влиянием теплопроводности охлаждающего газа на температурное поле.

Для расчета коэффициентов теплопроводности и температурных полей в структурированных системах предлагается новый численный метод в работе [10]. Он позволяет описывать процессы теплопроводности при деформации и преобразовании структуры системы. Расчеты производились для системы, состоящей из песка, воды и воздуха и для органоминеральной системы.

В работе [11] был проведен теоретический анализ конвективной неустойчивости, обусловленной выталкивающими силами при нестационарных температурных полях в кольцевой пористой среде, ограниченной коаксиальными вертикальными. Закон Дарси и приближение Буссинеска используются для объяснения характеристик движения жидкости, а теория линейной устойчивости используется для прогнозирования начала движения, обусловленного плавучестью. Уравнения устойчивости преобразуются в систему обыкновенных дифференциальных уравнений, используя метод спектрального разложения, и решаются аналитически и численно. Критическое число Дарси-Рэлея определяется как функция отношения радиусов. Критическое время начала движения становится меньше с увеличением числа Дарси-Рэлея и соответствует асимптотическому соотношению, полученному в бесконечном горизонтальном пористом слое.

Исследование течения свободной конвекции и теплопередачи неньютоновской жидкости с псевдопластичным поведением в цилиндрической вертикальной полости, частично заполненной слоем пористой среды рассматривается в работе [12]. Результаты, полученные в ходе численного решения уравнений методом конечных элементов, хорошо согласуются с литературными данными. При увеличении пористого слоя с 0,6 до 0,8 среднее число Нуссельта увеличилось с 0,15 до 0,25. Увеличение неньютоновских эффектов увеличивает скорость теплопередачи.

В статье [13] представлено аналитическое исследование двойной диффузионной естественной конвекции в цилиндрических пористых кольцах и прямоугольные пористые корпуса, которые обрабатываются унифицированным образом с использованием параметра кривизны, насыщаются бинарной жидкостью в предположении локальной тепловой неравновесности. Результаты модели получены при бесконечном значении отношения пористости и теплопроводности, как частный случай настоящей модели. Из проведенного исследования следует, что неглубокое пористое кольцевое пространство и высокий прямоугольный корпус лучше всего подходят для проектирования систем отвода и аккумулирования тепла соответственно.

В работе [14] исследовано основное стационарное выталкивающее течение в вертикальном кольцевом пористом канале, вызванное разницей температур на границе. Линейная динамика возмущенного потока формулируется как задача на собственные значения, решаемая численно. Показано, что система становится все более нестабильной по мере увеличения соотношения сторон, при этом критическое число Рэлея падает до нуля, когда соотношение сторон стремится к бесконечности.

Термогидравлическая аналитическая модель капиллярной цилиндрической тепловой трубы в стационарном режиме предложена в [15]. Представленная модель представляет собой обобщение аналитических моделей стандартной тепловой трубы в качестве инструмента проектирования или оптимизации.

Численное исследование достоверности модели локального теплового равновесия для свободной конвекции над горизонтальным цилиндром, помещенным в бесконечно уплотненный слой сферических частиц, насыщенных ньютоновской жидкостью, рассматривалось в работе [16].

В статье [17] представлено численное исследование естественной конвекции в пористом слое Недарси, окруженном двумя горизонтальными поверхностями, имеющими синусоидальные температурные профили с разницей в фазе и волновом числе.

Конвективный теплообмен от цилиндров, погруженных в пористую среду, важен для многих инженерных приложений. В работе [18] численно исследуется поле течения и теплообмен вокруг цилиндра, погруженного в слой однородной пористой среды. Для моделирования явлений переноса внутри пористого слоя используются усредненные по объему уравнения, а в прозрачной области применяются законы сохранения массы, импульса, энергии. Проведено комплексное параметрическое исследование и изучено влияние нескольких параметров, таких как толщина и проницаемость пористого слоя, а также числа Дарси и Рейнольдса, на поле течения и характеристики теплопередачи. Наконец, проводится процесс оптимизации, чтобы определить оптимальную толщину и пористость пористого слоя, что приводит к минимальной теплопередаче от цилиндра. Численные результаты показывают, что при наличии пористого слоя вокруг цилиндра длина следа увеличивается с уменьшением числа Дарси, а критический радиус изоляции увеличивается.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Ранее авторами были получены зависимости расстояния  $\Delta x$ , мм, при котором достигается заданная температура воздуха в реакторе при различных значениях массового расхода  $G$ , кг/с, линейной плотности теплового потока  $q_l$ , Вт/м, и теплоемкости смеси  $c_f$  Дж/(кг·°C) (1) и (2) [19]. Изначально в исследовании были приняты следующие значения: массового расхода  $G = 0,00139$  кг/с, линейной плотности теплового потока  $q_l = 1250$  Вт/м, и теплоемкости смеси  $c_f = 736,2$  Дж/(кг·°C):

$$t(x, r) = t_0 + \frac{K}{4} \left[ (r^2 - r_0^2) - 2 \frac{q_{l0} \cdot r_b^2 - q_{lb} \cdot r_0^2}{q_{l0} - q_{lb}} \ln \frac{r}{r_0} + \frac{4a^*}{w} x \right], \quad (1)$$

$$\Delta x = \frac{G \cdot c_f}{q_l} (t_n - t_0). \quad (2)$$

В данной постановке нагрев внутренней поверхности происходит по всей внутренней границе скважины, на бесконечной длине. Соответственно, температура, в том числе на самой этой границе, растёт равномерно по всей длине и приращение температуры, как показано в (1), пропорционально длине участка. На практике нагрев может происходить лишь на конечном участке, и более реальной была бы, например, постановка, где нагрев (подача тепла с линейной плотностью теплового потока  $q_l$ ) происходит лишь при  $x > 0$ . При этом температура около точки  $x = 0$  будет меняться уже неравномерно. Следует

ожидать, что и в таком решении с ростом  $x$  характер распределения температур будет выравниваться и приближаться к рассмотренному в (1), и будет близок к нему уже на расстоянии нескольких толщин слоя  $r_b - r_0$ , по аналогии с принципом Сен-Венана в сопроамате и теории упругости, но как бы с некоторым небольшим сдвигом, как бы для немного другого значения  $t_0$ . Поэтому формула (2) является верной и для такой постановки, но лишь при достаточно больших длинах участка.

В варианте постановки с теплоизолированной внешней границей имеется один существенный безразмерный параметр  $\frac{r_b}{r_0}$ . На первый взгляд кажется, что в рассматриваемой здесь постановке с оттоком теплоты через внешнюю границу должен добавиться ещё параметр, связанный с интенсивностью этого оттока, например,  $\frac{q_{lb}}{q_{l0}}$ . На самом деле это не совсем так, что нетрудно понять после следующего несложного рассуждения.

Пусть имеется решение для теплоизолированной внешней границы радиуса  $\bar{r}_b$  (3):

$$t(x, r) = t_0 + \frac{K}{4} \left[ (r^2 - r_0^2) - 2 \frac{q_{l0} \cdot r_b^2 - q_{lb} \cdot r_0^2}{q_{l0} - q_{lb}} \ln \frac{r}{r_0} + \frac{4a^*}{w} x \right], \quad (3)$$

Если рассмотреть концентрическую цилиндрическую поверхность некоторого радиуса  $r_b$ , внутри области  $r_0 < r_b < \bar{r}_b$ , то на ней будет  $\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r_b} < 0$  переток теплоты через эту поверхность. То есть её можно считать границей области  $r_0 \leq r \leq r_b$ , в которой эта же функция  $t(x, r)$  даёт решение задачи с оттоком теплоты. Значит, одна и та же функция  $t(x, r)$  даёт решения задач с разными значениями оттока  $+q_{lb}$  теплоты через внешнюю границу  $0 \leq q_{lb} < q_{l0}$ , в зависимости от выбора радиуса  $r_b$  внешней границы. Остальные исходные данные в постановках, конечно, одинаковы, включая  $W$ , но не  $G$ .

Остаётся убедиться, что это соответствует построенным формулам решения, для чего найти конкретное выражение связи между  $\bar{r}_b$ ,  $r_b$  и  $q_{lb}$ .

Следовательно, будем сначала рассматривать температурное поле в области с теплоизолированной внешней границей радиуса  $\bar{r}_b$ , которое согласно (3) после подстановки  $q_{lb} = 0$ , будет иметь вид:

$$t(x, r) = t_0 + \frac{K}{4} \left[ (r^2 - r_0^2) - 2 \bar{r}_b^2 \ln \frac{r}{r_0} + \frac{4a^*}{w} x \right], \quad 0 \leq r \leq \bar{r}_b \quad (4)$$

$$K = \frac{q_{l0}}{\pi \lambda^* (\bar{r}_b^2 - r_0^2)}.$$

На цилиндрической поверхности какого-то меньшего радиуса  $r_b$  будет иметь место

ненулевая производная  $\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=r_b} = \frac{K}{2} \left( r_b - \frac{\bar{r}_b^2}{r_b} \right)$ , или после подстановки  $K$  получаем

$$2\pi r_b \lambda^* \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=r_b} = \frac{q_{l0}}{\bar{r}_b^2 - r_0^2} (r_b^2 - \bar{r}_b^2).$$

Учитывая, что линейная плотность  $q_{lb}$  теплового потока через эту поверхность радиуса  $r_b$  равна  $q_{lb} = -2\pi r_b \lambda^* \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_b}$ , получили искомую связь  $\bar{r}_b$ ,  $r_b$  и  $q_{lb}$

$$q_{lb} = q_{l0} \frac{\bar{r}_b^2 - r_b^2}{\bar{r}_b^2 - r_0^2}. \quad (5)$$

Теперь для записи решения задачи с заданной линейной плотностью  $q_{lb}$  оттока теплоты через внешнюю границу радиуса  $r_b$  можно использовать температурное поле (4), хотя оно было получено, казалось бы, для другой постановки, если туда подставить параметр  $\bar{r}_b$ , найденный из (5), (и, конечно, считать  $0 \leq r \leq r_b$ ).

Разумеется, такую подстановку надо выполнить заранее. Для этого преобразуем (5):

$$1 - \frac{q_{lb}}{q_{l0}} = 1 - \frac{\bar{r}_b^2 - r_b^2}{\bar{r}_b^2 - r_0^2}, \text{ или } \frac{q_{l0} - q_{lb}}{q_{l0}} = \frac{r_b^2 - r_0^2}{\bar{r}_b^2 - r_0^2}, \text{ то есть}$$

$$\frac{q_{l0}}{\bar{r}_b^2 - r_0^2} = \frac{q_{l0} - q_{lb}}{r_b^2 - r_0^2}. \quad (6)$$

Выражение (6) можно подставить в  $K$  в (4), исключая  $\bar{r}_b$ . Остаётся заменить  $\bar{r}_b^2$  перед  $\ln$  в квадратных скобках. Выразим  $\bar{r}_b^2$ , например, из (6)

$$\bar{r}_b^2 = r_0^2 + q_{l0} \frac{r_b^2 - r_0^2}{q_{l0} - q_{lb}}, \text{ или}$$

$$\bar{r}_b^2 = \frac{q_{l0} r_b^2 - q_{lb} r_0^2}{q_{l0} - q_{lb}}. \quad (7)$$

Убеждаемся, что эти подстановки, действительно, переводят (4) в (3) (с учётом изменения области  $0 \leq r \leq r_b$ ).

После ввода безразмерных переменных

$$Z = \left( \frac{r}{r_0} \right)^2, \quad X = \frac{4a^* x}{wr_0 r_0}, \quad T = \frac{(t - t_0) \cdot \lambda^*}{q_{l0}},$$

$$B = \frac{q_{l0} \cdot r_b^2 - q_{lb} \cdot r_0^2}{(q_{l0} - q_{lb}) \cdot r_0^2} \quad (8)$$

в уравнение (3) получаем

$$\frac{(t(x, r) - t_0) \cdot \lambda^*}{q_{l0}} = \frac{r_0^2 \cdot (q_{l0} - q_{lb})}{4\pi q_{l0} \cdot (r_b^2 - r_0^2)} \left( \frac{r^2}{r_0^2} - 1 - 2 \frac{q_{l0} r_b^2 - q_{lb} r_0^2}{(q_{l0} - q_{lb}) \cdot r_0^2} \ln \frac{r}{r_0} + \frac{4a^*}{wr_0^2} x \right)$$

с учётом

$$\frac{r_0^2 \cdot (q_{l0} - q_{lb})}{(r_b^2 - r_0^2) \cdot q_{l0}} = \frac{1}{\frac{r_b^2 \cdot q_{l0} - r_0^2 \cdot q_{l0} + r_0^2 \cdot q_{lb} - r_0^2 \cdot q_{lb}}{r_0^2 \cdot (q_{l0} - q_{lb})}} = \frac{1}{\frac{r_b^2 \cdot q_{l0} - r_0^2 \cdot q_{lb}}{r_0^2 \cdot (q_{l0} - q_{lb})} - 1}$$

переходит в

$$T(X, Z) = \frac{1}{4\pi(B-1)}(X + Z - 1 - B \ln Z), \quad 1 \leq Z \leq Z_b, \quad (9)$$

где  $Z_b = \left(\frac{r_b}{r_0}\right)^2$ .

**Результаты и обсуждение (Results and Discussions)**

Видно, что хотя в исходной постановке было 8 определяющих параметров  $r_0, r_b, q_{10}, q_{1b}, \omega, \lambda^*, \rho_f, c_f$ , в выражение (9) для безразмерной функции  $T(X, Z)$ , описывающей решение, входит лишь один безразмерный параметр  $B$  (критерий подобия). Но имеется и второй  $Z_b$ , который, однако, лишь ограничивает область определения этой функции. А критерий  $B$  здесь характеризует размер соответствующей данной функции области с теплоизолированной внешней границей, то есть с максимальным радиусом  $\bar{r}_b$ ,

поскольку согласно (7)  $B = \left(\frac{\bar{r}_b}{r_0}\right)^2$ .

На рисунках 1, 2 и 3 представлен примерный вид решения с различными переменными  $B$ .

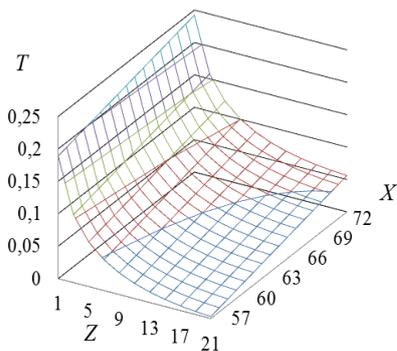


Рис. 1. Зависимость температуры  $T$  от безразмерного параметра  $X$  при критерии  $B=25$  [составлено автором]

Fig. 1. Dependence of temperature  $T$  on the dimensionless parameter  $X$  with criterion  $B=25$  [compiled by the author]

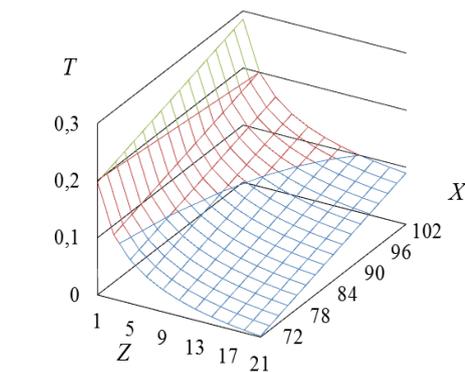


Рис. 2. Зависимость температуры  $T$  от безразмерного параметра  $X$  при критерии  $B=30$  [составлено автором]

Fig. 2. Dependence of temperature  $T$  on the dimensionless parameter  $X$  with criterion  $B=30$  [compiled by the author]

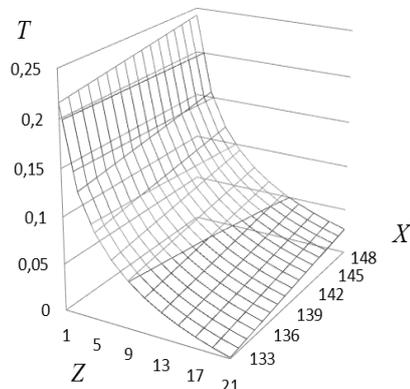


Рис. 3. Зависимость температуры  $T$  от безразмерного параметра  $X$  при критерии  $B=50$  [составлено автором]

Fig. 3. Dependence of temperature  $T$  on the dimensionless parameter  $X$  with criterion  $B=50$  [compiled by the author]

### **Заключение (Conclusion)**

Исследования посвящены созданию математической модели расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве во внутрискважинном реакторе непрерывного разогрева призабойной зоны пласта, содержащий высоковязкую нефть и природный битум (ВВН и ПБ).

При 8 исходных параметрах  $r_0, r_b, q_{l0}, q_{lb}, w, \lambda^*, \rho_f, c_f$  в первоначальной постановке после перехода к безразмерной форме решения в нём фигурирует один параметр  $B$  и ещё один  $Z_b$  задаёт область определения функции, описывающей решение.

При проведении расчетов температурное поле будет таким же, как для теплоизолированной внешней поверхности, только «обрезанным».

Математическая модель учитывает теплообмен между стенкой внутрискважинного реактора и окружающей средой. В статье представлено аналитическое решение дифференциального уравнения. Следовательно, полученную зависимость можно использовать для расчета геометрических размеров внутрискважинного реактора.

### **Литература**

1. Крянев Д., Жданов С. Методы увеличения нефтеотдачи: опыт и перспективы применения // Нефтегазовая вертикаль. 2011. Т. 5.
2. Кубрак А.В. Водорезов Д.Д. Тепловые методы добычи высоковязкой нефти // Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции «Актуальные вопросы современных научных исследований»; 2022 г., Нефтекамск, Республика Башкортостан, Российская Федерация.
3. Рахматуллин И.Р. Распределение гидродинамических и тепловых полей в пористой среде при закачивании перегретого и влажного пара // Интервал. Передовые нефтегазовые технологии. 2008. № 1 (120). С. 52-56.
4. Мингазов А.Н., Миннуллин А.Г., Хисамутдинов Н.И., Шарифгалеев А.Р. Перспективы развития технологий разработки трудноизвлекаемых запасов нефти // Нефтепромысловое дело. 2023. № 5 (653). С. 38-43.
5. Косарева Е.А., Великанова Ю.В. Тепловая обработка призабойной зоны скважины // Ашировские чтения. 2021. Т. 1. № 1 (13). С. 216-222.
6. Филиппов А. И. и др. Анализ температурного поля цилиндрического потока на основе «в среднем точного» решения // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 3. С. 84-93.
7. Ахметова О. В. Нестационарное температурное поле в слоисто-неоднородной ортотропной пористой среде // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 3. С. 10-23.
8. Мирнов С. В. и др. Экспериментальное определение потерь давления и температурных полей на рабочем участке с шаровой засыпкой // Современные проблемы теплофизики и энергетики. 2020. С. 189-191.
9. Поляков А. Ф. и др. Теплоотдача в оболочках из пористых сетчатых материалов // Теплоэнергетика. 2009. № 3. С. 46-52.
10. Бровка Г. П., Сычевский В. А. Расчет температурных полей и теплопроводности в структурированных системах // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72. № 4. С. 607-613.
11. Kim M. C. et al. Onset of buoyancy-driven convection in a liquid-saturated cylindrical porous layer supported by a gas layer // Physics of Fluids. 2008. Т. 20. № 5.
12. Ayoubi Ayoubloo K. et al. Pseudoplastic natural convection flow and heat transfer in a cylindrical vertical cavity partially filled with a porous layer // International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2020. Т. 30. № 3. С. 1096-1114.
13. Lakshmi K. M., Laroze D., Siddheshwar P. G. Natural convection of a binary liquid in cylindrical porous annuli/rectangular porous enclosures with cross-diffusion effects under local thermal non-equilibrium state // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Т. 184. С. 122-294.
14. Barletta A., Celli M., Rees D. A. S. Buoyant flow and instability in a vertical cylindrical porous slab with permeable boundaries // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Т. 157. С. 119-956.
15. Blet N., Maillet D. Analytical steady-state model based on Fourier integral transforms for cylindrical heat pipes under axisymmetric conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Т. 183. С. 122-117.

16. Keshavarzian B., Sayehvand H. O. Validation of the local thermal equilibrium assumption for free convection boundary layer flow over a horizontal cylinder embedded in an infinite saturated porous medium // *Results in Physics*. 2023. Т. 44. С. 106-112.

17. Alomar O. R. et al. A thermal nonequilibrium model to natural convection inside non Darcy porous layer surrounded by horizontal heated plates with periodic boundary temperatures // *Heat Transfer*. 2021. Т. 50. №. 6. С. 6068-6098.

18. Rashidi S. et al. Fluid flow and forced convection heat transfer around a solid cylinder wrapped with a porous ring // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. Т. 63. С. 91-100.

19. Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р. Особенности расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25, № 6. С. 54-66. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66.

### Авторы публикации

**Якимов Николай Дмитриевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «КГЭУ», e-mail: [nyakimov@inbox.ru](mailto:nyakimov@inbox.ru)

**Шагеев Альберт Фаридович** - старший преподаватель кафедры «Разработка и эксплуатация месторождений трудноизвлекаемых углеводородов» КФУ, Институт геологии и нефтегазовых технологий / Научный центр мирового уровня Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты (головной центр) / с.н.с. НИЛ методов увеличения нефтеотдачи, e-mail: [shageevalbert@rambler.ru](mailto:shageevalbert@rambler.ru).

**Дмитриев Андрей Владимирович** – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «КГЭУ», e-mail: [jeremiada@gmail.com](mailto:jeremiada@gmail.com).

**Мутугуллина Ирина Александровна** – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «КГЭУ», 8-927-244-95-04, e-mail: [vedgaeva@gmail.com](mailto:vedgaeva@gmail.com).

### References

1. Kryanev D., Zhdanov S. Methods of increasing oil recovery: experience and prospects of application // *The oil and gas vertical*. 2011. Vol. 5. (In Russ).

2. Kubrak A.V. Vodorezov D.D. Thermal methods of extraction of high-viscosity oil // *Materials of the International (correspondence) scientific and practical Conference "Topical issues of modern scientific research"*; 2022, Neftekamsk, Republic of Bashkortostan, Russian Federation. (In Russ).

3. Rakhmatullin I.R. Distribution of hydrodynamic and thermal fields in a porous medium during injection of superheated and wet steam // *The interval. Advanced oil and gas technologies*. 2008. No. 1 (120). pp. 52-56. (In Russ).

4. Mingazov A.N., Minnullin A.G., Khisamutdinov N.I., Sharifgaleev A.R. Prospects for the development of technologies for the development of hard-to-recover oil reserves // *Oilfield business*. 2023. No. 5 (653). pp. 38-43. (In Russ).

5. Kosareva E.A., Velikanova Yu.V. Heat treatment of the bottom-hole zone of the well // *Ashirov readings*. 2021. Vol. 1. No. 1 (13). pp. 216-222. (In Russ).

6. Filippov A. I. et al. Analysis of the temperature field of a cylindrical flow based on an "average accurate" solution // *Applied mechanics and technical physics*. 2010. Vol. 51. No. 3. pp. 84-93. (In Russ).

7. Akhmetova O. V. Unsteady temperature field in a layered inhomogeneous orthotropic porous medium // *Bulletin of the Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, and energy*. 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 10-23. (In Russ).

8. Mirnov S. V. et al. Experimental determination of pressure losses and temperature fields in a working area with a ball filling // *Modern problems of thermophysics and energy*. 2020. pp. 189-191. (In Russ).

9. Polyakov A. F. et al. Heat transfer in shells made of porous mesh materials // *Thermal power engineering*. 2009. No. 3. pp. 46-52. (In Russ).

10. Brovka G. P., Sychevsky V. A. Calculation of temperature fields and thermal conductivity in structured systems // *Engineering and Physics Journal*. 1999. Vol. 72. No. 4. pp. 607-613. (In Russ).
11. Kim M. C. et al. Onset of buoyancy-driven convection in a liquid-saturated cylindrical porous layer supported by a gas layer // *Physics of Fluids*. 2008. T. 20. № 5.
12. Ayoubi Ayoubloo K. et al. Pseudoplastic natural convection flow and heat transfer in a cylindrical vertical cavity partially filled with a porous layer // *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2020. T. 30. № 3. C. 1096-1114.
13. Lakshmi K. M., Laroze D., Siddheshwar P. G. Natural convection of a binary liquid in cylindrical porous annuli/rectangular porous enclosures with cross-diffusion effects under local thermal non-equilibrium state // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. T. 184. C. 122-294.
14. Barletta A., Celli M., Rees D. A. S. Buoyant flow and instability in a vertical cylindrical porous slab with permeable boundaries // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. T. 157. C. 119-956.
15. Blet N., Maillet D. Analytical steady-state model based on Fourier integral transforms for cylindrical heat pipes under axisymmetric conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. T. 183. C. 122-117.
16. Keshavarzian B., Sayehvand H. O. Validation of the local thermal equilibrium assumption for free convection boundary layer flow over a horizontal cylinder embedded in an infinite saturated porous medium // *Results in Physics*. 2023. T. 44. C. 106-112.
17. Alomar O. R. et al. A thermal nonequilibrium model to natural convection inside non Darcy porous layer surrounded by horizontal heated plates with periodic boundary temperatures // *Heat Transfer*. 2021. T. 50. № 6. C. 6068-6098.
18. Rashidi S. et al. Fluid flow and forced convection heat transfer around a solid cylinder wrapped with a porous ring // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. T. 63. C. 91-100.
19. Yakimov N.D., Shageev A.F., Dmitriev A.V., Badretdinova G.R. Features of calculating the temperature field in an annular porous layer under infinite heating // *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2023. 25 (6): 54-66. (In Russ). DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66.

#### Authors of the publication

**Nikolay D. Yakimov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: [nyakimov@inbox.ru](mailto:nyakimov@inbox.ru)

**Albert F. Shageev** – "Development and Exploitation of deposits of hard-to-recover hydrocarbons" of KFU, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies / World-class Scientific Center for Rational Development of liquid Hydrocarbon reserves of the planet NIL methods of increasing oil recovery \_e-mail: [shageevalbert@rambler.ru](mailto:shageevalbert@rambler.ru).

**Andrey V. Dmitriev**– Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: [ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com).

**Irina A. Mutugullina** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: [vedgaeva@gmail.com](mailto:vedgaeva@gmail.com)

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

**Получено** **01.04.2024 г.**

**Отредактировано** **18.04.2024 г.**

**Принято** **30.05.2024 г.**



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНИЧЕСКОМ ДИФфуЗОРЕ ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ПОДАЧИ ВОЗДУХА

Плотников Л.В., Рыжков А.Ф., Красильников Д.Н., Давыдов Д.А., Шурупов В.А.

Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, [leonplot@mail.ru](mailto:leonplot@mail.ru)

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования определяется тем, что вертикальные конические диффузоры используются в качестве вспомогательных аппаратов во многих технических приложениях в различных отраслях (химическая промышленность, энергетическое машиностроение, технологические устройства и т.д.). ЦЕЛЬ. Оценить влияние способа (конструкции) подвода воздуха, формы поперечного сечения подводящих каналов и сопловых трубок на газодинамическую структуру потока в вертикальном диффузоре для разных расходных характеристик. МЕТОДЫ. Структура (распределение) потока внутри вертикального диффузора при подаче воздуха с помощью разных конструкций подводящих каналов изучалось на экспериментальном стенде. На основе метода тепловизирующей съемки изучалась структура потока в вертикальном диффузоре. В данном исследовании изучалось два способа подвода воздуха в вертикальный диффузор: подвод воздуха через один прямолинейный канал снизу и сопловая подача воздуха через четыре трубки. Каналы и сопла имели поперечные сечения в форме круга, квадрата и треугольника. Соответственно, было изучено влияние шести конструкций подвода воздуха в вертикальный диффузор и их влияние на газодинамическую структуру течения. РЕЗУЛЬТАТЫ. Опыты проводились при стационарном режиме течения воздуха в диффузоре для расходов воздуха от 0,015 до 0,06 м<sup>3</sup>/с. Число Рейнольдса для потока воздуха на выходе из подводящего канала находилось в диапазоне от 42500 до 150000. Получены термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при разных способах подачи воздуха для разных расходных характеристик. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Особенности структуры потока в вертикальном диффузоре при традиционном подводе воздуха снизу через один канал заключаются в формировании ярко выраженного центрального течения воздуха вдоль вертикальной оси диффузора при использовании всех конфигураций канала. При этом форма поперечного сечения подводящего канала оказывает существенное влияние на структуру потока в коническом диффузоре. Особенности структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха через четыре трубки заключаются в отсутствии застойных зон и центральном течении воздуха вдоль оси. При этом использование квадратной и треугольной сопловых трубок приводит к более равномерному распределению потока воздуха по всему объему вертикального диффузора.

**Ключевые слова:** вертикальный диффузор, газодинамическая структура потока, способ подачи воздуха, профилированные каналы, эксперимент, тепловизионная диагностика.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

**Для цитирования:** Плотников Л.В., Рыжков А.Ф., Красильников Д.Н., Давыдов Д.А., Шурупов В.А. Экспериментальная оценка структуры потока в вертикальном коническом диффузоре при разных способах подачи воздуха // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 156-172. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-156-172.

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE FLOW STRUCTURE IN A VERTICAL CONICAL DIFFUSER WITH DIFFERENT AIR SUPPLY METHODS

Plotnikov L.V., Ryzhkov A.F., Krasilnikov D.N., Davydov D.A., Shurupov V.A.

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, [leonplot@mail.ru](mailto:leonplot@mail.ru)

**Abstract:** *RELEVANCE* of the study is determined by the fact that vertical conical diffusers are used as auxiliary devices in many technical applications in various industries (chemical industry, power engineering, technological devices, etc.). *THE PURPOSE.* The influence of the method (design) of air supply, the cross-sectional shape of the supply channels and nozzle tubes on the gas-dynamic structure of the flow in a vertical diffuser for different flow characteristics was assessed. *METHODS.* The structure (distribution) of the flow inside a vertical diffuser for supplying air using different designs of supply channels was studied on an experimental bench. Based on the thermal imaging method, the flow structure in a vertical diffuser was studied. In this study, two methods of supplying air to a vertical diffuser were studied: supplying air through one straight channel from the bottom and nozzle supplying air through four tubes. The channels and nozzles had cross sections in the shape of a circle, square and triangle. Accordingly, the influence of six air supply designs into a vertical diffuser and their influence on the gas-dynamic flow structure were studied. *RESULTS.* The experiments were carried out under stationary air flow conditions in the diffuser for air flow rates from 0.015 to 0.06 m<sup>3</sup>/s. The Reynolds number for the air flow at the outlet of the supply channel was in the range from 42500 to 150000. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser were obtained for different methods of air supply for different flow characteristics. *CONCLUSION.* Features of the flow structure in a vertical diffuser with traditional air supply from below through one channel consist in the formation of a pronounced central air flow along the vertical axis of the diffuser when using all channel configurations. In this case, the cross-sectional shape of the supply channel has a significant impact on the flow structure in the conical diffuser. Features of the flow structure in a vertical diffuser with nozzle air supply through four tubes are the absence of stagnant zones and a central air flow along the axis. At the same time, the use of square and triangular nozzle tubes leads to a more uniform distribution of air flow throughout the entire volume of the vertical diffuser.

**Keywords:** vertical diffuser, gas-dynamic flow structure, air supply method, profiled channels, experiment, thermal imaging diagnostics.

**Acknowledgments:** The research funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Ural Federal University Program of Development within the Priority-2030 Program) is gratefully acknowledged.

**For citation:** Plotnikov L.V., Ryzhkov A.F., Krasilnikov D.N., Davydov D.A., Shurupov V.A. Experimental evaluation of the flow structure in a vertical conical diffuser with different air supply methods. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (3): 156-172. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-156-172.

### ***Введение (Introduction)***

Известно, что конические диффузоры (КД) той или иной конструкции широко применяются в различных технических, технологических, химических, научных и других процессах [1]. Газодинамическое совершенство течения воздуха или жидкости в КД во многом определяет эффективность процессов в машине, аппарате или каком-либо устройстве [1]. Поэтому изучение газодинамики потоков в коническом диффузоре и разработка методов управления структурой потоков в КД являются актуальными задачами для развития науки, техники и технологий.

Ниже представлены современные результаты других авторов об исследованиях физических процессов в диффузорах и данные о прикладных аспектах применения КД в различных отраслях промышленности.

Существует большое количество работ по созданию моделей и алгоритмов для прогнозирования газодинамических характеристик в конических диффузорах при различных начальных условиях [2-5]. Так, Ferrari A. получил оригинальные аналитические уравнения для одномерного стационарного течения в коническом диффузоре [2]. Предложенные решения дополняют и расширяют теоретические знания о газовой динамике в КД. Novković D.M. с коллегами в специализированном программном обеспечении разработали математическую модель для прогнозирования параметров потоков газа в коническом диффузоре с углом раскрытия  $8^\circ$  [3]. Предложенная модель отличается высокой точностью и способна проводить оценку параметров для двухмерного и трехмерного течений. Teshnizi E.S. and Momeni F. провели узконаправленное исследование по созданию методики расчета турбулентного пограничного слоя в коническом диффузоре [4]. Подобные методики позволяют с высокой точностью определять специфические характеристики КД для конкретных приложений. Véras P. с соавторами создали автоматизированный алгоритм для прогнозирования газодинамики закрученного потока в коническом диффузоре на основе технологии машинного обучения [5]. Важно, что разработанный алгоритм способен определять параметры потока в КД для стационарных и нестационарных граничных условиях на входе.

Существуют исследования по разработке способов управления газодинамикой потоков в конических диффузорах [6, 7]. Так, Tanasa C. и другие предложили способ сглаживания газодинамической нестационарности, связанной с закрученностью потока, в коническом диффузоре посредством дросселирования течения на выходе из КД [6]. Преимущество данного способа заключается в том, что гидравлическое сопротивление возрастает незначительно по сравнению с другими подобными методами. Yang J. с коллегами разработали способ управления потоком в КД посредством кольцевого генератора вихрей [7]. Применение этого метода позволило подавить массивный отрыв потока в расширительной секции диффузора и в зоне ниже по потоку, а также повысить эффективность восстановления давления в КД. Также существуют исследования по разработке различных конструктивных элементов в диффузоре для обеспечения более равномерного течения вдоль всей длины КД [8, 9]. Например, Shukri E.S. устанавливал винтовую ленточную или спирально-винтовую вставки на внутренней поверхности конического диффузора для выравнивания поля скоростей [8, 9]. Численное исследование показало значительный эффект в улучшении равномерности распределения скорости по всему объему диффузора по сравнению с КД без таких вставок.

Однако, известно, что любые способы газодинамического совершенствования процессов в конических диффузорах вызывают тот или иной рост гидравлических потерь [1]. Поэтому ученые и специалисты продолжают разрабатывать новые способы оценки изменений основных параметров потока в КД [10, 11]. Так, Mfon S.A. с коллегами предложил оригинальную методику оценки коэффициента падения давления в коническом диффузоре [10]. Gosteev Yu.A. и другие создали новую методику расчета коэффициента потерь в КД различных конструкций [11].

Существуют разносторонние исследования газодинамических особенностей сложных течений (закрученные потоки, спиральные вихри, вихревые жгуты и т.д.) в конических диффузорах и их возможное применение в различных отраслях науки и техники [12-15]. Так, Tsoy M. с коллегами подробно исследовали формирование и разрушение спиральных вихрей в конических диффузорах с разными углами раскрытия конуса [12]. Подобные исследования проводили Zhou X. с коллегами по отношению к вихревым жгутам и их влиянием на характеристики потока в КД [13]. Следует отметить, что большое количество исследователей уделяет внимание изучению закрученных потоков в конических диффузорах разных конфигураций [14-15]. Это объясняется тем, что закрученные потоки способствуют интенсификации теплообмена, улучшению перемешивания различных сред и распределению потока по всему объему диффузора. Поэтому закрученные потоки в КД повышают эффективность различных устройств, машин и аппаратов, использующих конические диффузоры в своих технологических процессах. Так, Liu Z. с соавторами исследовали частную задачу о влиянии угла раскрытия КД на ядро вихря закрученного потока с помощью измерительной PIV-системы [14]. Піс D.B. с коллегами изучали распределение средних газодинамических характеристик закрученного потока вдоль диффузора с разными углами раскрытия [15]. Исследования подтвердили, что введение умеренной закрутки потока на входе снижает вероятность отрыва в широкоугольных конических диффузорах.

Конические диффузоры применяются в различных технических и технологических устройствах. Примеры некоторых возможных сфер применения КД представлены далее. Вертикальные конические диффузоры являются неотъемлемой частью устройств для получения синтез-газа из различных углеродистых материалов [16, 17]. Конические участки часто встречаются в элементах камер сгорания газовых турбин или горелок [18]. КД служат для повышения скорости ветра и КПД (посредством рекуперации энергии) ветряных турбин [19]. Конические диффузоры также используются на выходе турбины, работающей по принципу органического цикла Ренкина [20]. Конические диффузоры активно применяются в гидротурбинах для повышения производительности и эффективности [21]. Также существуют другие приложения для использования диффузоров, а именно, тяговый диффузор для турбин [22], водяной насос [23], гидрокинетическая турбина [24] и другие.

Таким образом, проведенный обзор литературы показал, что:

- изучение газодинамических характеристик в коническом диффузоре для разных граничных условий остается актуальной задачей в развитии науки;
- разработка способов прогнозирования и управления структурой потока в КД также является важной задачей для совершенствования технических устройств;
- конические диффузоры широко распространены практически во всех отраслях науки и техники.

Цели данного исследования можно сформулировать следующим образом:

- создать экспериментальный стенд и наладить методику проведения опытов для исследования структуры потока в вертикальном коническом диффузоре при разных способах подачи воздуха;
- оценить влияние традиционного подвода воздуха через один канал и сопловой подачи через четыре трубки в вертикальный диффузор на структуру потока при разных расходных характеристиках;

- выявить влияние формы поперечного сечения подводящего канала и сопловых трубок на газодинамическую структуру потока в вертикальном диффузоре.

Научная значимость исследования состоит в том, что впервые получены термограммы структуры потока в вертикальном коническом диффузоре при различных конструкторских способах подачи воздуха и для различных расходных характеристик, а также уточнении физических особенностей газодинамики стационарных потоков в диффузоре.

Практическая значимость исследования заключается в разработке рекомендаций для управления газодинамическими характеристиками потока в вертикальном коническом диффузоре, а также расширении базы знаний о подходах к проектированию диффузоров с оптимальной структурой потока.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Распределение потока внутри вертикального диффузора при подаче воздуха с помощью разных конструкций подводящих каналов изучалось на экспериментальном стенде, показанном на рисунке 1. Экспериментальный стенд состоял из нагнетающего компрессора (с возможностью изменения расхода воздуха  $q$  через систему в диапазоне от 0,015 до 0,06 м<sup>3</sup>/с), канального нагревателя воздуха (с возможностью управлением температурой нагрева воздуха до 50-60 °С), подводящих систем разных конфигураций (конструкции представлены ниже), а также прозрачного вертикального диффузора (геометрические размеры также даны ниже) с сеткой внутри (размер ячейки сетки составлял 1x1 мм). Эта сетка служила для фиксации структуры потока с помощью метода тепловизуализирующей съемки. Между компрессором и канальным нагревателем был установлен резервуар с хонейкомбом для стабилизации течения (на рис. 1 не показан).

Опыты проводились при стационарном режиме течения воздуха в рассматриваемой системе для разных расходов воздуха через систему. Число Рейнольдса  $Re$  для потока воздуха на выходе из подводящего канала находилось в диапазоне от 42500 до 150000.

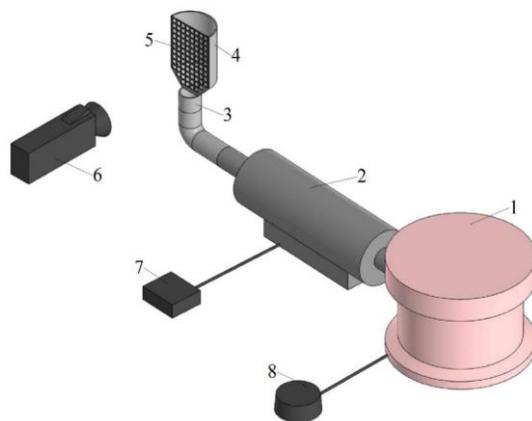


Рис. 1. Трехмерная модель экспериментального стенда для исследования структуры потока в вертикальном диффузоре: 1 – компрессор; 2 – канальный нагреватель; 3 – подводящий канал; 4 – вертикальный диффузор; 5 – сетка; 6 – вертикальный диффузор; 5 – сетка; 6 – тепловой визор; 7 – блок управления уровнем нагрева; 8 – блок управления расходом воздуха

Fig. 1. Three-dimensional model of the experimental stand for studying the flow structure in a vertical diffuser: 1 - compressor; 2 - channel heater; 3 - supply channel; 4 - vertical diffuser; 5 - grid; 6 - thermal imager; 7 - heating level control unit; 8 - air flow control unit

\*Источники: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Метод тепловизуализирующей съемки, который использовался в данном исследовании, более подробно описан в статье [25]. При проведении экспериментов измерительной базой служило следующие оборудование:

- тепловизор (модель Testo 890-2, Германия), с помощью которого были получены термограммы распределения потока внутри вертикального диффузора (погрешность измерения  $\pm 0,2$  °C);

- термоанемометр постоянной температуры (модель Ирвисс ТА-5.1, Россия), посредством которого определялся расход воздуха через систему (относительная стандартная неопределенность измерения  $q$  составляла 5,1 %);

- термопары для текущего контроля температуры на разных участках системы (относительная стандартна неопределенность измерения составляла 1,5 %).

В данном исследовании изучалось два конструкторских способа подвода воздуха в вертикальный диффузор (рис. 2):

- 1) традиционный способ подвода воздуха через прямолинейный канал снизу (рис 2а);
- 2) сопловая подача воздуха через четыре трубки, расположенные под углом 45° (рис. 2б).

Основные геометрические размеры исследуемого диффузора представлены на рисунке 2. Также на рисунке показаны принципиальные схемы обоих конструкторских способов подвода воздуха.

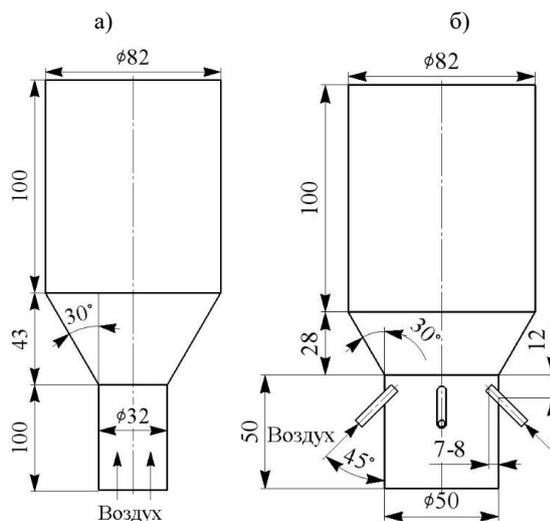


Рис. 2. Геометрические размеры исследуемого вертикального диффузора и способы подачи воздуха: а – традиционный подвод воздуха снизу через канал; б – сопловая подача воздуха под углом

Fig. 2. Geometric dimensions of the studied vertical diffuser and methods of air supply: a - traditional air supply from below through the channel; b - nozzle air supply at an angle

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В данном исследовании дополнительно изучалось влияние формы поперечного сечения канала и сопловых трубок на газодинамическую структуру потока в вертикальном диффузоре. Известно, что в квадратных и треугольных каналах возникают устойчивые, продольные, вихревые структуры, оказывающие существенное влияние на газодинамические характеристики потока воздуха [26].

Соответственно для традиционного способа подвода воздуха использовались три формы поперечного сечения: круг, квадрат и равносторонний треугольник, геометрические размеры которых показаны на рисунке 3.

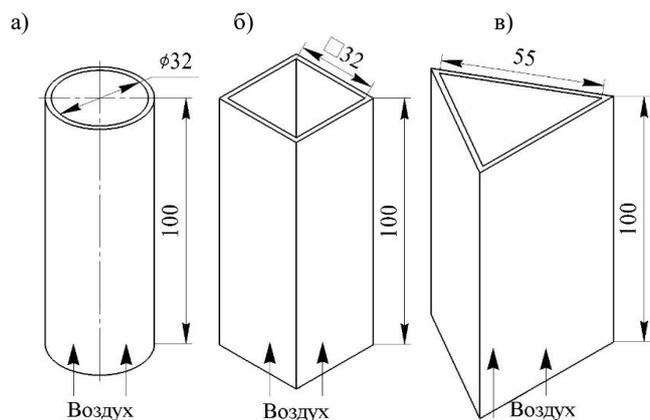


Рис. 3. Эскизы конструкций подводящих каналов с разными формами поперечных сечений: а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 3. Sketches of supply duct designs with different shapes of cross-sections: a - circle; b - square; c - triangle

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Геометрические размеры подводящих каналов определялись исходя из равенства эквивалентного гидравлического диаметра для всех конфигураций (диаметр круга – 32 мм, сторона квадрата – 32 мм, сторона треугольника – 55 мм). Длина подводящего канала во всех случаях составляла около 100 мм. Все подводящие каналы имели технически гладкую поверхность (средняя шероховатость равнялась 6,3 мкм).

Общий вид другого способа подвода воздуха в вертикальный диффузор с помощью сопловых трубок показан на рисунке 4а. На рисунке 4б даны геометрические размеры сопловых трубок с поперечными сечениями разной формы.

Геометрические размеры поперечных сечений сопловых трубок также определялись исходя из равенства эквивалентного гидравлического диаметра для всех конфигураций (диаметр круга – 5 мм, сторона квадрата – 5 мм, сторона треугольника – 8,6 мм). Общая длина сопловых трубок во всех случаях составляла около 100 мм. Длина участков трубок с квадратной и треугольной формами поперечного сечения составляли 60 мм. Все сопловые трубки имели технически гладкую поверхность (средняя шероховатость равнялась 6,3 мкм). Сопловые трубки (4 штуки) устанавливались симметрично в цилиндрическое основание под углом 45° относительно вертикальной оси.

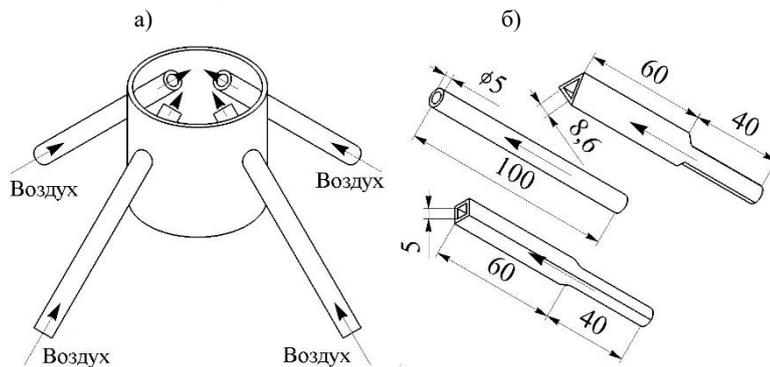


Рис. 4. Общий вид конструкции для сопловой подачи воздуха в вертикальный диффузор (а) и геометрические размеры подающих трубок с разными формами поперечного сечения (б)

Fig. 4. General view of the design for nozzle air supply to a vertical diffuser (a) and geometric dimensions of supply tubes with different cross-sectional shapes (b)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, в данном исследовании изучалось влияние шести конструкций подвода воздуха в вертикальный диффузор и их влияние на газодинамическую структуру с помощью метода тепловизуализирующей съемки.

#### **Результаты (Results) Обсуждение (Discussions)**

Установлено, что поперечное профилирование подводящего канала оказывает существенное влияние на структуру потока в коническом диффузоре. На рис. 5 показана структура потока в вертикальном диффузоре при расходе воздуха  $q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$  для каналов с разными конфигурациями. Использование канала с круглой формой поперечного сечения приводит к формированию ярко выраженного центрального течения (насыщенный цвет на термограмме) в вертикальном диффузоре (рис. 5а). При этом в углах диффузора течение воздуха фактически отсутствует (белые области на термограмме), то есть образуются застойные зоны. Следует отметить, что в верхней части диффузора движение воздуха осуществляется по всему объему. Применение канала с квадратной формой поперечного сечения вызывает существенное изменение структуры потока по сравнению с традиционным круглым каналом (рис. 5б). При использовании квадратного канала отсутствуют застойные зоны в углах диффузора. Однако, также можно заметить наличие ярко выраженного центрального течения вдоль оси диффузора (темно-оранжевая область на термограмме). Использование треугольного канала для подачи воздуха в диффузор также приводит формированию застойных зон в углах (рис. 5в). При этом, течение по высоте диффузора является более равномерным (фактически равномерный цвет термограммы) по сравнению с круглым и квадратным каналами.

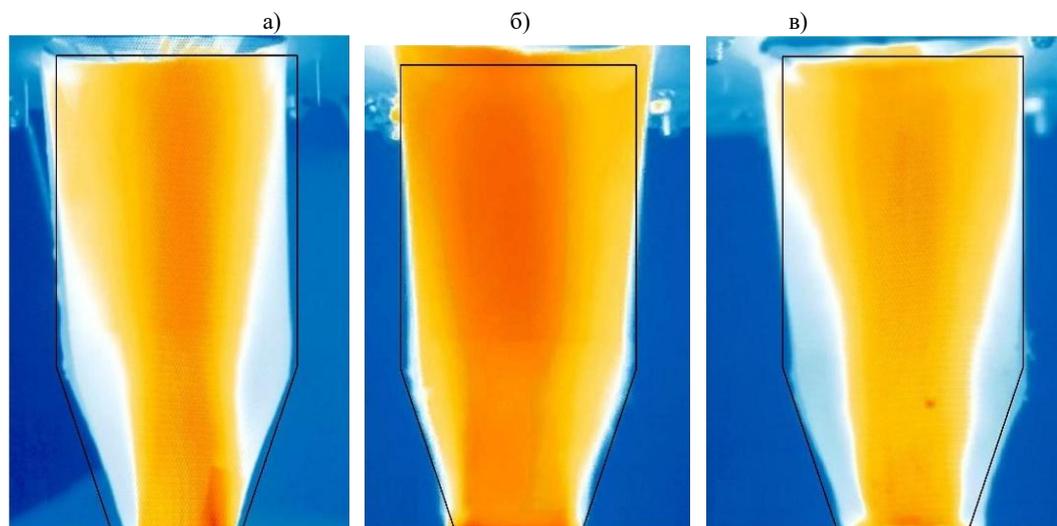


Рис. 5. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через каналы с разными формами поперечного сечения (расход через систему  $q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$ ): а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 5. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser at air supply through channels with different cross-sectional shapes (flow rate through the system  $q = 0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ ): a - circle; b - square; c - triangle

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Такие существенные изменения в структуре потока в вертикальном диффузоре при использовании профилированных подводящих каналов можно объяснить влиянием продольных вихревых структур в углах квадратного и треугольного профилей. В данном случае эти структуры способствуют более равномерному распределению потока по всему объему диффузора и препятствуют образованию застойных зон. Следует отметить, что

применение квадратных и треугольных трубопроводов имеет существенное влияние в других областях науки и техники, а именно, в системах газообмена поршневых двигателей [27, 28].

На рисунке 6 показана структура потока в вертикальном диффузоре для каналов с разными конфигурациями при расходе воздуха через систему  $q = 0,047 \text{ м}^3/\text{с}$ .

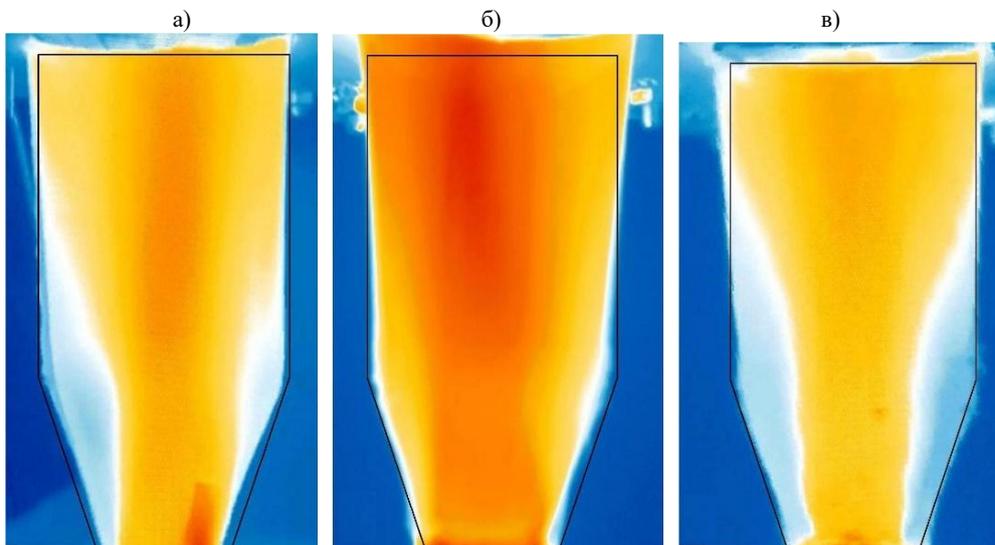


Рис. 6. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через каналы с разными формами поперечного сечения (расход через систему  $q = 0,047 \text{ м}^3/\text{с}$ ): а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 6. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser at air supply through channels with different cross-sectional shapes (flow rate through the system  $q = 0.047 \text{ m}^3/\text{s}$ ): a - circle; b - square; c - triangle

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Увеличение расхода (а соответственно и скорости потока) через систему вызывает значительное уменьшение застойных зон в углах вертикального диффузора в случае подачи воздуха через традиционный круглый канал (рис. 6а). При этом сохраняется ярко выраженное центральное течение вдоль оси диффузора. Рост расхода через систему фактически не оказывает влияния на структуру потока в диффузоре при подаче воздуха через квадратный канал: в диффузоре отсутствуют застойные зоны и наблюдается центральное течение (рис. 6б). Увеличение расходных характеристик через систему также практически не оказало влияния на газодинамическую структуру потока в вертикальном коническом диффузоре при подаче воздуха через треугольный канал: наблюдаются значимые застойные зоны в углах диффузора и имеет место равномерное центральное течение с полным заполнением объема в верхней части (рис. 6в).

Полученные данные свидетельствуют об устойчивом влиянии продольных вихревых структур в профилированных каналах, которые сохраняют свое воздействие на распределение воздуха в вертикальном диффузоре при разных расходах (скоростях) воздуха.

На рисунке 7 показана структура потока в вертикальном диффузоре для каналов с разными конфигурациями при расходе воздуха через систему  $q = 0,057 \text{ м}^3/\text{с}$ .

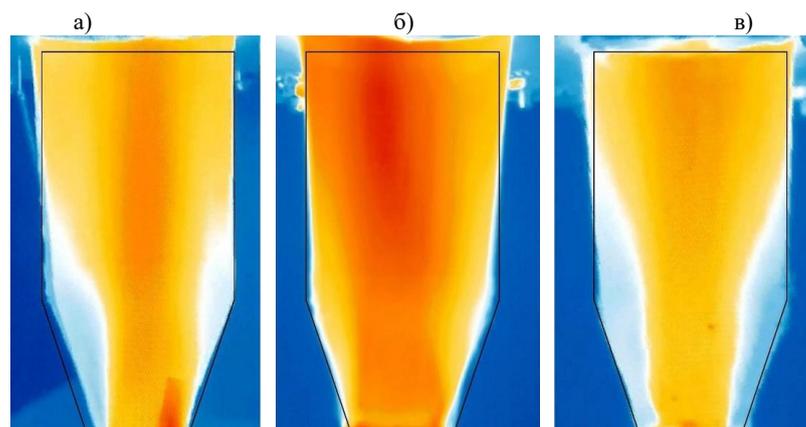


Рис. 7. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через каналы с разными формами поперечного сечения (расход через систему  $q = 0,057 \text{ м}^3/\text{с}$ ): а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 7. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser at air supply through channels with different cross-sectional shapes (flow rate through the system  $q = 0.057 \text{ m}^3/\text{s}$ ): a - circle; b - square; c - triangle

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Дополнительное увеличение расхода (скорости) воздуха через систему привело к уменьшению застойных зон в углах диффузора (рис. 7а). Соответственно, можно заключить, что застойные зоны уменьшаются с ростом расхода (скорости) через рассматриваемую систему (канал-диффузор). При этом, что дополнительный рост расхода через квадратный канал не вызвал каких-либо изменений в распределении воздуха внутри вертикального диффузора (рис. 7б). В свою очередь, что дополнительное увеличение расходных характеристик через систему также не вызвало изменений в структуре потока в диффузоре при подаче воздуха через треугольный канал (рис. 7в).

Следует отметить, что при исследовании структуры потока с подводом воздуха через треугольный канал сетка была натянута не через центр треугольника, а с существенным смещением к одному из углов. Это связано с ограничениями в геометрических размерах диффузора и подводящего канала. Соответственно, существуют планы по уточнению данных о структуре потока в центральной плоскости для данной конструкции с помощью других оптических методов (в частности, посредством измерительной PIV-системы).

Далее представлены данные об изучении структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха. Так, на рисунке 8 показана структура потока в вертикальном диффузоре для сопловой подачи воздуха через трубки с разными поперечными сечениями при расходе через систему  $q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Из рисунка 8а видно, что при сопловой подаче воздуха через круглые трубки наблюдается интенсивное движение воздуха в основании диффузора. При этом, в углах диффузора отсутствуют застойные зоны. Дальнейшее распределение потока воздуха по высоте диффузора является почти равномерным с некоторым отклонением к правой стороне. Из рисунка 8 б видно, что при сопловой подаче воздуха через квадратные трубки также имеет место интенсивное движение потока в основании диффузора с дальнейшим равномерным распределением воздуха по всему объему диффузора. Соответственно, можно заключить, что применение квадратной сопловой трубки не оказало существенного влияния на структуру потока в вертикальном коническом диффузоре. Из рисунка 8 в видно, что применение треугольных сопловых трубок вызывает наиболее равномерное распределение воздуха по всему объему диффузора по сравнению с другими конфигурациями сопловых

трубок. При этом наблюдается интенсивное движение воздуха по вертикальной оси почти по всей высоте диффузора (форма этого движения напоминает «морковку»).

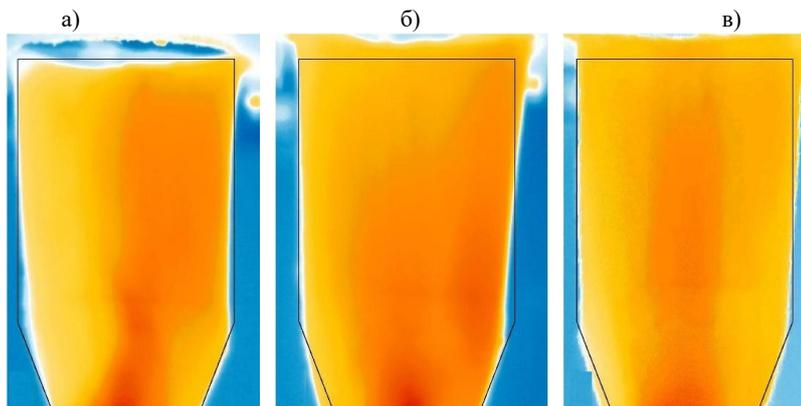


Рис. 8. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха через трубки с разными формами поперечного сечения (расход через систему  $q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$ ): а – круг; б – квадрат; в – треугольник

*Fig. 8. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser at nozzle air supply through tubes with different cross-sectional shapes (flow rate through the system  $q = 0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ ): a - circle; b - square; c - triangle*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следует отметить, что ярко выраженное центральное течение в диффузоре не формируется в случае использования сопловой подачи воздуха. Наблюдается развал струи либо в самом начале диффузора (квадратные трубки), либо в средней части (круглые трубки), либо в верхней части (треугольные трубки).

На рисунке 9 показана структура потока в вертикальном диффузоре для сопловой подачи воздуха через трубки разных конфигураций при расходе  $q = 0,047 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Из рисунка 9 а видно, что увеличение расхода через систему при сопловой подаче воздуха через круглые трубки не приводит к изменению структуры потока в вертикальном диффузоре. Также имеет место интенсивное движение воздуха в основании диффузора, которое постепенно распределяется на весь объем цилиндрической части с некоторым смещением к правой стороне. Из рисунка 9 б видно, что рост расходных характеристик через систему при сопловой подаче воздуха через квадратные трубки также не вызывает изменений в структуре потока по сравнению с  $q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$ . В данном случае имеет место небольшая область интенсивного движения воздуха в нижней части диффузора и фактически равномерное распределение воздуха в остальном объеме диффузора. Из рисунка 9 в видно, что увеличение расхода воздуха через треугольные сопловые трубки привело фактически к центральному течению потока воздуха в вертикальном диффузоре. В данном случае структура потока является самой равномерной по сравнению с сопловыми трубками круглого и квадратного поперечных сечений.

На основе представленных данных можно констатировать, что при сопловой подаче воздуха в диффузор влияние поперечного профилирования трубок на структуру потока не столь существенно. Однако, ранее было установлено, что применение квадратных и треугольных трубок повышают интенсивность турбулентности вплоть до 30 % по сравнению с подачей воздуха через круглые трубки [29]. Это может оказать положительное влияние на теплообменные процессы в реальных технологических установках, поскольку известно, что существует закономерность: чем выше интенсивность турбулентности, тем выше уровень теплоотдачи [30].

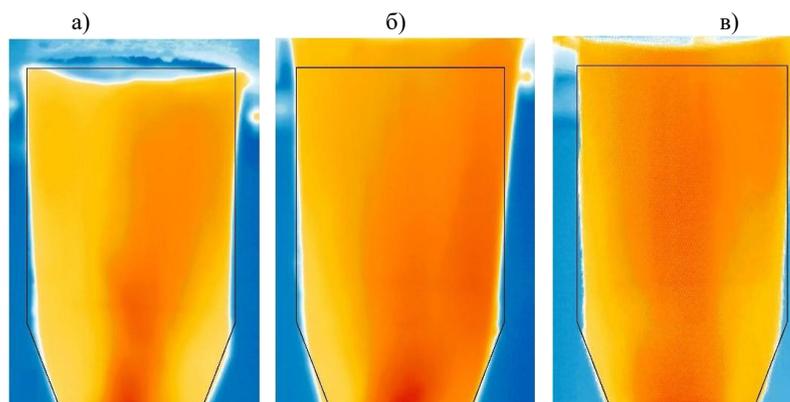


Рис. 9. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха через трубки с разными формами поперечного сечения (расход через систему  $q = 0,047 \text{ м}^3/\text{с}$ ): а – круг; б – квадрат; в – треугольник  
*Source: compiled by the author.*

На рисунке 10 показана структура потока в вертикальном диффузоре для сопловой подачи воздуха через трубки разных конфигураций при расходе  $q = 0,057 \text{ м}^3/\text{с}$ . Из рисунка 10 видно, что дополнительное увеличение расхода воздуха через систему подтверждает общие закономерности формирования структуры потока в вертикальном коническом диффузоре при подаче воздуха через сопловые трубки круглого, квадратного и треугольного поперечных сечений.

Таким образом, показаны эволюция изменения структуры потока в диффузоре при сопловой подаче воздуха, а также влияние формы поперечного сечения на распределение потока воздуха в диффузоре. Можно заключить, что посредством выбора начальных условий и геометрических размеров сопловых трубок можно управлять структурой потока в вертикальном диффузоре. В практическом плане это позволит настраивать химический или технологический процессы в соответствии с потребностями производства.

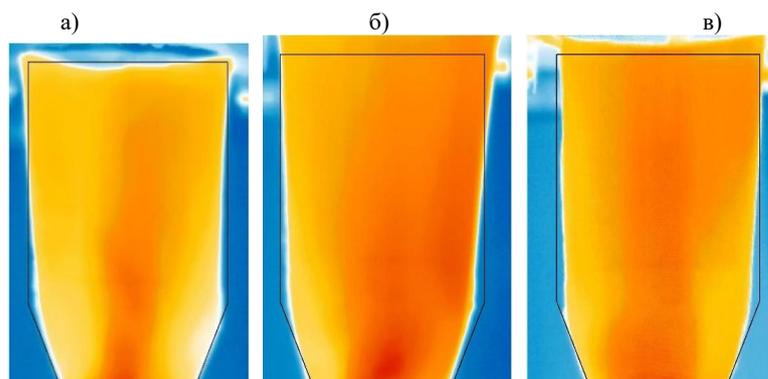


Рис. 10. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха через трубки с разными формами поперечного сечения (расход через систему  $q = 0,057 \text{ м}^3/\text{с}$ ): а – круг; б – квадрат; в – треугольник  
*Source: compiled by the author.*

**Заключение (Conclusions)**

На основе проведенных экспериментальных исследований структуры потока в вертикальном коническом диффузоре можно сформулировать следующие выводы:

1. создана экспериментальная установка для изучения различных конструкторских способов подвода воздуха в вертикальный диффузор при разных начальных условиях (расходных характеристиках);

2. Особенности структуры потока в вертикальном диффузоре при традиционном подводе воздуха снизу через один канал:

- в диффузоре образуется ярко выраженное центральное течение воздуха вдоль вертикальной оси диффузора при использовании всех конфигураций канала;

- форма поперечного сечения подводящего канала оказывает существенное влияние на структуру потока в коническом диффузоре (круглый канал – застойные зоны в углах; квадратный канал – отсутствие застойных зон; треугольный канал – застойные зоны с более равномерным потоком);

- основные закономерности изменения структуры потока сохраняются при увеличении расхода воздуха через систему от 0,02 до 0,067 м<sup>3</sup>/с.

3. Особенности структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха через четыре трубки, расположенные под углом 45 градусов:

- в диффузоре отсутствуют застойные зоны и центральное течение;

- использование квадратной и треугольной сопловых трубок приводит к более равномерному распределению потока воздуха по всему объему вертикального конического диффузора;

- увеличение расходных характеристик через систему способствует более равномерному распределению потока воздуха по всему объему диффузора (при этом основные закономерности в структуре течения сохраняются).

4. В прикладном аспекте можно сформулировать следующие рекомендации:

- использование традиционного подвода воздуха через один канал может приводить к формированию застойных зон в углах диффузора, что характерно для круглого и треугольного поперечных сечений; применение квадратного подводящего канала вызывает более равномерное распределение воздуха по всему объему диффузора;

- сопловая подача обеспечивает равномерное распределение воздуха по всему объему вертикального диффузора с формированием интенсивного движения в центре, что наиболее характерно для круглых и треугольных сопловых трубок; применение квадратных сопловых трубок вызывает интенсивное движение потока в нижней части диффузора, которое быстро разрушается вверх по течению, равномерно заполняя весь объем цилиндрической части диффузора;

- традиционная подача воздуха через один канал приводит к центральному течению вдоль оси вертикального диффузора с наличием или отсутствием застойных зон в углах диффузора; сопловая подача воздуха вызывает равномерное распределение воздуха по всему объему диффузора с формированием области интенсивного движения вдоль вертикальной оси.

5. Направления дальнейших исследований связаны с получением детальных данных о газодинамике потока в вертикальном диффузоре с помощью термоанемометра и/или PIV-системы, а также с исследованием структуры потока в двухступенчатом коническом диффузоре. Дополнительное направление исследований может заключаться в изучении влияния наклона сопловых трубок на газодинамику и структуру потока в вертикальном коническом диффузоре.

#### Литература

1. Azad R.S. Turbulent flow in a conical diffuser: A review // Experimental Thermal and Fluid Science. 1996. Vol. 13(4). P. 318-337.

2. Ferrari A. Exact solutions for quasi-one-dimensional compressible viscous flows in conical nozzles // *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. Vol. 915, Article number 915A1-1.
3. Novković D.M., Burazer J.M., Čović A.S. Comparison of different CFD software performances in the case of an incompressible air flow through a straight conical diffuser // *Thermal Science*. 2017. Vol. 21. P. 863-874.
4. Teshnizi E.S., Momeni F. Analytical Solutions and Analyses of the Displacement Separating Point in Diffusers // *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2022. Vol. 8(3). P. 891-903.
5. Véras P., Balarac G., Métais O., Georges D., Bombenger A., Ségoufin C. Reconstruction of numerical inlet boundary conditions using machine learning: Application to the swirling flow inside a conical diffuser // *Physics of Fluids*. 2021. Vol. 33(8). Article number 085132.
6. Tanasa C., Bosioc A., Muntean S., Susan-Resiga R. A novel passive method to control the Swirling Flow with Vortex Rope from the conical diffuser of hydraulic turbines with fixed blades // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2019. Vol. 9(22). Article number 4910.
7. Yang J., Zhang Y., Chen H., Fu S. Flow separation control in a conical diffuser with a Karman-vortex generator // *Aerospace Science and Technology*. 2020. Vol. 106. Article number 106076.
8. Shukri E.S. Analytical velocity study in a conical diffuser with screw tape inserts // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 153. Article number 06003.
9. Shukri E.S., Hussein A.A., Khudhier A. Evaluation of velocity distribution utilizing the helically coiled tape in a conical diffuser // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 518(3). Article number 032018.
10. Mfon S.A., Alabi S.B., Udoetok E.S., Offor U., Nsek E., Tomas Z., Miklík T. A semi-empirical model for estimation of pressure drop coefficient of a conical diffuser // *Chemical Engineering Transactions*. 2019. Vol. 74. P. 1003-1008.
11. Gosteev Yu.A., Obukhovskiy A.D., Salenko S.D. On head losses in conical diffusers // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2027. Article number 030048.
12. Tsoy M., Skripkin S., Litvinov I. Two spiral vortex breakdowns in confined swirling flow // *Physics of Fluids*. 2023. Vol. 35(6). Article number 061704.
13. Zhou X., Shi C., Miyagawa K., Wu H. Effect of modified draft tube with inclined conical diffuser on flow instabilities in Francis turbine // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 172. P. 606-617.
14. Liu Z., Favrel A., Miyagawa K. Effect of the conical diffuser angle on the confined swirling flow induced Precessing Vortex Core // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2022. Vol. 95. Article number 108968.
15. Ilić D.B., Benišek M.H., Čantrak D.S. Experimental investigations of the turbulent swirl flow in straight conical diffusers with various angles // *Thermal Science*. 2017. Vol. 21. P. 725-736.
16. Yue Y., Shen Y. CFD-DEM study of spout incoherence phenomena in a conical spouted bed // *Powder Technology*. 2022. Vol. 406. Article number 117529.
17. Sahu N.K., Kumar M., Dewan A. Sophisticated interplay of operating conditions governs flow field transition and optimal conversion inside tangentially fired gasifiers // *Energy*. 2022. Vol. 252. Article number 123975.
18. Nazzal I.T., Ertunç Ö. Influence of turbulent flow characteristics on flame behaviour in diffuser combustors // *Energy*. 2019. Vol. 170. P. 652-667.
19. Mohanan J.N., Sundaramoorthy K., Sankaran A. Performance improvement of a low-power wind turbine using conical sections // *Energies*. 2021. Vol. 14(17). Article number 5233.
20. Zou A., Chassaing J.-C., Li W., Gu Y., Sauret E. Quantified dense gas conical diffuser performance under uncertainties by flow characteristic analysis // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 161. Article number 114158.
21. Tanasa C., Bosioc A., Stuparu A., Muntean S., Susan-Resiga R. A Perspective Review of Passive Techniques Applied to Control the Swirling Flow Instabilities from the Conical Diffuser of Hydraulic Turbines // *Applied Mechanics Reviews*. 2023. Vol. 75(6). Article number 060801.
22. Buron J.-D., Houde S., Deschênes C. Statistical and spectral analysis of the bulb conical diffuser flow // *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. 2020. Vol. 13(1). P. 79-89.

23. Ning C., Cao P., Gong X., Zhu R. Optimization of Sweep and Blade Lean for Diffuser to Suppress Hub Corner Vortex in Multistage Pump // *Machines*. 2021. Vol. 9(12). Article number 316.

24. Vaz J.R.P., de Lima A.K.F., Lins E.F. Assessment of a Diffuser-Augmented Hydrokinetic Turbine Designed for Harnessing the Flow Energy Downstream of Dams // *Sustainability (Switzerland)*. 2023. Vol. 15(9). Article number 7671.

25. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // *Instruments and experimental techniques*. 2004. Vol. 4. P. 545-546.

26. Plotnikov L.V. Unsteady gas dynamics and local heat transfer of pulsating flows in profiled channels mainly to the intake system of a reciprocating engine // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 195. Article number 123144.

27. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. The Influence of Piston Internal Combustion Engines Intake and Exhaust Systems Configuration on Local Heat Transfer // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 80-85.

28. Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., Григорьев Н.И. Особенности тепломеханических характеристик пульсирующих потоков в газоздушных трактах поршневых двигателей с турбонаддувом // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 4. С. 77-84.

29. Plotnikov L. Mathematical Description of the Aerodynamic Characteristics of Stationary Flows in a Vertical Conical Diffuser When Air Is Supplied through Various Tube Configurations // *Axioms*. 2023. Vol 12(3). Article number 244.

30. Зарянкин А.Е., Падашмоганло Т. Разработка и исследование гасителей неравномерности в трубопроводных системах и трактах турбомашин на основе математического моделирования // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 93-110.

### Авторы публикации

**Плотников Леонид Валерьевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: leonplot@mail.ru.

**Рыжков Александр Филиппович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: af.ryzhkov@mail.ru.

**Красильников Дмитрий Николаевич** – студент кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: dima\_krasilnikov\_2017@mail.ru.

**Давыдов Данил Алексеевич** – студент кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail dda\_2003@bk.ru.

**Шурупов Владислав Александрович** – студент кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: shurupov.vladislav@yandex.ru.

### References

1. Azad R.S. Turbulent flow in a conical diffuser: A review. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1996; 13(4):318-337.

2. Ferrari A. Exact solutions for quasi-one-dimensional compressible viscous flows in conical nozzles. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021; 915:915A1-1.

3. Novković D.M., Burazer J.M., Čović A.S. Comparison of different CFD software performances in the case of an incompressible air flow through a straight conical diffuser. *Thermal Science*. 2017; 21:863-874.
4. Teshnizi E.S., Momeni F. Analytical Solutions and Analyses of the Displacement Separating Point in Diffusers. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2022; 8(3):891-903.
5. Vêras P., Balarac G., Métais O., Georges D., Bombenger A., Ségoufin C. Reconstruction of numerical inlet boundary conditions using machine learning: Application to the swirling flow inside a conical diffuser. *Physics of Fluids*. 2021; 33(8):085132.
6. Tanasa C., Bosioc A., Muntean S., Susan-Resiga R. A novel passive method to control the Swirling Flow with Vortex Rope from the conical diffuser of hydraulic turbines with fixed blades. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2019; 9(22):4910.
7. Yang J., Zhang Y., Chen H., Fu S. Flow separation control in a conical diffuser with a Karman-vortex generator. *Aerospace Science and Technology*. 2020; 106:106076.
8. Shukri E.S. Analytical velocity study in a conical diffuser with screw tape inserts. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 153:06003.
9. Shukri E.S., Hussein A.A., Khudhier A. Evaluation of velocity distribution utilizing the helically coiled tape in a conical diffuser. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 518(3):032018.
10. Mfon S.A., Alabi S.B., Udoetok E.S., Offor U., Nsek E., Tomas Z., Miklík T. A semi-empirical model for estimation of pressure drop coefficient of a conical diffuser. *Chemical Engineering Transactions*. 2019; 74:1003-1008.
11. Gosteev Yu.A., Obukhovskiy A.D., Salenko S.D. On head losses in conical diffusers. *AIP Conference Proceedings*. 2018; 2027:030048.
12. Tsoy M., Skripkin S., Litvinov I. Two spiral vortex breakdowns in confined swirling flow. *Physics of Fluids*. 2023; 35(6):061704.
13. Zhou X., Shi C., Miyagawa K., Wu H. Effect of modified draft tube with inclined conical diffuser on flow instabilities in Francis turbine. *Renewable Energy*. 2021; 172:606-617.
14. Liu Z., Favrel A., Miyagawa K. Effect of the conical diffuser angle on the confined swirling flow induced Precessing Vortex Core. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2022; 95:108968.
15. Ilić D.B., Benišek M.H., Čantrak D.S. Experimental investigations of the turbulent swirl flow in straight conical diffusers with various angles. *Thermal Science*. 2017; 21:725-736.
16. Yue Y., Shen Y. CFD-DEM study of spout incoherence phenomena in a conical spouted bed. *Powder Technology*. 2022; 406:117529.
17. Sahu N.K., Kumar M., Dewan A. Sophisticated interplay of operating conditions governs flow field transition and optimal conversion inside tangentially fired gasifiers. *Energy*. 2022; 252:123975.
18. Nazzal I.T., Ertunç Ö. Influence of turbulent flow characteristics on flame behaviour in diffuser combustors. *Energy*. 2019; 170:652-667.
19. Mohanan J.N., Sundaramoorthy K., Sankaran A. Performance improvement of a low-power wind turbine using conical sections. *Energies*. 2021; 14(17):5233.
20. Zou A., Chassaing J.-C., Li W., Gu Y., Sauret E. Quantified dense gas conical diffuser performance under uncertainties by flow characteristic analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 161:114158.
21. Tanasa C., Bosioc A., Stuparu A., Muntean S., Susan-Resiga R. A Perspective Review of Passive Techniques Applied to Control the Swirling Flow Instabilities from the Conical Diffuser of Hydraulic Turbines. *Applied Mechanics Reviews*. 2023; 75(6):060801.
22. Buron J.-D., Houde S., Deschênes C. Statistical and spectral analysis of the bulb conical diffuser flow. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. 2020; 13(1):79-89.
23. Ning C., Cao P., Gong X., Zhu R. Optimization of Sweep and Blade Lean for Diffuser to Suppress Hub Corner Vortex in Multistage Pump. *Machines*. 2021; 9(12):316.

24. Vaz J.R.P., de Lima A.K.F., Lins E.F. Assessment of a Diffuser-Augmented Hydrokinetic Turbine Designed for Harnessing the Flow Energy Downstream of Dams. *Sustainability (Switzerland)*. 2023; 15(9):7671.

25. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows. *Instruments and experimental techniques*. 2004; 4:545-546.

26. Plotnikov L.V. Unsteady gas dynamics and local heat transfer of pulsating flows in profiled channels mainly to the intake system of a reciprocating engine. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022; 195:123144.

27. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. The Influence of Piston Internal Combustion Engines Intake and Exhaust Systems Configuration on Local Heat Transfer. *Procedia Engineering*. 2017; 206:80-85.

28. Plotnikov L.V., Brodov Yu.M., Zhilkin B.P., Grigoriev N.I. Features of the thermomechanical characteristics of pulsating flows in the gas-air ducts of turbocharged piston engines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):77-84.

29. Plotnikov L. Mathematical Description of the Aerodynamic Characteristics of Stationary Flows in a Vertical Conical Diffuser When Air Is Supplied through Various Tube Configurations. *Axioms*. 2023; 12(3):244.

30. Zaryankin AE., Padashmoganlo T. Development and research of unevenness dampers in pipeline systems and turbomachinery paths based on mathematical modeling. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(1-2):93-110.

### **Authors of the publication**

**Leonid V. Plotnikov** – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

**Alexander F. Ryzhkov** – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

**Dmitry N. Krasilnikov** – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

**Danil A. Davydov** – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

**Vladislav A. Shurupov** – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

**Получено** 26.02.2024 г.

**Отредактировано** 06.03.2024 г.

**Принято** 01.04.2024 г.



## ВЛИЯНИЕ ЛУЧИСТЫХ ТЕПЛОПОТЕРЬ НА УСЛОВИЯ ПЛАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА С ВНУТРЕННИМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ

Донской И.Г.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия  
ORCID: 0000-0003-2309-8461 donskey.chem@mail.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в получении приближенных аналитических и численных решений для задачи определения теплового состояния элементов теплоэнергетического оборудования, например, перспективных устройств для хранения тепловой энергии и химических реакторов. ЦЕЛЬ. Рассмотреть поведение стационарных решений системы уравнений теплопроводности в области с внутренним тепловыделением. Определить условия начала и окончания плавления, а также зависимость этих условий от интенсивности лучистых теплопотерь на внешней границе. Исследовать влияние отдельных факторов на положение границы раздела фаз. МЕТОДЫ. При решении используются численные методы: для известного вида решения определяются коэффициенты таким образом, чтобы выполнялись граничные условия (в общем случае, нелинейные). Для нахождения коэффициентов используется метод Ньютона. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе получены зависимости между параметрами теплообмена (коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи) и положением границы фазового перехода в цилиндрическом образце. Полученные зависимости позволяют определить критические значения интенсивности тепловыделения, отвечающие началу плавления образца (появление жидкой фазы) и полному расплавлению образца (достижение температуры плавления на внешней границе). Эти зависимости сравниваются с приближенными формулами для оценки области применимости последних. ВЫВОДЫ. Проведенные расчеты позволяют определить условия начала и окончания плавления тепловыделяющего материала. Условия полного расплавления образца можно определить точно. Условия начала плавления получены в виде нелинейного уравнения, единственный физический (т.е. действительный и положительный) корень которого дает критическое значение интенсивности тепловыделения. В линейном приближении можно получить упрощенную формулу, связывающую критическое значение интенсивности тепловыделения с лучистыми теплопотерями.

**Ключевые слова:** задача Стефана; теплопроводность; фазовые переходы; радиационный теплообмен; критические условия

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур".

**Для цитирования:** Донской И.Г. Влияние лучистых теплопотерь на условия плавления материала с внутренним тепловыделением // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 173-183. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-173-183.

## THE INFLUENCE OF RADIANT HEAT LOSS ON THE MELTING CONDITIONS OF A MATERIAL WITH INTERNAL HEAT RELEASE

Donskoy IG.

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia  
ORCID: 0000-0003-2309-8461 donskey.chem@mail.ru

**Abstract:** The RELEVANCE of the study lies in obtaining approximate analytical and numerical solutions for the problem of estimating the thermal state of thermal power

equipment elements, such as thermal storage units and promising chemical reactors. The PURPOSE is to investigate the behavior of stationary solutions of heat conduction equations system in a space domain with internal heat release; to determine the conditions for the start and completion of melting, as well as the dependence of these conditions on the intensity of radiant heat loss at the outer boundary; to study the influence of individual factors on the phase boundary position. METHODS. Numerical methods are used: for a known type of solution, the coefficients are determined in such a way that the boundary conditions (in the general case, nonlinear) are satisfied. Newton's method is used to find the coefficients. RESULTS. The relationships between heat transfer parameters (convective and radiant heat transfer coefficients) and the phase transition boundary position in a cylindrical sample are obtained. These dependences allow to determine the critical values of the heat release intensity corresponding to the beginning of the sample melting (appearance of the liquid phase) and the complete sample melting (reaching the melting temperature at the outer boundary). These dependencies are compared with approximate formulas to assess the range of applicability of the latter. CONCLUSION. The presented calculations give the conditions for the beginning and end of melting of the heat-generating material. The conditions for complete melting of the sample can be determined accurately. The conditions for the onset of melting are obtained in the form of a nonlinear equation, the only physical (i.e., real and positive) root of which gives the critical value of the heat release intensity. In a linear approximation, a simplified formula can be obtained that relates the critical value of heat release intensity to radiant heat loss.

**Keywords:** Stefan problem; heat conduction; phase transitions; radiative heat transfer; critical conditions.

**Acknowledgments:** The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0005) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center.

**For citation:** Donskoy IG. The influence of radiant heat loss on the melting conditions of a material with internal heat release. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (3): 173-173. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-173-183.

### **Введение (Introduction)**

Процессы плавления часто встречаются в теплоэнергетике [1, 2] и технологии материалов [3, 4]. В зависимости от приложений, плавление может быть целевым (например, при запасании энергии [5]) или неблагоприятным (при разрушении оболочек [6]) процессом. Тогда условия плавления (предельные значения тепловых потоков) дают естественные ограничения на диапазон допустимых значений управляющих параметров.

Источником нагрева может быть химическая реакция, джоулева теплота или высокочастотный нагрев. В зависимости от конкретного механизма нагрева задача Стефана будет формулироваться по-разному. Самый простой случай – однородный нагрев области с постоянной интенсивностью. Такое приближение, однако, уже представляет практический интерес для оценки границ безопасных режимов, например, устройств для аккумулирования тепловой и электрической энергии [7, 8].

Целью данной работы является определение критических значений интенсивности тепловыделения в цилиндрическом образце. С помощью численных методов и линейных приближенных определяется зависимость критических значений интенсивности тепловыделения от интенсивности смешанной (конвективной и лучистой) теплоотдачи. Оценивается точность приближенных формул.

Научная значимость исследования состоит в получении новых решений задачи Стефана с объемным тепловыделением при наличии лучистых теплопотерь. Задача теплопроводности с подвижной границе раздела в конечной области имеет особенности, обуславливающие существование критического параметра. Исследование этих особенностей позволит рассматривать более сложные системы, например, двух- и трехмерные (несимметричные) постановки, оценивать влияние формы области и т.д.

Практическая значимость исследования заключается в получении формул для расчета критического тепловыделения, которые могут применяться при оценке теплового состояния элементов теплоэнергетического оборудования.

Результаты работы соответствуют п. 4 паспорта специальности 2.4.6 (Процессы переноса при фазовых превращениях, радиационный теплообмен в прозрачных и

поглощающих средах).

**Литературный обзор (Literature Review)**

В настоящей работе рассматривается случай с объемным тепловыделением. Такое тепловыделение может быть связано, например, с микроволновым нагревом влажных материалов [9], химической реакцией [10], электронагревом [11], использованием концентрированного излучения [12]. Большое значение подобные процессы играют в химической технологии, где активность катализаторов часто очень чувствительна к температуре [13]. Интенсивность тепловыделения и геометрия образца определяют допустимый уровень теплоотдачи, при котором возможно стационарное протекание процесса. Условие начала плавления для образцов с простейшей геометрией дается в работах [14, 15]. Условие расплавления при конвективном охлаждении (для конечной скорости теплообмена) дается в работе [16].

Влияние лучистого переноса рассматривалось ранее в работах по фазовым переходам в проницаемых средах [17]. Если считать среду непроницаемой, то лучистый перенос влияет только на условия на внешней границе. Для целей настоящей работы можно считать, что окружающая среда однородна и изотропна. Испарение и закипание капель в высокотемпературных средах (с существенным вкладом лучистого теплообмена) теоретически исследовалось в работах [18, 19]. Условия тепловой устойчивости материалов с протекающей в объеме экзотермической химической реакцией при лучистых теплопотерях рассматривались в работах [20, 21]. Моделирование воздействия теплового излучения на горючие материалы проводилось в работах [22, 23]. Приближенные методы решения задачи теплопроводности в цилиндре предложены в работах [24, 25].

Из-за сложностей, возникающих при решении таких задач, большая часть исследований связана с применением численных кодов для расчета конкретных тепловыделяющих элементов. Немногие работы содержат более общие постановки, которые, однако, неизбежно оказываются очень упрощенными. Тем не менее, качественные закономерности (а иногда и аналитические решения), которые позволяют провести исследования упрощенных моделей, оказываются полезными при анализе более сложных систем. Поэтому в настоящей работе мы рассматриваем упрощенную постановку задачи Стефана и ищем решение этой задачи в виде явных формул, дающих, по крайней мере, качественные закономерности.

**Материалы и методы (Materials and methods)**

*Система уравнений теплопереноса в плавящемся образце*

Рассмотрим одномерную стационарную задачу Стефана в цилиндрическом образце:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \lambda_s \frac{dT}{dr} \right) + W = 0, \quad r > r_m, \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \lambda_l \frac{dT}{dr} \right) + W = 0, \quad r < r_m. \quad (2)$$

Здесь  $r$  – пространственная координата (расстояние от оси симметрии),  $T$  – температура,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $W$  – интенсивность тепловыделения (предполагается, что тепловыделение равномерно распределено по образцу),  $r_m$  – координата раздела фаз, индексы  $s$  и  $l$  относятся соответственно к твердой фазе и к жидкой фазе (расплаву).

Граничные условия на оси симметрии и на внешней границе записываются следующим образом:

$$\frac{dT}{dr}(0) = 0, \quad -\lambda \frac{dT}{dr}(R) = \alpha [T(R) - T_0] + \varepsilon \sigma [T^4(R) - T_0^4]. \quad (3)$$

Здесь  $R$  – радиус цилиндра,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\varepsilon$  – степень черноты,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $T_0$  – температура окружающей среды.

Принятое приближение существенным образом зависит от симметрии образца и возможности представления его спектральных характеристик параметрами черного тела. Поэтому для более точных расчетов радиационных потерь, вообще говоря, нужно детальнее рассматривать условия на излучающей границе (в том числе, учитывать геометрию полости, в которой находится излучающий образец). В настоящей работе эти детали для упрощения не учитываются.

Помимо условий (3) задачу необходимо дополнить условием на границе фазового перехода. Для стационарных условий это равенство температур и тепловых потоков:

$$\lambda_l \frac{dT}{dr}(r_m^-) = \lambda_s \frac{dT}{dr}(r_m^+), T(r_m) = T_m, \quad (4)$$

где  $T_m$  – температура плавления материала.

Используя характерную разность температур  $\Delta T = T_m - T_0$ , можно привести уравнения и условия (1)-(4) к безразмерной форме:

$$\frac{1}{\xi} \frac{d}{d\xi} \left( \xi \frac{d\theta}{d\xi} \right) + Q = 0, \quad \xi > \xi_m, \quad (1a)$$

$$\frac{\kappa}{\xi} \frac{d}{d\xi} \left( \xi \frac{d\theta}{d\xi} \right) + Q = 0, \quad \xi < \xi_m, \quad (2a)$$

$$\frac{d\theta}{d\xi}(0) = 0, \quad -\frac{d\theta}{d\xi}(1) = Bi\theta(1) + \frac{Bo}{\varphi} \left\{ [1 + \varphi\theta(1)]^4 - 1 \right\}, \quad (3a)$$

$$\kappa \frac{d\theta}{d\xi}(\xi_m^-) = \frac{d\theta}{d\xi}(\xi_m^+), \quad \theta(\xi_m) = 1. \quad (4a)$$

В уравнениях (1a)-(4a) используются следующие безразмерные параметры:

$$\xi = \frac{r}{R}, \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, \quad Q = \frac{WR^2}{\lambda_s(T_m - T_0)},$$

$$\kappa = \frac{\lambda_l}{\lambda_s}, \quad Bi = \frac{\alpha R}{\lambda_s}, \quad Bo = \frac{\varepsilon \sigma T_0^3 R}{\lambda}, \quad \varphi = \frac{T_m - T_0}{T_0}.$$

Особенностью задачи является существование критических условий: при фиксированных внешних условиях и меняющейся интенсивности тепловыделения существуют два критических значения  $Q$ , соответствующие началу плавления образца  $Q_{min}$  (т.е. достижению в его центре температуры плавления) и полному расплавлению образца  $Q_{max}$  (т.е. достижению температуры плавления на его внешней границе). При фиксированной интенсивности тепловыделения роль критического параметра играет интенсивность теплоотдачи. Задача (1a)-(4a) для случая  $Bo = 0$  изучалась в работах [12, 13], в частности, были получены условия начала плавления и зависимость координаты раздела фаз от интенсивности тепловыделения. В настоящей работе эти результаты обобщаются на случай лучистых теплопотерь. Как видно из (3a), по сравнению с задачей конвективного охлаждения, рассмотренной в работе [15], появляются два новых параметра – число Больцмана  $Bo$  и абсолютный ноль температуры в выбранных масштабах  $-\varphi^{-1}$ . Параметр  $\varphi$  пропорционален числу Стефана, при  $\varphi = 0$  температура среды равна температуре фазового перехода, поэтому условия расплавления заведомо достигаются.

В указанных работах приводится обобщенное решение уравнения (1a), которое является основой всего анализа:

$$\theta = -\frac{Q}{4} \xi^2 + b \ln \xi + c. \quad (5)$$

Здесь постоянные  $b$  и  $c$  зависят от граничных условий. Градиент температуры равен:

$$\frac{d\theta}{d\xi} = -\frac{Q}{2} \xi + \frac{b}{\xi}. \quad (6)$$

В стационарном случае отношение теплопроводностей  $\kappa$  и число Стефана  $St$  не влияют на критические условия, хотя существенно влияют на скорость плавления. Динамические особенности задачи в данной работе не рассматриваются, хотя они часто оказываются наиболее важными для практических приложений [16, 26-28].

### Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

#### Определение критических значений интенсивности тепловыделения

Условие расплавления образца – это достижение температурой поверхности температуры плавления,  $\theta(1) = 1$ . Этот факт позволяет наиболее простым образом определить критическое значение интенсивности тепловыделения  $Q_{max}$ , соответствующее расплавлению образца. Условие на внешней границе из (3a) запишется следующим образом:

$$\frac{Q_{max}}{2} + b = Bi + \frac{Bo}{\varphi} \left[ (1 + \varphi)^4 - 1 \right]. \quad (7)$$

Можно видеть, что при полном расплавлении весь образец от центра до внешней

границы занят жидкой фазой, т.е.  $\zeta_m = 1$ , и градиент (6) должен быть равен нулю на оси по первому условию из (3а), а значит,  $b = 0$ . Тогда критическое значение интенсивности тепловыделения равно:

$$Q_{max} = 2Bi + 2Bo \frac{(1+\varphi)^4 - 1}{\varphi}. \quad (7a)$$

При  $Bo = 0$  это выражение дает результат работы [15]. Второе слагаемое в правой части (7а) имеет резкую степенную от  $\varphi$ , но в области малых значений дробь примерно равна 4. С ростом  $\varphi$  ( $\varphi > 0$ ) значение  $Q_{max}$  возрастает.

Более сложной задачей является оценка интенсивности тепловыделения, соответствующего началу плавления образца. В этом случае задача теплопроводности снова является однофазной, и  $b = 0$ . Условие начала плавления  $\theta(0) = 1$  дает условие  $c = 1$ . Тогда для внешней границы должно выполняться условие:

$$\frac{Q_{min}}{2} = Bi \left(1 - \frac{Q_{min}}{4}\right) + \frac{Bo}{\varphi} \left\{ \left[1 + \varphi \left(1 - \frac{Q_{min}}{4}\right)\right]^4 - 1 \right\}. \quad (8)$$

Представленное уравнение четвертой степени при дополнительном условии положительности  $Q_{min}$  дает зависимость критической интенсивности тепловыделения от параметров  $Bi$ ,  $Bo$  и  $\varphi$ . Можно, однако, упростить формулу, если использовать предположение о том, что температура поверхности в начале плавления мало отличается от температуры окружающей среды. Тогда, разлагая второе слагаемое правой части (8) в ряд по температуре, можно получить приближенное выражение:

$$Q_{min} \approx 4 \frac{Bi + 4Bo}{2 + Bi + 4Bo}. \quad (9)$$

При  $Bo = 0$  формула (9) переходит в точный результат для случая конвективной теплоотдачи [15]. Принятое приближение приводит к тому, что  $Q_{min}$  не зависит от  $\varphi$ , хотя, как показывают расчеты, эта зависимость может быть существенной, особенно при малых  $Bi$ .

На рис. 1 показана зависимость  $Q_{min}$  от  $Bo$  для трех разных значений  $Bi$  при  $\varphi = 10$ . Данные получены при решении уравнения (8) методом Ньютона (как указывалось выше, при  $\varphi > 0$  лучистое слагаемое имеет строго положительную производную, поэтому численные методы быстро сходятся). Видно, что при малых  $Bo$  величина  $Q_{min}$  имеет постоянное значение, зависящее от  $Bi$  [15]; при больших  $Bo$  переходит к предельному значению  $Q_{min} = 4$ ; в области промежуточных значений наблюдается довольно резкий переход между этими двумя значениями.

На рис. 2 показана зависимость  $Q_{min}$  от  $\varphi$  при  $Bi = 10$ : видно, что с уменьшением  $\varphi$  кривые ожидаемо сходятся к линейному приближению (9). Уже при  $\varphi = 1$  отличие точного значения  $Q_{min}$  от рассчитанного по приближенной формуле не превышает 1%.

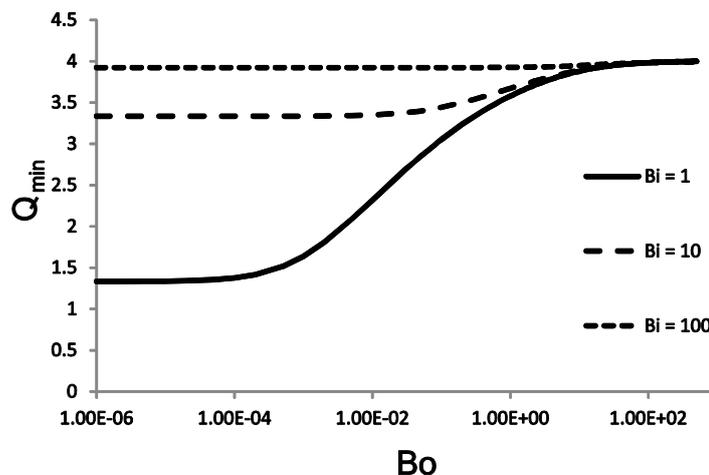


Рис. 1. Зависимость критической интенсивности тепловыделения от числа Больцмана при разных числах Био ( $\varphi = 10$ )

Fig. 1. Dependence of critical heat source intensity on Boltzmann number under different Biot numbers ( $\varphi = 10$ )

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

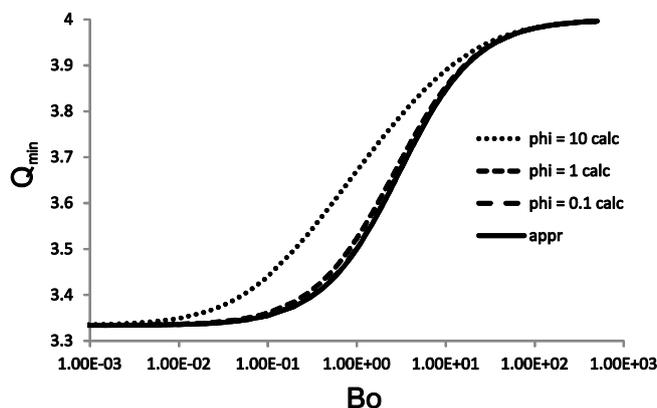


Рис. 2. Зависимость критической интенсивности тепловыделения от параметра  $\varphi$  (число Био равно 10) *Fig. 2. Dependence of critical heat source intensity on parameter  $\varphi$  (Biot number is equal to 10)*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

*Положение границы фазового перехода*

Последний вопрос, который необходимо решить, это определение зависимости положения границы фазового перехода от условий теплообмена. Нелинейное граничное условие приводит к сложным формулам для  $\xi_m$ , поэтому в настоящей работе используется численно-аналитический подход.

Решение для распределения температуры в области расплава с фиксированной границей можно записать в следующем виде:

$$\theta = -\frac{Q}{4\kappa} \xi^2 + 1 + \frac{Q}{4\kappa} \xi_m^2, \quad \xi < \xi_m. \tag{10}$$

Тепловой поток на границе фазового перехода со стороны расплава равен:

$$-\kappa \frac{d\theta}{d\xi}(\xi_m^-) = \frac{Q}{2} \xi_m. \tag{11}$$

Тогда из первого условия (4а) следует, что для области, занятой твердой фазой, коэффициент  $b$  в (5) снова равен 0. Определяя коэффициент  $c$  из второго условия (4а), получаем итоговое выражение:

$$\frac{Q}{2} = Bi \left[ 1 + \frac{Q}{4} (\xi_m^2 - 1) \right] + \frac{Bo}{\varphi} \left( \left\{ 1 + \varphi \left[ 1 + \frac{Q}{4} (\xi_m^2 - 1) \right] \right\}^4 - 1 \right). \tag{12}$$

Видно, что уравнение (12) обобщает формулы (7) и (8), которые являются ее частными случаями при крайних значениях  $\xi_m$ . Применяя, как и в прошлый раз, линейное приближение, получим приближенное выражение для  $\xi_m$ :

$$\xi_m \approx \sqrt{1 - \frac{4}{Q} + \frac{2}{Bi + 4Bo}}. \tag{13}$$

Можно показать, что для случаев плоской и шаровой симметрии выражение (13) может быть обобщено следующим образом:

$$\xi_m \approx \sqrt{1 - \frac{2(n+1)}{Q} + \frac{2}{Bi + 4Bo}}, \tag{13a}$$

где новый параметр  $n$  определяется порядком зависимости поверхности образца от линейного размера. Из уравнения (13а) можно получить приближенные формулы для  $Q_{min}$  и  $Q_{max}$  с плоской и шаровой симметрией.

Зависимость положения границы фазового перехода от параметров лучистого теплообмена для  $Q = 20$  и  $Bi = 10$  (критические условия расплавления образца при  $Bo = 0$ ) показана на рис. 3 (данные получены численным решением уравнения (12)). При малых  $\varphi$ , как и в предыдущем случае, зависимость (12) стремится к приближенному решению (13). В пределе больших  $Bo$  координата  $\xi_m$  стремится к предельному значению для граничных условий первого рода [14], которое для выбранных условий равно 0.894.

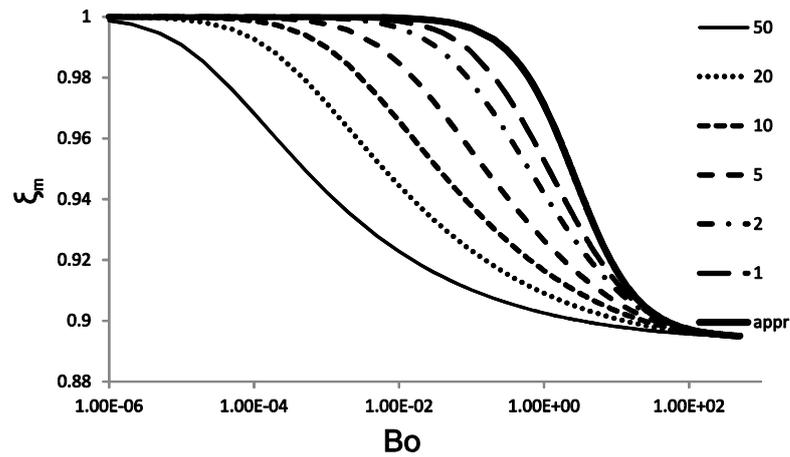


Рис. 3. Зависимость положения границы раздела фаз от числа Больцмана и параметра  $\varphi$  (числа на легенде) *Fig. 3. Dependence of phase boundary position on Boltzmann number and parameter  $\varphi$  (numbers on the legend)*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Полученные результаты позволяют рассчитывать положение границы раздела фаз в тепловыделяющих элементах. Возмущение, вносимое лучистым теплопереносом, исчезает в предельных случаях, когда граничное условие превращается в условие первого рода (постоянная температура на границе) или условие чисто конвективной теплоотдачи. Расчетные зависимости могут быть использованы для расчета тепловыделяющих элементов, например, размеров тепловых аккумуляторов и нужной тепловой мощности [29, 30], а также для упрощенной оценки радиационных поправок на границы устойчивых режимов использования электрохимических аккумуляторов [31].

Необходимо отметить ограничения применимости результатов. Во-первых, все зависимости получены для постоянных значений теплофизических свойств материала. Во-вторых, жидкая фаза при неоднородном распределении температуры может стать конвективно неустойчивой [32]. В-третьих, для практики большое значение играют нестационарные режимы прогрева и расплавления, которые в работе не рассматриваются (некоторые особенности обсуждаются в работах [2, 33]). Наконец, тепловыделение может быть неоднородным или чувствительным к температуре. В этих случаях результаты настоящей работы могут быть лишь приближением, точность которого зависит от условий протекания процессов теплопереноса.

#### **Выводы (Conclusions)**

В работе исследованы особенности решений стационарной задачи Стефана в тепловыделяющем цилиндрическом образце с конвективными и лучистыми теплопотерями на внешней границе. Получены уравнения для расчета критических значений интенсивности тепловыделения. Показано, что приближенные методы достаточно хорошо описывают зависимости между параметрами задачи при малой относительной разности между температурой фазового перехода и температурой окружающей среды.

#### **Литература**

1. Rocha T.T.M., Trevizoli P.V., de Oliveira R.N. A timeline of the phase-change problem for latent thermal energy storage systems: A review of theoretical approaches from the 1970-s to 2022 // *Solar Energy*. 2023. V. 250. P. 248-284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.035>
2. Tang J., Huang M., Zhao Y., Maqsood S., Ouyang X. Numerical investigations on the melting process of the nuclear fuel rod in RIAs and LOCAs // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 124. P. 990-1002. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.001>
3. Aldushin A.P., Matkowsky B.J., Shkadinsky K.G., Shkadinskaya G.V., Volpert V.A. Combustion of Porous Samples with Melting and Flow of Reactants // *Combustion Science and Technology*. 1994. V. 99. P. 313-343. <https://doi.org/10.1080/00102209408935439>
4. Chen Y., Lee S., Tahmasebi A., Bai J., Mahoney M., Yu J. A review of the state-of-the-art research on carbon structure evolution during the coking process: From plastic layer chemistry to 3D carbon structure establishment // *Fuel*. 2020. V. 271. P. 117657. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117657>
5. Фецов С.С., Луценко Н.А. Численный анализ влияния геометрии боковых стенок на эффективность тепловых аккумуляторов на основе гранулированных материалов с фазовыми

- переходами // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13 № 2. С. 189-204. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.2.15>
6. Гальбурт В.А., Иванов М.Ф., Минеев В.Н. и др. Воздействие взрыва водорода на защитную оболочку реакторного газа АЭС // Математическое моделирование. 2002. Т. 14. № 1. С. 73-86.
7. Mallick S., Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – A critical review // Journal of Energy Storage. 2023. V. 62. P. 106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>
8. Antonov D.V., Nizovtsev M.I., Shchepakina E.A., et al. Heat transfer through a three-layer wall considering the contribution of phase change: A novel approach to the modelling of the process // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. V. 226. P. 125500. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125500>
9. Kulkarni A., Mishra G., Palla S., et al. Advances in Computational Fluid Dynamics Modeling for Biomass Pyrolysis: A Review // Energies. 2023. V. 16. P. 7839. <https://doi.org/10.3390/en16237839>
10. Diaconu B., Cruceru M., Anghelescu L. Fire Retardance Methods and Materials for Phase Change Materials: Performance, Integration Methods, and Applications—A Literature Review // Fire. 2023. V. 6. P. 175. <https://doi.org/10.3390/fire6050175>
11. Ledakowicz S., Piddubniak O. The Non-Stationary Heat Transport inside a Shafted Screw Conveyor Filled with Homogeneous Biomass Heated Electrically // Energies. 2022. V. 15. P. 6164. <https://doi.org/10.3390/en15176164>
12. Углов А.А., Сагединов О.Г. О решении задачи Стефана при объемном тепловыделении // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. № 1. С. 28-31.
13. Argyle M.D., Bartholomew C.H. Heterogeneous Catalyst Deactivation and Regeneration: A Review // Catalysts. 2019. V. 5. P. 145-269. <https://doi.org/10.3390/catal5010145>
14. Crepeau J.C., Siahpush A., Spotten B. On the Stefan problem with volumetric energy generation // Heat and Mass Transfer. 2009. V. 46. P. 119. <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0550-5>
15. Alsulami R.A., Zope T.M., Premnath K., Aljaghtham M. Convectively cooled solidification in phase change materials in different configurations subject to internal heat generation: Quasi-steady analysis // Applied Thermal Engineering. 2023. V. 221. P. 119849. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119849>
16. Fornarelli F., Camporeale S.M., Fortunato B. Simplified theoretical model to predict the melting time of a shell-and-tube LHTES // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 153. P. 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.130>
17. Рубцов Н.А., Слепцов С.Д., Саввинова Н.А. Численное моделирование однофазной задачи Стефана в слое с прозрачными и полупрозрачными границами // ПМТФ. 2006. Т. 47. № 3. С. 84-91.
18. Sazhin S.S. Droplets and sprays: simple models of complex processes. Springer, 2022. 600 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99746-5>
19. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Kostoreva Zh.A., et al. Analysis of the influence of the type of heat transfer on the dynamics of the ignition processes of wood biomass particles under complex heating conditions // Combustion and Flame. 2024. V. 262. P. 113353. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113353>
20. Калинчук В.В., Черненко А.С., Сафронков А.Н., Калугин В.В. Два предела по диаметру частицы катализатора, определяющих высокотемпературный тепломассообмен с активной газовой смесью // Физика аэродисперсных систем. 2010. № 47. С. 5-15.
21. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю., Журавский А.В. Условия теплового взрыва в пластине при конвективно-радиационном теплообмене // Вестник МГТУ. Сер. Естественные науки. 2020. № 6. С. 48-59.
22. Baranovskiy N., Demikhova A. Mathematical modeling of heat transfer in an element of combustible material when exposed to radiation from a forest fire // Safety. 2019. V. 5. No. 56. doi: 10.3390/safety5030056
23. Parot R., Rivera J.I., Reszka P., et al. A simplified analytical model for radiation dominated ignition of solid fuels exposed to multiple non-steady heat fluxes // Combustion and Flame. 2022. V. 237. P. 111866. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111866>
24. Видин Ю.В., Казаков Р.В., Злобин В.С. Процесс переноса тепла в двухслойном цилиндрическом теле // Известия ВУЗов. Проблем энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 93-98. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-93-98>
25. Котова Е.В., Клеблеев Р.М., Кудинов В.А. Об одном методе определения собственных чисел в задачах теплопроводности для цилиндра // Известия ВУЗов. Проблем энергетики. 2023. Т. 25 № 4. С. 71-82. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-4-71-82>
26. Neri M. Numerical simulation of PCM-based storage units to be integrated into commercial hot water storage tank. Master thesis. Politecnico di Torino, 2019. 97 p.

27. Донской И.Г. Математическое моделирование образования агломератов в реагирующей пористой среде с меняющейся проницаемостью // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 2. С. 22-35.
28. Карташов Э.М., Соловьев И.А. Стохастическая постановка задачи Стефана в гиперболическом представлении // Известия ВУЗов. Проблем энергетики. 2019. Т. 21. № 3-4. С. 116-126. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-116-126>
29. Mohammed H.I., Talebizadehsardari P., Mahdi J.M., Arshad A., Sciacovelli A., Giddings D. Improved melting of latent heat storage via porous medium and uniform Joule heat generation // Journal of Energy Storage. 2020. V. 31. P. 101747. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101747>
30. Shrivastava A., Williams B., Siahpush A.S., Savage B., Crepeau J. Numerical and experimental investigation of melting with internal heat generation within cylindrical enclosures // Applied Thermal Engineering. 2014. V. 67. P. 587-596. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.039>
31. Mallick S., Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – A critical review // Journal of Energy Storage. 2023. V. 62. P. 106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>
32. Crepeau J., Siahpush A.S. Solid–liquid phase change driven by internal heat generation // Comptes Rendus Mecanique. 2012. V. 340. P. 471-476. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.03.004>
33. An C., Moreira F.C., Su J. Thermal analysis of the melting process in a nuclear fuel rod // Applied Thermal Engineering. 2014. V. 68. P. 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.005>

#### Авторы публикации

**Донской Игорь Геннадьевич** – канд. техн. наук (05.14.01), старший научный сотрудник лаборатории термодинамики ИСЭМ СО РАН. *ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-2309-8461>.  
*Email*: [donskoy.chem@mail.ru](mailto:donskoy.chem@mail.ru)

#### References

1. Rocha TTM, Trevizoli PV, de Oliveira RN. A timeline of the phase-change problem for latent thermal energy storage systems: A review of theoretical approaches from the 1970-s to 2022. *Solar Energy*. 2023; 250:248-284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.035>
2. Tang J, Huang M, Zhao Y, Maqsood S, Ouyang X. Numerical investigations on the melting process of the nuclear fuel rod in RIAs and LOCAs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018; 124:990-1002. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.001>
3. Aldushin AP, Matkowsky BJ, Shkadinsky KG, Shkadinskaya GV, Volpert VA. Combustion of Porous Samples with Melting and Flow of Reactants. *Combustion Science and Technology*. 1994; 99:313-343. <https://doi.org/10.1080/00102209408935439>
4. Chen Y, Lee S, Tahmasebi A, Bai J, Mahoney M, Yu J. A review of the state-of-the-art research on carbon structure evolution during the coking process: From plastic layer chemistry to 3D carbon structure establishment. *Fuel*. 2020; 271:117657. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117657>
5. Fetsov SS, Lutsenko NA. Numerical analysis of the influence of side wall shape on the efficiency of thermal energy storages based on granular phase change materials. *Computational Continuum Mechanics*. 2020; 13(2):189-204. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.2.15>
6. Gal'burt VA, Ivanov MF, Mineev VN, et al. Action of hydrogen explosion on reactor hall safety containment. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2002; 14(1):73-86.
7. Mallick S, Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – A critical review. *Journal of Energy Storage*. 2023; 62:106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>
8. Antonov DV, Nizovtsev MI, Shchepakina EA, et al. Heat transfer through a three-layer wall considering the contribution of phase change: A novel approach to the modelling of the process. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2024; 226:125500. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125500>
9. Kulkarni A, Mishra G, Palla S, et al. Advances in Computational Fluid Dynamics Modeling for Biomass Pyrolysis: A Review. *Energies*. 2023; 16:7839. <https://doi.org/10.3390/en16237839>
10. Diaconu B, Cruceru M, Angheliescu L. Fire Retardance Methods and Materials for Phase Change Materials: Performance, Integration Methods, and Applications—A Literature Review. *Fire*. 2023; 6:175. <https://doi.org/10.3390/fire6050175>
11. Ledakowicz S, Piddubniak O. The Non-Stationary Heat Transport inside a Shafted Screw Conveyor Filled with Homogeneous Biomass Heated Electrically. *Energies*. 2022; 15:6164. <https://doi.org/10.3390/en15176164>
12. Uglov AA, Sagdedinov OG. On the solution of Stefan problem under volumetric heat generation. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 1992; 18(1):28–31

13. Argyle MD, Bartholomew CH. Heterogeneous Catalyst Deactivation and Regeneration: A Review. *Catalysts*. 2019; 5:145-269. <https://doi.org/10.3390/catal5010145>
14. Crepeau JC, Siahpush A, Spotten B. On the Stefan problem with volumetric energy generation. *Heat and Mass Transfer*. 2009; 46:119. <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0550-5>
15. Alsulami RA, Zope TM, Premnath K., Aljaghtham M. Convectively cooled solidification in phase change materials in different configurations subject to internal heat generation: Quasi-steady analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 221:119849. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119849>
16. Fornarelli F, Camporeale SM, Fortunato B. Simplified theoretical model to predict the melting time of a shell-and-tube LHTEs. *Applied Thermal Engineering* 2019; 153:51-57. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.130>
17. Rubtsov NA, Sleptsov SD, Savvinova, NA. Numerical modeling of the single-phase Stefan problem in a layer with transparent and semitransparent boundaries. *J Appl Mech Tech Phys* 2006; 47:377–383. <https://doi.org/10.1007/s10808-006-0065-5>
18. Sazhin SS. *Droplets and sprays: simple models of complex processes*. Springer, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99746-5>
19. Kuznetsov GV, Syrodoy SV, Kostoreva ZhA, et al. Analysis of the influence of the type of heat transfer on the dynamics of the ignition processes of wood biomass particles under complex heating conditions. *Combustion and Flame* 2024; 262:113353. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113353>
20. Kalinchak VV, Chernenko AS, Safronov AN, Kalugin VV. Two limits of catalyst particle diameter that determine high-temperature heat and mass transfer with active gas mixture. *Fizika arrodispersnykh sistem* 2010; 47:5-15.
21. Zarubin VS, Kuvyrkin GN, Savelieva IYu, Zhuravskiy AV. Conditions of thermal explosion in a plate under convective-radiative heat transfer. *Vestnik MGTU. Ser. Estestvennye nauki* 2020; 6:48-59.
22. Baranovskiy N, Demikhova A. Mathematical modeling of heat transfer in an element of combustible material when exposed to radiation from a forest fire. *Safety* 2019; 5:56. DOI: 10.3390/safety5030056
23. Parot R, Rivera JI, Reszka P, et al. A simplified analytical model for radiation dominated ignition of solid fuels exposed to multiple non-steady heat fluxes. *Combustion and Flame* 2022; 237:111866. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111866>
24. Vidin UV, Kazakov RV, Zlobin VS. The process of heat transfer in two-layered cylindrical body. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018; 20(11-12):93-98. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-93-98>
25. Kotova EV, Klebleev RM, Kudinov VA. Method for determining eigen numbers in heat conduction problems for a cylinder. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(4):71-82. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-4-71-82>
26. Neri M. *Numerical simulation of PCM-based storage units to be integrated into commercial hot water storage tank*. Master thesis. Politecnico di Torino, 2019.
27. Donskoy .G. Mathematical modelling of the agglomeration in a reactive porous medium with variable permeability. *Computational Technologies*. 2020; 25(2):22-35. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.2.003
28. Kartashov EM, Soloviev IA. The stochastic formulation of the Stephan’s problem in hyperbolic representation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(3-4):116-126. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-116-126>
29. Mohammed HI, Talebizadehsardari P, Mahdi JM, Arshad A, Sciacovelli A, Giddings D. Improved melting of latent heat storage via porous medium and uniform Joule heat generation. *Journal of Energy Storage*. 2020; 31:101747. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101747>
30. Shrivastava A, Williams B, Siahpush AS, Savage B, Crepeau J. Numerical and experimental investigation of melting with internal heat generation within cylindrical enclosures. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 67:587-596. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.039>
31. Mallick S, Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – A critical review. *Journal of Energy Storage*. 2023; 62:106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>
32. Crepeau J, Siahpush AS. Solid–liquid phase change driven by internal heat generation. *Comptes Rendus Mecanique*. 2012; 340:471-476. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.03.004>
33. An C, Moreira FC, Su J. Thermal analysis of the melting process in a nuclear fuel rod. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 68:133-143. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.005>

#### Authors of the publication

**Donskoy Igor Gennadyevich** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Thermodynamics in Melentiev Energy Systems Institute

© Донской И.Г.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2309-8461>. Email: [donskoy.chem@mail.ru](mailto:donskoy.chem@mail.ru)

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

**Получено** 27.03.2024 г.

**Отредактировано** 03.05.2024 г.

**Принято** 30.05.2024 г.



## ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ В ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ОБЖИГА КИРПИЧЕЙ СО СВОДОВЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ГОРЕЛОК

Вафин Д.Б., Мукатдаров А.А., Мукатдарова Д.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

vafdanil@yandex.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. Несмотря на большой объем крупнопанельной и монолитной застройки современных городов уровень эстетических требований к домостроению с применением новых отделочных строительных материалов приводит и к увеличению спроса керамического кирпича. Для решения задачи национального проекта «доступное жилье» необходимо нарастить производство керамического кирпича местного производства. Для этого необходимо модернизировать существующие или строить новые кирпичные заводы. При этом желательно использовать новые технологии и способы производства, обеспечивающие качество выпускаемого кирпича. Свойства кирпича в основном формируются в процессе обжига, который в то же время является наиболее сложным и требующим большой затраты теплоты этапом производства. Необходимое качество строительной керамики во многом зависит от обеспечения определенного распределения температуры в процессе обжига во время перемещения вагонов с кирпичом вдоль туннельной печи. Поэтому работы, посвященные обеспечению необходимого распределения температуры в различных зонах туннельных печей с различными размещениями газовых горелок, являются актуальными с практической точки зрения. ЦЕЛЬЮ работы является экспериментальное определение температуры в разных местах объема туннельной печи в ходе всего перемещения вагона с кирпичами в действующей печи. МЕТОД. Датчики температуры с дистанционной передачей информации были размещены на садках кирпичей перемещаемого вдоль печи вагона, сигналы от которых регистрировались многоканальным измерителем во время всего цикла обжига. РЕЗУЛЬТАТЫ измерений представлены в виде графиков зависимостей температуры от различных датчиков в зависимости от времени процесса обжига. По результатам опытов сделаны выводы относительно улучшения качественной тепловой обработки кирпичей и уменьшения брака производства.

**Ключевые слова:** Строительная керамика; обжиг; теплота; температура; горение; теплообмен; энергия.

**Для цитирования:** Вафин Д.Б., Мукатдаров А.А., Мукатдарова Д.А. Тепловое состояние в туннельной печи обжига кирпичей со сводовым расположением горелок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 184-193. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-184-193.

## THERMAL CONDITION IN A TUNNEL BRICK KILNING KILN WITH VOCCULATED BURNERS

Vafin D.B., Mukatdarov A.A., Mukatdarova D.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vafdanil@yandex.ru

**Abstract:** Despite the large volume of large-panel and monolithic construction in modern cities, the level of aesthetic requirements for house construction using new finishing building materials also leads to an increase in the demand for ceramic bricks. To solve the problem of the national project “affordable housing” it is necessary to increase the production of locally produced ceramic bricks. To do this, it is necessary to modernize existing brick factories or build new ones. In this case, it is desirable to use new technologies and production methods that ensure the quality of the produced bricks. The properties of bricks are mainly formed during the firing process, which at the same time is the most complex and heat-intensive

production stage. The required quality of building ceramics largely depends on ensuring a certain temperature distribution during the firing process while moving cars with bricks along the tunnel kiln. Therefore, work devoted to ensuring the required temperature distribution in different zones of tunnel furnaces with different placements of gas burners is relevant from a practical point of view. **THE PURPOSE** of the work is to experimentally determine the temperature in different places of the tunnel furnace volume during the movement of the car in the operating furnace. **METHOD.** Temperature sensors with remote information transmission were placed on the brick cages of a carriage moving along the kiln, the signals from which were recorded by a multi-channel meter during the entire firing cycle. The measurement results are presented in the form of graphs of temperature dependences from various sensors depending on the time of the firing process. Based on the results of the experiments, conclusions were drawn regarding improving the quality of heat treatment of bricks and reducing production defects. версия резюме (аннотации) – независимый от статьи источник информации.

**Keywords:** Construction ceramics; burning; heat; temperature; combustion; heat exchange; energy.

**For citation:** Vafin D.B., Mukatdarov A.A., Mukatdarova D.A. Thermal condition in a tunnel brick kilning kiln with vocculated burners. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (3): 184-193. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-184-193.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время наибольшим спросом пользуются разноцветные керамические кирпичи высокого качества для отделки наружных поверхностей стен строящихся зданий. Для производства кирпичей надлежащего качества необходимо использовать передовые технологии, современные методы и оптимальные способы производства. Наиболее ответственным и наибольшим потреблением теплоты процессом при производстве кирпича является процесс обжига. В процессе высокотемпературной обработки кирпича-сырца и формируются требуемые свойства кирпича, такие как стойкость против механических, физических и атмосферных воздействий.

Для происхождения ряда физико-химических превращений, вызывающих изменение свойств кирпича-сырца в процессе обжига необходимо поддерживать скорость подъема температуры до необходимого уровня, длительность выдержки на данном уровне, состав газовой среды и скорость охлаждения. Степень готовности керамического кирпича можно достичь как в процессе быстрого обжига при высокой конечной температуре, так и при длительном обжиге при более низкой температуре. Максимальная температура при обжиге ограничивается неравномерностью поля температуры в объеме печи и в объеме отдельного кирпича. Выдержка при максимальной температуре обеспечивает выравнивание температуры по объему кирпича и по сечению канала печи, что способствует равномерному распределению жидкой фазы в кирпиче. Поле температуры в объеме канала обжига печи зависит от конструкции печи, типа и расположения газовых горелок, так же от способа формирования садок в перемещаемых вагонах. При возникновении большой неравномерности нагрева садки увеличивается доля некачественной продукции.

Цель исследования заключается в измерении температуры в разных зонах объема действующей туннельной печи за время всего цикла обжига керамического кирпича. Научная значимость исследования заключается в установлении особенностей изменения температурного режима в объеме туннельной печи в зависимости от управляющих параметров. Это позволит в дальнейшем проверить достоверность расчетных методов для подбора режима обжига, позволяющего обеспечения требуемого качества строительной керамики. Практическая значимость исследования заключается в возможности уменьшения доли некачественного кирпича

В настоящее время для обжига строительных керамических кирпичей строятся только печи непрерывного действия такие как, кольцевые и туннельные печи. Из-за больших затрат физического труда при применении кольцевых печей, имеющейся неравномерности температуры по сечению канала обжига и из-за трудности механизации работ при проектировании отдается предпочтение туннельным печам. Туннельная печь состоит из длинного прямолинейного канала, вдоль которого перемещаются вагоны с садками обжигаемых кирпичей. Теплоноситель,

представляющий смесь продуктов сгорания газообразного топлива и воздуха движется навстречу перемещающимся вагонам. Физические и химические процессы происходят при теплообмене обтекающего перемещаемых садок кирпичей теплоносителя. Обычно условно канал туннельной печи разделяют на зону подогрева (подготовки), обжига и охлаждения (рис.1).

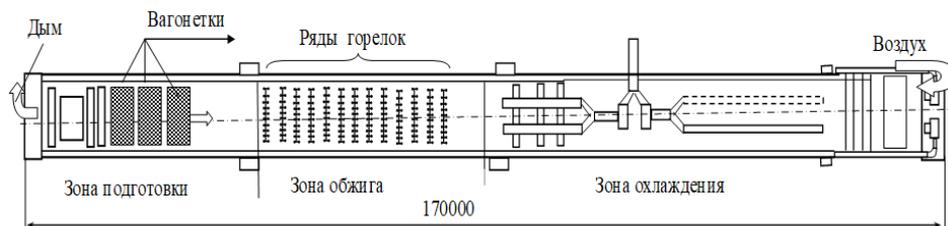


Рис. 1. Упрощенная схема туннельной печи: вид сверху Fig 1. Simplified diagram of a tunnel kiln: top view

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сквозной канал туннельной печи практически полностью заполнен вагонами с садками кирпичей. Зона обжига располагается в средней части канала, где расположены ряды скоростных газовых горелок. Имеются печи с размещением горелок на боковых стенах или на своде печи. С помощью вентилятора нагнетается воздух в конец зоны охлаждения. Нагреваясь остывающими садками кирпичей, воздух в зоне обжига участвует в процессе горения газовой смеси подаваемой через горелки. В зоне обжига кирпичи подогреваются до максимальной температуры, затем в конце зоны обжига и в начале зоны охлаждения они выдерживаются при высокой температуре, где и происходят основные физико-химические процессы. Технология получения керамических материалов известна давно, в частности она описана в работе [1] и ряде других работ, например в [2].

Загруженный вагон из сушильной камеры подается к торцу зоны охлаждения печи. и толкателем заталкивается в печь. Все вагоны, находящиеся в канале печи перемещаются на длину данного вагона. Теплообмен между садками кирпичей на вагонах и теплоносителем происходит по принципу противотока. Часть нагретого воздуха из зоны охлаждения может отбираться вентилятором для подачи в сушильную камеру. В зоне охлаждения садки кирпичей достаточно быстро остывают до температуры перехода кирпичей из пиропластического состояния в хрупкое состояние. После этого при температурах модификационных превращений кирпича интенсивность остывания уменьшается.

Некоторые вопросы технологического обжига керамического кирпича в туннельной печи и обоснование необходимости внедрения автоматизации управления туннельной печью рассмотрены в работе [3]. В работе [4] предложен метод оптимизации обжига керамического кирпича путем организации зон рециркуляции продуктов сгорания в туннельной печи с применением жаровых вентиляторов. В статье [5] рассматривается имитационное моделирование технологических процессов термической обработки. В работе [6] предлагается упрощенная математическая модель для определения температурного режима в туннельной печи для обжига керамического кирпича. В статье [7] анализируется моделирование тепловых процессов в регенеративно утилизаторах теплоты уходящих дымовых газов в туннельных печах. Некоторые вопросы установления связей между разрежением в канале туннельной печи параметрами продуктов сгорания газа через регулирующие щели дифференциальными уравнениями рассмотрены в работе [8]. Анализ работы туннельных печей в целях автоматизации управления процессом обжига кирпичей приводится в монографии [9]. В работах [10 -12] имеется анализ существующих систем автоматизации в печах обжига. Некоторые результаты численного и экспериментального исследования в канале туннельной печи приводится в работе [13]., однако конструкция данной печи существенно отличается от конструкции печи, исследованной в нашей работе. В статье [14] приводится пример использования программного комплекса Midas Civil 2011 для исследования температурного и термически напряженного состояния строительного бетона. Модель прогнозирования и управления тепловым потоком в большой доменной печи предлагается в работе [15]. Анализ методов определения температурного режима в промышленных печах и обзор литературы по этой тематике имеется в [16]. Результаты

изучения тепловых характеристик барабанных печей приводится в работе [17]. В статье [18] обсуждаются вопросы проведения опытов по измерению температуры в промышленных печах небольших размеров.

В данной работе приводятся некоторые результаты экспериментального измерения температуры в канале туннельной печи с использованием температурных датчиков, размещенных на садках кирпичей на вагонах, перемещаемых вдоль печи. Основным изделием завода, находящегося около города Казань являются кирпичи 1 НФ 250×120×65 и 1,4 НФ 250×120×88 30% пустотности. Сырьем является 3 типа глины влажностью формования 22,4% относительно сухости с относительной влажностью на выходе из сушилки меньше 3%.

Число кирпичей 1,4 НФ в перемещаемом вагоне 10752 шт. 8 штабели в загрузке и 3 загрузки/вагон.. Ритмичность работы печи в определенный момент времени равна 9,1 вагонов в день, что дает ритмичность в 53 минут на одну загрузку печи. Число кирпичей в вагоне 1НФ 14784 шт. Ритмичность в определенный момент времени также составляет 53 мин/загрузка. Длина печи примерно 172 м, внутренняя ширина канала равна 9 м. Внутри печи одновременно находится 41 вагон. Размер вагона печи 4200 мм в длину (3 загрузки) и 8845 мм в ширину. Туннель ожидания составляет 19 позиций вагона в печи.

#### Материалы и методы (Materials and methods)

Печь и туннельная сушилка работают на природном газе. Часть продуктов сгорания из систем ВТ и НТ установленных на печи рекуперации и из подвагонеточной вытяжки направляются в сушилку. Для сушилки обычно газов рекуперации хватает, хотя установлены 2 дополнительных теплогенератора. Вытяжка печи производится через щель в своде с помощью основного вентилятора с вариатором скорости и с ручной заслонкой. Имеется и вентилятор разбавления, расположенного на стенке вытяжки который включается не часто. температура вытяжки равна 98°C. Имеется подвагонеточная вытяжка из двух вытяжных дымоходов с ручной заслонкой и с вытяжной трубой. В зоне ожидания два вентилятора всасывают примерно 16,7 м<sup>3</sup>/с воздуха из пяти щелей в своде и из пяти боковых щелей для смешивания перед обжигом.

Одиннадцать обычных рядов и 2 сдвоенные ряда горелок типа BERNINI (всего 189 горелок) расположены на своде зоны обжига печи и регулируются на месте шкафом управления. Для подачи воздуха на горение природного газа используется один общий вентилятор на своде печи мощностью 7,5 кВт и еще 18 вентиляторов мощностью 3 кВт. Средний расход горелки: 0,3 кг сух.возд/с (0,3 м<sup>3</sup>/с) при 3,3 °С.

Проектная температура обжига 980 °С с выдержкой в зоне наибольшей температуры обжига от 9 до 13 ч. Для контроля процесса обжига кирпичей вдоль канала под сводом печи расположены штатные 25 термодатчики и датчики давления.

Для исследования температурного поля вдоль канала туннельной печи на садках вагона кирпичей были размещены термопары CeriDry с системой радиотелеметрии типа Datarag Kiln Tracker. Вид поперечного сечения канала туннельной печи с вагоном садками кирпичей, размещенными на них термопарами показан на рис. 2.

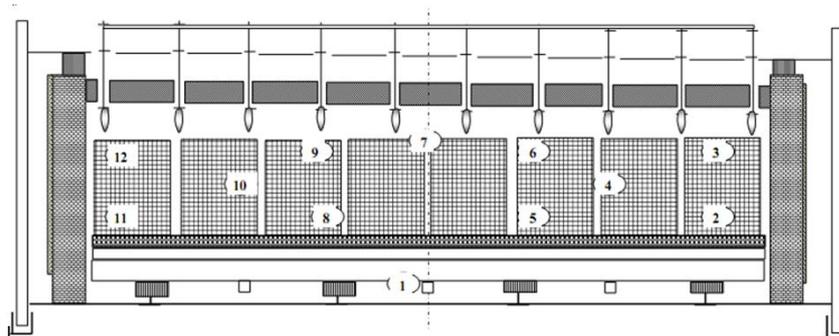


Рис. 2. Вид поперечного сечения канала печи с размещенными на садках термопарами  
 Fig. 2. Cross-sectional view of the furnace channel with thermocouples placed on the cages  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В процессе перемещения вагона вдоль всей печи сигналы высокой частоты от термопар передаются в дистанционный регистратор с персональным компьютером, который был расположен на тележке перемещающейся синхронно с вагоном рядом за пределами канала печи. С опцией FullRadio регистратор может быть настроен и считывать в режиме реального времени по беспроводной связи посредством двунаправленной радиопередачи Компьютер регистрировал данные температуры от отдельных термопар в

разные моменты времени перемещения вагона вдоль всей печи в процессе обжига. Данные считывались использованием программного обеспечения TMI-Orion Qlever. Интерфейс связи с ПК представляет собой электронное устройство, которое связывает регистратор с персональным компьютером, обеспечивая тем самым двустороннюю передачу данных в программу и чтение регистраторов.

Такие измерения проводились для нескольких проходов вагонов с кирпичами в течении определенного периода эксплуатации печи. Результаты после обработки можно получить через проводной интерфейс.

#### **Результаты и обсуждение (Results and Discussions)**

На рисунке 3 показана кривая контроля температуры в верхней части туннеля вдоль всей печи, построенная по показаниям штатных датчиков температуры, установленных под сводом туннеля в разных местах. Сплошная линия соответствует реальным значениям для данного прохода вагонов, штриховая – стандартная. По оси абсцисс показаны положения вагона вдоль печи. По этим показаниям оператор должен поддерживать необходимый температурный режим в туннеле печи. Однако датчики показывают температуру только в верхней части канала, поэтому по ним не удастся определить температуру в отдельных областях туннеля и проследить за равномерностью нагрева отдельных частей. Поэтому и было решено провести опыты по установлению температурного состояния в разных местах.

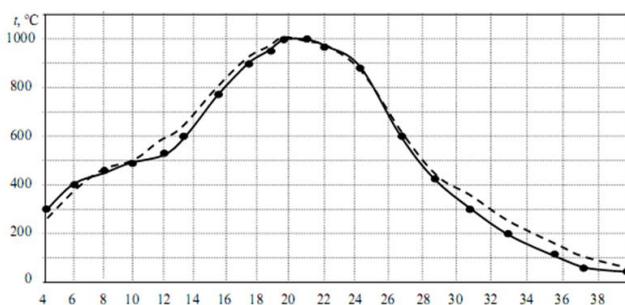


Рис. 3. График изменения температуры вдоль туннеля по показаниям штатных датчиков температуры (кривая контроля работы печи) \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 4 показаны графики изменения температуры в зависимости от времени перемещения вагона вдоль туннеля печи, построенные по данным разных термопар, места размещения которых показаны на рисунке 2. Термопара №1 размещена под вагонеткой. Термопары №3, №6, №7, №9, №12 были расположены в верхних частях садок, причем термопара №7 – над 4-й садкой с края. График, построенный по данным 7-й термопары, начерчен штрих пунктирной линией, а остальные графики верхних термопар – сплошной линией. Термопары № 2, №5, №8, №11 размещены внизу (штриховые кривые), а термопары № 4 и №10 – на середине двух садок (пунктирные кривые). Как видно из рис. 4, графики, построенные по данным термопар № 4 и №10 практически накладываются друг на друга. График, построенный по данным термопары №7 наиболее близко похож на график штатных датчиков (рис. 3).

На рисунке 5 представлены графики изменения температуры поперек туннеля в области зоны обжига печи.

Общий цикл обжига составляет от 100 до 115 часов. Ритмичность в определенный момент времени ~53 минут при средней ритмичности 49,5 минут.

Температура кирпичей и вагонов на входе в зону подготовки близки к температуре окружающей среды. На входе в печь через ворота входного шлюза вытяжным вентилятором под вагоном №1 и вентилятором печи всасывается свежий воздух. Расход утечек на входе в печь составляет около 3,2 м<sup>3</sup>/с при температуре 29 °С. Если своевременно отрегулировать высоту входной двери шлюза печи и добиться герметичности прохода толкателя на уровне ворот можно уменьшить охлаждение кирпичей свежим воздухом перед их попаданием в печь и увеличить производительность вытяжных вентиляторов.

График на рисунке 4, построенный по показаниям датчика №1 характеризует тепловое состояние подвагонеточного канала. Максимально достигнутая температура в канале 110 °С в конце зоны обжига свидетельствует об эффективности подвагонеточного

охлаждения.

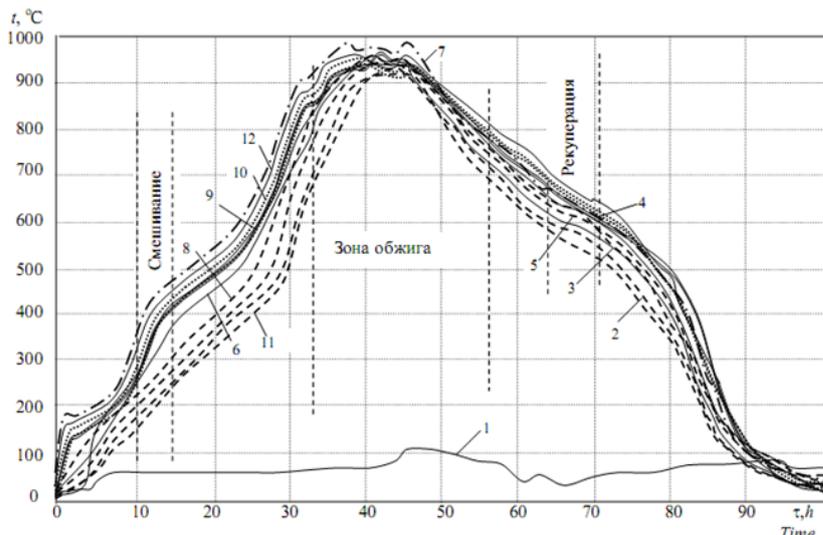


Рис. 4. Графики изменения температуры в зависимости от времени перемещения вагона по туннелю печи

Fig. 4. Graphs of temperature changes depending on the time of movement of the car through the furnace tunnel

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

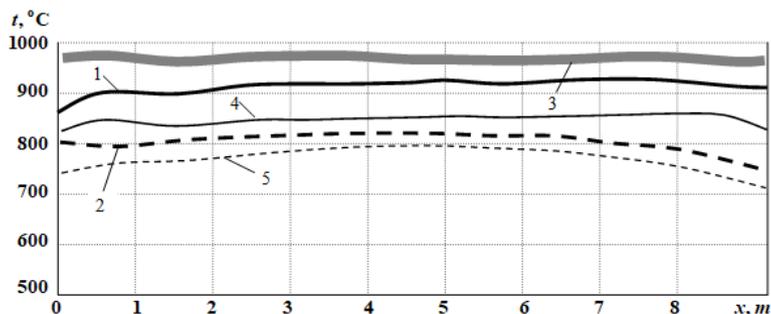


Рис. 5. Изменение температуры в поперечном сечении печи: 1, 2 – на входе в зону обжига сверху и снизу соответственно; 3 – в средней части зоны обжига; 4, 5 – на выходе из зоны обжига сверху и снизу печи соответственно

Fig. 5. The temperature change in the cross section of the furnace: 1, 2 – at the entrance to the firing area at the top and below, respectively; 3 – in the middle part of the firing zone; 4, 5 – at the exit from the firing zone at the top and below of the furnace, respectively

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 4 после входа в зону подготовки кирпичи наверху загрузки быстро нагреваются за 1 час от температуры 25 °С до 200 °С (сплошные кривые). Температуры нижних рядов загрузки начинают отставать. Перед обжигом 2 вентилятора всасывают воздух через 5 боковых щелей с одной и с другой стороны печи для подачи воздуха в 5 щелей в своде для смешения. При этом перед зоной смешения происходит некоторое выравнивание температуры низа и верха загрузки. Наверху загрузки градиент увеличения температуры втянутым с боку холодным воздухом уменьшается, а внизу загрузки кирпичи нагреваются всасываемым в своде горячим воздухом. В конце зоны подготовки температура изделий растет еще быстрее, при этом отставание температуры нижних рядов сохраняется.

После зоны смешивания перед зоной обжига разница температур между верхом и низом загрузки увеличивается, достигнув значений  $\Delta t = 250...270$  °С.

В зоне обжига достигнута максимальная температура ~996 °С, при этом разность температур поперек сечения канала и между верхом и низом загрузки уменьшается, показания всех термопар укладываются в пределах толщины кривой 3 (рис. 5). В зоне обжига не удается нагнать запаздывание температуры нижних рядов кирпичей. Вся загрузка находится при необходимой температуре выдержки только в середине зоны обжига. Это можно объяснить тем, что в порталной печи зона обжига находится в разреженном состоянии, что приводит к затруднению обжига низа загрузки. Кроме этого расположение горелок на своде приводит к уменьшению уровня температуры продуктов

сгорания внизу туннеля печи.

Быстрое охлаждение после зоны обжига состоит из рядов воздухопроводов с 5-ю соплами, что в общем составляет 40 сопел. Каждый ряд имеет вентилятор быстрого охлаждения. 5 рядов высокотемпературной рекуперации (ВТ) из полурампы по 5 стаканов на каждой, что составляет 50 стаканов в общем. Каждая полурампа ВТ обладает своей ручной заслонкой. Воздуховоды рекуперации ВТ с правой и левой стороны соединены вентилятором рекуперации ВТ. Для обеспечения ритмичности работы печи надо бы автоматизировать регулировку заслонок рампы быстрого охлаждения по температуре в зоне охлаждения.

После выхода из зоны обжига температура кирпичей остается выше температуры газов (кривая 7) Разница температуры на выходе из зоны рекуперации достигает 180 °С. Загрузки проходят точку кварцевания на выходе из зоны ВТ до зоны низкотемпературной рекуперации (НТ) с низким градиентом температуры 10 °С/ч, что способствует к уменьшению образования трещин кирпичей.

Низкотемпературная рекуперация состоит из 10 простых рядов, которые в свою очередь состоят из 2-х полурампы по 5 стаканов. На выходе из зоны рекуперации НТ вся загрузка охлаждается до температуры ниже 60 °С. За счет наддува подвагонеточного канала воздухопроводами, расположенными с двух сторон при выходе из печи кирпичи охлаждаются до температуры 30 °С.

Можно отметить, что графики типа рис. 4 при разных циклах измерений несколько отличаются, хотя общий характер изменения температуры изделий вдоль канала печи сохраняется. При этом относительное расположение графиков разных термпар также несколько меняются. Это, видимо, связано изменением внешних условий при разных циклах измерений и некоторых других факторов. Для установления влияния различных факторов на тепловое состояние в канале туннельной печи обжига предполагается смоделировать тепло и массообменные процессы по методу, описанному в работах [19, 20].

По анализу показаний приборов определено распределение теплового потребления печи: низшая теплота сгорания топлива – 6201 кВт (74 %); теплота вводимая воздухом – 2060 кВт (25%); теплота вводимая сырым кирпичом – 93 кВт (1%); теплота вводимая вагонами – 13 кВт (~0%). Итого 8365 кВт. Для производства 1 кг кирпичей затрачивается примерно 1670 кДж теплоты сгорания природного газа.

Тепловые потери (расходы): уходящими сухими дымовыми газами – 4490 кВт (54%); на испарение остаточной влаги 320 кВт (4%); на рекуперацию – 1460 кВт (18%); на керамизацию 310 (4%); утечка в подвагонеточное пространство – 930 кВт (11%); утечка через стены печи – 726 кВт (9%); теплота выходящих кирпичей – 81 кВт (~1%); теплота выходящих вагонов – 14 кВт (~0%). Итого 8332 кВт.

#### *Заключение (Conclusions)*

Для улучшения качества кирпичей для большей гибкости контроля условий обжига можно предусмотреть автоматическую регулировку вытяжки, рекупераций ВТ и НТ, температурного наддува и давления печи.

Небольшое количество кирпичей марки 1,4НФ имеют небольшие трещины, без предпочтительного местоположения в загрузке вагона. Этот дефект скорее связан формовкой или сушкой и не связан с обжигом. Для уменьшения данного типа дефекта желательно добиться совместимости разных типов глин в смеси и контролировать кривую сушки в конце процесса.

Второй тип дефекта неравномерность цвета некоторых кирпичей при выходе из печи. Этот дефект, видимо, связан с неравномерностью температуры загрузки верха и низа из-за расположения горелок на своде, и за счет недостаточности сечения каналов между рядами кирпичей на садках для циркуляции продуктов сгорания. При плановой остановки печи на ремонт можно бы расположить несколько рядов баковых горелок перед зоной обжига. Можно часть высокотемпературных продуктов сгорания из конца зоны обжига перенаправить в нижнюю часть зоны подготовки.

#### **Литература**

1. Перегудов В.В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и материалов / В.В. Перегудов, М.И. Роговой. М.; Стройиздат, 1983.- 416 с.
2. Химическая технология керамики Под ред. проф. И.Я. Гузмана. М.: ООО РИФ «Стройматериалы». 2003. – 496 с.
3. Дагаев М.И., Муртазова Х.Т., Авторханов А.М. Система управления процессом обжига кирпича. Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2019. – т. 15. № 3. – С. 5 – 9.

4. Шпегель И.Ф., Ивсанов В.Г. Оптимизация туннельных печей // Научно-технический и производственный журнал. Строительные материалы. 2016. – апрель. С. 52 – 54.
5. Исмаилов М.И., Пиров Ф.С. Умаралиев Р.Ш. Имитационное моделирование технологических процессов термической обработки в среде RDO // Ученые записи Орловского государственного университета. Серия: Естественные, технические и медицинские науки. науки. 2011, №3.- С. 54 – 60.
6. Klekovkin V S , Nikitm Y R, Trefilov S A , Goltsova O B Mathe-matical model of the tunnel kiln for baking bncks//Book of Abstracts - 2006 -№8.
7. Федосов, СВ. Моделирование тепловых процессов в регенеративных утилизаторах теплоты уходящих газов промышленных печей /С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин, С.В. Хавер. // Строительные материалы. 2007.- №9.- С.14 - 16.
8. Жежера Н.И., Сабанчин В.Р. Туннельная печь для обжига керамических изделий как объект автоматического управления по разрежению продуктов горения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ».2014.№6.-<http://naukovedenie.ru/PDF/166TVN614.pdf>.-DOI: 0.15862/166TVN614
9. Автоматизация процесса обжига керамического кирпича: монография / В.В. Тугов, В.Р. Сабанчин. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 150 с.
10. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4.P. 559-576.
11. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine, Feb. 2006, P.41-54.
12. Kayashev, A. I. Algorithm of physical quantities fuzzification on the basis of crisp sets / A. I. Kayashev, E. A. Muravyova, A. F. Antipin // CSIT'2007 : proceedings of the international workshop. – Ufa : USATU, 2007. – Vol. 2. – P. 82-83.
13. Vicente H.N., Alessandro P.D. Numerical and Experimental Thermal Analysis of a Tunnel Kiln used in Ceramic Production // J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.. -2009. – v. XXXI. – No. 4.- 297 - P. 297- 304.
14. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Temperature Regime and Thermal Stress in a Concrete Massif with Pipe Cooling// Power Technology and Engineering.- 2019. - v.52. No, 6 . - DOI 10.1007/s10749-019-01009-9. 1570-145X 19 5206-0638 © 2019 Springer Science+Business Media, LLC.
15. Zhuang-nian Li, Mag-sheng Chu, Zheng-gen Liu, Gen-ji Ruan, Bao-feng Li. Furnace heat prediction and control model and its application to large blast furnace // High Temp. Mater, Proc. 2019. 38:884-891.
16. Filipponi M., Rossi F., Presciutti A. and others. Thermal Analysis of an Industrial Furnace // Preprints (www.preprints.org) Posted: 3 August 2016. doi:10.20944/preprints201608.0029.v1.
17. Cheremiskina N., Loshkarev N., Lavrov V., Spirin N. Study of thermal performance of modern design of the drum-type batch furnace // in VII All- Russian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists on “Heat Engineering and Computer Science in Education, Science and Production”, KnE Engineering, pages 138–143. DOI 10.18502/keg.v3i5.2662.
18. Yitong Xie, Chaokui Qin, Shuangqian Cuo, Zhicuang Chen. Experimental reserch of a small-scale industrial furnace with regenerative disc-flame burners // Thermalprocessing.com. 2024. – P/ 33-40
19. Вафин Д.Б. Тепловые и аэродинамические параметры камеры радиации печи пиролиза углеводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – т.24. - №3. – С. 198-210.
20. Вафин Д.Б., Ваньков Ю.В. Тепловой расчет камеры радиации печи пиролиза углеводов с несимметричным расположением настенных горелок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – т.25. - №5. – С. 136-150.

#### Авторы публикации

**Вафин Данил Биалович** – докт. техн. наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0002-6411-3640>. *Email:* [vafdanil@yandex.ru](mailto:vafdanil@yandex.ru)

**Мукатдаров Алик Альбертович** – аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики и

систем теплоснабжения (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID\*: <http://orcid.org/0009-0007-4052-4326>. Email: [alikian1155@yandex.ru](mailto:alikian1155@yandex.ru)

**Мукатдарова Диана Альбертовна** – магистрант кафедры промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Email автора. [Di\\_mukatdarovaaa@mail.ru](mailto:Di_mukatdarovaaa@mail.ru)

### References

1. Peregudov V.V. Thermal processes and installations in the technology of construction products and materials / V.V. Peregudov, M.I. Horny. M.; Stroyizdat, 1983.- 416 p.
2. Khimicheskaya tekhnologiya keramiki / Pod red. prof. I.Ya. Guzman [Chemical ceramic technology. Ed. by I.Ya. Guzman.]. Moscow: OOO RIF «Stroimaterialy». 2003. - 496 p.
3. Dagaev M.I., Murtazova Kh.T., Avtorkhanov A.M. Brick firing process control system. Bulletin of GGNTU. Technical science. – 2019. – vol. 15. No. 3. – P. 5 – 9.
4. Hpegel I.F., Ivsanov V.G. Optimization of tunnel kilns / Scientific, technical and production magazine. Construction Materials. 2016 – April. P. 52 – 54.
5. Ismailov M.I., Pirov F.S. Umaraliev R.Sh. Simulation modeling of technological processes of heat treatment in the RDO environment // Scientific records of Oryol State University. Series: Natural, technical and medical sciences. Sciences . 2011, No. 3.- P. 54 – 60
6. Klekovkin V S , Nikitm Y R, Trefilov S A , Goltsova O B Mathe-matical model of the tunnel kiln for baking bncks//Book of Abstracts - 2006 -№8.
7. Fedosov, SV. Modeling of thermal processes in regenerative heat utilizers of exhaust gases of industrial furnaces / S.V. Fedosov, V.E. Mizonov, N.N. Elin, S.V. Haver. // Construction Materials. 2007.- No. 9.- P. 14 – 16,
8. Zhezhera N.I., Sabanchin V.R. Tunnel kiln for firing ceramic products as an object of automatic control for rarefaction of combustion products // Internet journal "NAUKOVEDENIE". – 2014.-№6. <http://naukovedenie.ru/PDF/166TVN614.pdf>.-DOI: 0.15862/166TVN614.
9. Automation of the firing process of ceramic bricks: monograph / V.V. Tugov, V.R. Sabanchin. – Orenburg: OGU, 2019. – 150 p.
10. . Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4.P. 559-576.
11. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine.,Feb. 2006, P.41-54.
12. Kayashev, A. I. Algorithm of physical quantities fuzzification on the basis of crisp sets / A. I. Kayashev, E. A. Muravyova, A. F. Antipin // CSIT'2007 : proceedings of the international workshop. – Ufa : USATU, 2007. – Vol. 2. – P. 82-83.
13. Vicente H.N., Alessandro P.D. Numerical and Experimental Thermal Analysis of a Tunnel Kiln used in Ceramic Production // J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.. -2009. – v. XXXI. – No. 4.- 297 - P. 297- 304.
14. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Temperature Regime and Thermal Stress in a Concrete Massif with Pipe Cooling// Power Technology and Engineering.- 2019. - v.52. No, 6 . - DOI 10.1007/s10749-019-01009-9. 1570-145X 19 5206-0638 © 2019 Springer.
15. Zhuang-nian Li, Mag-sheng Chu, Zheng-gen Liu, Gen-ji Ruan, Bao-feng Li. Furnace heat prediction and control model and its application to large blast furnace // High Temp. Mater, Proc. 2019. 38:884-891.
16. Filipponi M., Rossi F., Presciutti A. and others. Thermal Analysis of an Industrial Furnace // Preprints (www.preprints.org) Posted: 3 August 2016. doi:10.20944/preprints201608.0029.v1.
17. Cheremiskina N., Loshkarev N., Lavrov V., Spirin N. Study of thermal performance of modern design of the drum-type batch furnace // in VII All- Russian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists on “Heat Engineering and Computer Science in Education, Science and Production”, KnE Engineering, pages 138–143. DOI 10.18502/keg.v3i5.2662.
18. Yitong Xie, Chaokui Qin, Shuangqian Cuo, Zhicuang Chen. Experimental reserch of a small-scale industrial furnace with regenerative disc-flame burners // Thermalprocessing.com. 2024. – P/ 33-40
19. Vafin D.B. Thermal and aerodynamic parameters of the radiation chamber of the hydrocarbon pyrolysis furnace // News of higher educational institutions. Energy problems. –

2022. – v.24. - No. 3. – pp. 198-210.

20. Vafin D.B., Vankov Yu.V. Thermal calculation of the radiation chamber of a hydrocarbon pyrolysis furnace with an asymmetrical arrangement of wall burners // News of Higher Educational Institutions. Energy problems. – 2023. – t.25. - No. 5. – pp. 136-150.

#### **Authors of the publication**

**Vafin Danil Bilalovich** – Kazan State Power Engineering University. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6411-3640>. Author's email: [vafdanil@yandex.ru](mailto:vafdanil@yandex.ru)

**Mukatdarov Alik Albertovich** – Kazan State Power Engineering University. ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-4052-4326>. Email. [alikjan1155@yandex.ru](mailto:alikjan1155@yandex.ru)

**Mukatdarova Diana Albertovna** – Kazan State Power Engineering University. Email. [Di\\_mukatdarovaaa@mail.ru](mailto:Di_mukatdarovaaa@mail.ru)

*Шифр научной специальности по паспорту научной специальности: 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» или 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника».*

**Получено**

**Отредактировано**

**Принято**



## ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ В ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ОБЖИГА КИРПИЧЕЙ СО СВОДОВЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ГОРЕЛОК

Вафин Д.Б., Мукатдаров А.А., Мукатдарова Д.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

vafdanil@yandex.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. Несмотря на большой объем крупнопанельной и монолитной застройки современных городов уровень эстетических требований к домостроению с применением новых отделочных строительных материалов приводит и к увеличению спроса керамического кирпича. Для решения задачи национального проекта «доступное жилье» необходимо нарастить производство керамического кирпича местного производства. Для этого необходимо модернизировать существующие или строить новые кирпичные заводы. При этом желательно использовать новые технологии и способы производства, обеспечивающие качество выпускаемого кирпича. Свойства кирпича в основном формируются в процессе обжига, который в то же время является наиболее сложным и требующим большой затраты теплоты этапом производства. Необходимое качество строительной керамики во многом зависит от обеспечения определенного распределения температуры в процессе обжига во время перемещения вагонов с кирпичом вдоль туннельной печи. Поэтому работы, посвященные обеспечению необходимого распределения температуры в различных зонах туннельных печей с различными размещениями газовых горелок, являются актуальными с практической точки зрения. ЦЕЛЬЮ работы является экспериментальное определение температуры в разных местах объема туннельной печи в ходе всего перемещения вагона с кирпичами в действующей печи. МЕТОД. Датчики температуры с дистанционной передачей информации были размещены на садках кирпичей перемещаемого вдоль печи вагона, сигналы от которых регистрировались многоканальным измерителем во время всего цикла обжига. РЕЗУЛЬТАТЫ измерений представлены в виде графиков зависимостей температуры от различных датчиков в зависимости от времени процесса обжига. По результатам опытов сделаны выводы относительно улучшения качественной тепловой обработки кирпичей и уменьшения брака производства.

**Ключевые слова:** Строительная керамика; обжиг; теплота; температура; горение; теплообмен; энергия.

**Для цитирования:** Вафин Д.Б., Мукатдаров А.А., Мукатдарова Д.А. Тепловое состояние в туннельной печи обжига кирпичей со сводовым расположением горелок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 184-193. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-184-193.

## THERMAL CONDITION IN A TUNNEL BRICK KILNING KILN WITH VOCCULATED BURNERS

Vafin D.B., Mukatdarov A.A., Mukatdarova D.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vafdanil@yandex.ru

**Abstract:** Despite the large volume of large-panel and monolithic construction in modern cities, the level of aesthetic requirements for house construction using new finishing building materials also leads to an increase in the demand for ceramic bricks. To solve the problem of the national project “affordable housing” it is necessary to increase the production of locally produced ceramic bricks. To do this, it is necessary to modernize existing brick factories or build new ones. In this case, it is desirable to use new technologies and production methods that ensure the quality of the produced bricks. The properties of bricks are mainly formed during the firing process, which at the same time is the most complex and heat-intensive

production stage. The required quality of building ceramics largely depends on ensuring a certain temperature distribution during the firing process while moving cars with bricks along the tunnel kiln. Therefore, work devoted to ensuring the required temperature distribution in different zones of tunnel furnaces with different placements of gas burners is relevant from a practical point of view. **THE PURPOSE** of the work is to experimentally determine the temperature in different places of the tunnel furnace volume during the movement of the car in the operating furnace. **METHOD.** Temperature sensors with remote information transmission were placed on the brick cages of a carriage moving along the kiln, the signals from which were recorded by a multi-channel meter during the entire firing cycle. The measurement results are presented in the form of graphs of temperature dependences from various sensors depending on the time of the firing process. Based on the results of the experiments, conclusions were drawn regarding improving the quality of heat treatment of bricks and reducing production defects. *версия резюме (аннотации) – независимый от статьи источник информации.*

**Keywords:** Construction ceramics; burning; heat; temperature; combustion; heat exchange; energy.

**For citation:** Vafin D.B., Mukatdarov A.A., Mukatdarova D.A. Thermal condition in a tunnel brick kilning kiln with vocculated burners. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (3): 184-193. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-184-193.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время наибольшим спросом пользуются разноцветные керамические кирпичи высокого качества для отделки наружных поверхностей стен строящихся зданий. Для производства кирпичей надлежащего качества необходимо использовать передовые технологии, современные методы и оптимальные способы производства. Наиболее ответственным и наибольшим потреблением теплоты процессом при производстве кирпича является процесс обжига. В процессе высокотемпературной обработки кирпича-сырца и формируются требуемые свойства кирпича, такие как стойкость против механических, физических и атмосферных воздействий.

Для происхождения ряда физико-химических превращений, вызывающих изменение свойств кирпича-сырца в процессе обжига необходимо поддерживать скорость подъема температуры до необходимого уровня, длительность выдержки на данном уровне, состав газовой среды и скорость охлаждения. Степень готовности керамического кирпича можно достичь как в процессе быстрого обжига при высокой конечной температуре, так и при длительном обжиге при более низкой температуре. Максимальная температура при обжиге ограничивается неравномерностью поля температуры в объеме печи и в объеме отдельного кирпича. Выдержка при максимальной температуре обеспечивает выравнивание температуры по объему кирпича и по сечению канала печи, что способствует равномерному распределению жидкой фазы в кирпиче. Поле температуры в объеме канала обжига печи зависит от конструкции печи, типа и расположения газовых горелок, так же от способа формирования садок в перемещаемых вагонах. При возникновении большой неравномерности нагрева садки увеличивается доля некачественной продукции.

Цель исследования заключается в измерении температуры в разных зонах объема действующей туннельной печи за время всего цикла обжига керамического кирпича. Научная значимость исследования заключается в установлении особенностей изменения температурного режима в объеме туннельной печи в зависимости от управляющих параметров. Это позволит в дальнейшем проверить достоверность расчетных методов для подбора режима обжига, позволяющего обеспечения требуемого качества строительной керамики. Практическая значимость исследования заключается в возможности уменьшения доли некачественного кирпича

В настоящее время для обжига строительных керамических кирпичей строятся только печи непрерывного действия такие как, кольцевые и туннельные печи. Из-за больших затрат физического труда при применении кольцевых печей, имеющейся неравномерности температуры по сечению канала обжига и из-за трудности механизации работ при проектировании отдается предпочтение туннельным печам. Туннельная печь состоит из длинного прямолинейного канала, вдоль которого перемещаются вагоны с садками обжигаемых кирпичей. Теплоноситель,

представляющий смесь продуктов сгорания газообразного топлива и воздуха движется навстречу перемещающимся вагонам. Физические и химические процессы происходят при теплообмене обтекающего перемещаемых садок кирпичей теплоносителя. Обычно условно канал туннельной печи разделяют на зону подогрева (подготовки), обжига и охлаждения (рис.1).

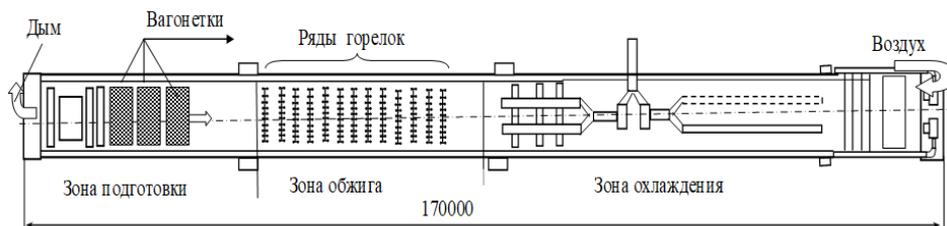


Рис. 1. Упрощенная схема туннельной печи: вид сверху Fig 1. Simplified diagram of a tunnel kiln: top view

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сквозной канал туннельной печи практически полностью заполнен вагонами с садками кирпичей. Зона обжига располагается в средней части канала, где расположены ряды скоростных газовых горелок. Имеются печи с размещением горелок на боковых стенах или на своде печи. С помощью вентилятора нагнетается воздух в конец зоны охлаждения. Нагреваясь остывающими садками кирпичей, воздух в зоне обжига участвует в процессе горения газовой смеси подаваемой через горелки. В зоне обжига кирпичи подогреваются до максимальной температуры, затем в конце зоны обжига и в начале зоны охлаждения они выдерживаются при высокой температуре, где и происходят основные физико-химические процессы. Технология получения керамических материалов известна давно, в частности она описана в работе [1] и ряде других работ, например в [2].

Загруженный вагон из сушильной камеры подается к торцу зоны охлаждения печи. и толкателем заталкивается в печь. Все вагоны, находящиеся в канале печи перемещаются на длину данного вагона. Теплообмен между садками кирпичей на вагонах и теплоносителем происходит по принципу противотока. Часть нагретого воздуха из зоны охлаждения может отбираться вентилятором для подачи в сушильную камеру. В зоне охлаждения садки кирпичей достаточно быстро остывают до температуры перехода кирпичей из пиропластического состояния в хрупкое состояние. После этого при температурах модификационных превращений кирпича интенсивность остывания уменьшается.

Некоторые вопросы технологического обжига керамического кирпича в туннельной печи и обоснование необходимости внедрения автоматизации управления туннельной печью рассмотрены в работе [3]. В работе [4] предложен метод оптимизации обжига керамического кирпича путем организации зон рециркуляции продуктов сгорания в туннельной печи с применением жаровых вентиляторов. В статье [5] рассматривается имитационное моделирование технологических процессов термической обработки. В работе [6] предлагается упрощенная математическая модель для определения температурного режима в туннельной печи для обжига керамического кирпича. В статье [7] анализируется моделирование тепловых процессов в регенеративно утилизаторах теплоты уходящих дымовых газов в туннельных печах. Некоторые вопросы установления связей между разрежением в канале туннельной печи параметрами продуктов сгорания газа через регулирующие щели дифференциальными уравнениями рассмотрены в работе [8]. Анализ работы туннельных печей в целях автоматизации управления процессом обжига кирпичей приводится в монографии [9]. В работах [10 -12] имеется анализ существующих систем автоматизации в печах обжига. Некоторые результаты численного и экспериментального исследования в канале туннельной печи приводится в работе [13]., однако конструкция данной печи существенно отличается от конструкции печи, исследованной в нашей работе. В статье [14] приводится пример использования программного комплекса Midas Civil 2011 для исследования температурного и термически напряженного состояния строительного бетона. Модель прогнозирования и управления тепловым потоком в большой доменной печи предлагается в работе [15]. Анализ методов определения температурного режима в промышленных печах и обзор литературы по этой тематике имеется в [16]. Результаты

изучения тепловых характеристик барабанных печей приводится в работе [17]. В статье [18] обсуждаются вопросы проведения опытов по измерению температуры в промышленных печах небольших размеров.

В данной работе приводятся некоторые результаты экспериментального измерения температуры в канале туннельной печи с использованием температурных датчиков, размещенных на садках кирпичей на вагонах, перемещаемых вдоль печи. Основным изделием завода, находящегося около города Казань являются кирпичи 1 НФ 250×120×65 и 1,4 НФ 250×120×88 30% пустотности. Сырьем является 3 типа глины влажностью формования 22,4% относительно сухости с относительной влажностью на выходе из сушилки меньше 3%.

Число кирпичей 1,4 НФ в перемещаемом вагоне 10752 шт. 8 штабели в загрузке и 3 загрузки/вагон.. Ритмичность работы печи в определенный момент времени равна 9,1 вагонов в день, что дает ритмичность в 53 минут на одну загрузку печи. Число кирпичей в вагоне 1НФ 14784 шт. Ритмичность в определенный момент времени также составляет 53 мин/загрузка. Длина печи примерно 172 м, внутренняя ширина канала равна 9 м. Внутри печи одновременно находится 41 вагон. Размер вагона печи 4200 мм в длину (3 загрузки) и 8845 мм в ширину. Туннель ожидания составляет 19 позиций вагона в печи.

#### Материалы и методы (Materials and methods)

Печь и туннельная сушилка работают на природном газе. Часть продуктов сгорания из систем ВТ и НТ установленных на печи рекуперации и из подвагонеточной вытяжки направляются в сушилку. Для сушилки обычно газов рекуперации хватает, хотя установлены 2 дополнительных теплогенератора. Вытяжка печи производится через щель в своде с помощью основного вентилятора с вариатором скорости и с ручной заслонкой. Имеется и вентилятор разбавления, расположенного на стенке вытяжки который включается не часто. температура вытяжки равна 98°C. Имеется подвагонеточная вытяжка из двух вытяжных дымоходов с ручной заслонкой и с вытяжной трубой. В зоне ожидания два вентилятора всасывают примерно 16,7 м<sup>3</sup>/с воздуха из пяти щелей в своде и из пяти боковых щелей для смешивания перед обжигом.

Одиннадцать обычных рядов и 2 сдвоенные ряда горелок типа BERNINI (всего 189 горелок) расположены на своде зоны обжига печи и регулируются на месте шкафом управления. Для подачи воздуха на горение природного газа используется один общий вентилятор на своде печи мощностью 7,5 кВт и еще 18 вентиляторов мощностью 3 кВт. Средний расход горелки: 0,3 кг сух.возд/с (0,3 м<sup>3</sup>/с) при 3,3 °С.

Проектная температура обжига 980 °С с выдержкой в зоне наибольшей температуры обжига от 9 до 13 ч. Для контроля процесса обжига кирпичей вдоль канала под сводом печи расположены штатные 25 термодатчики и датчики давления.

Для исследования температурного поля вдоль канала туннельной печи на садках вагона кирпичей были размещены термопары CeriDry с системой радиотелеметрии типа Datarag Kiln Tracker. Вид поперечного сечения канала туннельной печи с вагоном садками кирпичей, размещенными на них термопарами показан на рис. 2.

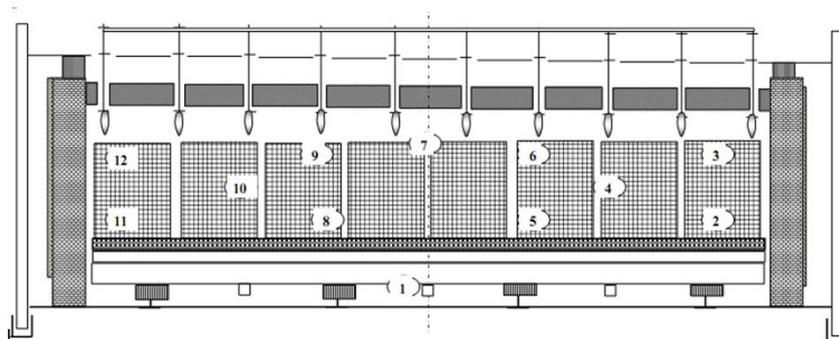


Рис. 2. Вид поперечного сечения канала печи с размещенными на садках термопарами  
 Fig. 2. Cross-sectional view of the furnace channel with thermocouples placed on the cages  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В процессе перемещения вагона вдоль всей печи сигналы высокой частоты от термопар передаются в дистанционный регистратор с персональным компьютером, который был расположен на тележке перемещающейся синхронно с вагоном рядом за пределами канала печи. С опцией FullRadio регистратор может быть настроен и считывать в режиме реального времени по беспроводной связи посредством двунаправленной радиопередачи Компьютер регистрировал данные температуры от отдельных термопар в

разные моменты времени перемещения вагона вдоль всей печи в процессе обжига. Данные считывались использованием программного обеспечения TMI-Orion Qlever. Интерфейс связи с ПК представляет собой электронное устройство, которое связывает регистратор с персональным компьютером, обеспечивая тем самым двустороннюю передачу данных в программу и чтение регистраторов.

Такие измерения проводились для нескольких проходов вагонов с кирпичами в течении определенного периода эксплуатации печи. Результаты после обработки можно получить через проводной интерфейс.

#### **Результаты и обсуждение (Results and Discussions)**

На рисунке 3 показана кривая контроля температуры в верхней части туннеля вдоль всей печи, построенная по показаниям штатных датчиков температуры, установленных под сводом туннеля в разных местах. Сплошная линия соответствует реальным значениям для данного прохода вагонов, штриховая – стандартная. По оси абсцисс показаны положения вагона вдоль печи. По этим показаниям оператор должен поддерживать необходимый температурный режим в туннеле печи. Однако датчики показывают температуру только в верхней части канала, поэтому по ним не удастся определить температуру в отдельных областях туннеля и проследить за равномерностью нагрева отдельных частей. Поэтому и было решено провести опыты по установлению температурного состояния в разных местах.

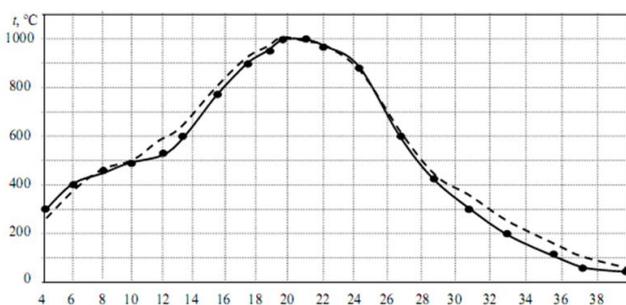


Рис. 3. График изменения температуры вдоль туннеля по показаниям штатных датчиков температуры (кривая контроля работы печи) \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 4 показаны графики изменения температуры в зависимости от времени перемещения вагона вдоль туннеля печи, построенные по данным разных термопар, места размещения которых показаны на рисунке 2. Термопара №1 размещена под вагонеткой. Термопары №3, №6, №7, №9, №12 были расположены в верхних частях садок, причем термопара №7 – над 4-й садкой с края. График, построенный по данным 7-й термопары, начерчен штрих пунктирной линией, а остальные графики верхних термопар – сплошной линией. Термопары № 2, №5, №8, №11 размещены внизу (штриховые кривые), а термопары № 4 и №10 – на середине двух садок (пунктирные кривые). Как видно из рис. 4, графики, построенные по данным термопар № 4 и №10 практически накладываются друг на друга. График, построенный по данным термопары №7 наиболее близко похож на график штатных датчиков (рис. 3).

На рисунке 5 представлены графики изменения температуры поперек туннеля в области зоны обжига печи.

Общий цикл обжига составляет от 100 до 115 часов. Ритмичность в определенный момент времени ~53 минут при средней ритмичности 49,5 минут.

Температура кирпичей и вагонов на входе в зону подготовки близки к температуре окружающей среды. На входе в печь через ворота входного шлюза вытяжным вентилятором под вагоном №1 и вентилятором печи всасывается свежий воздух. Расход утечек на входе в печь составляет около 3,2 м<sup>3</sup>/с при температуре 29 °С. Если своевременно отрегулировать высоту входной двери шлюза печи и добиться герметичности прохода толкателя на уровне ворот можно уменьшить охлаждение кирпичей свежим воздухом перед их попаданием в печь и увеличить производительность вытяжных вентиляторов.

График на рисунке 4, построенный по показаниям датчика №1 характеризует тепловое состояние подвагонеточного канала. Максимально достигнутая температура в канале 110 °С в конце зоны обжига свидетельствует об эффективности подвагонеточного

охлаждения.

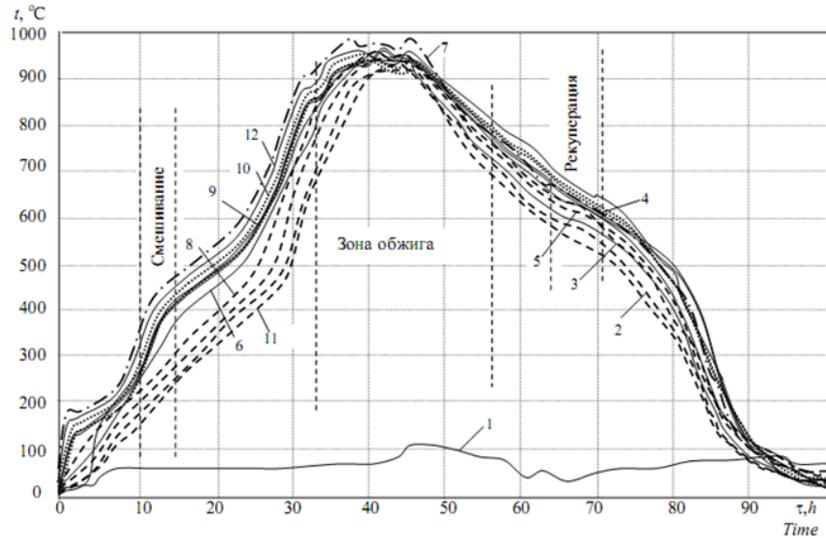


Рис. 4. Графики изменения температуры в зависимости от времени перемещения вагона по туннелю печи

Fig. 4. Graphs of temperature changes depending on the time of movement of the car through the furnace tunnel

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

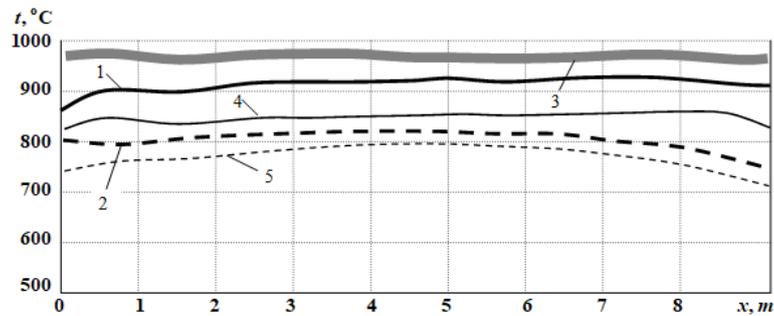


Рис. 5. Изменение температуры в поперечном сечении печи: 1, 2 – на входе в зону обжига сверху и снизу соответственно; 3 – в средней части зоны обжига; 4, 5 – на выходе из зоны обжига сверху и снизу печи соответственно

Fig. 5. The temperature change in the cross section of the furnace: 1, 2 – at the entrance to the firing area at the top and below, respectively; 3 – in the middle part of the firing zone; 4, 5 – at the exit from the firing zone at the top and below of the furnace, respectively

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 4 после входа в зону подготовки кирпичи наверху загрузки быстро нагреваются за 1 час от температуры 25 °С до 200 °С (сплошные кривые). Температуры нижних рядов загрузки начинают отставать. Перед обжигом 2 вентилятора всасывают воздух через 5 боковых щелей с одной и с другой стороны печи для подачи воздуха в 5 щелей в своде для смешения. При этом перед зоной смешения происходит некоторое выравнивание температуры низа и верха загрузки. Наверху загрузки градиент увеличения температуры втянутым с боку холодным воздухом уменьшается, а внизу загрузки кирпичи нагреваются всасываемым в своде горячим воздухом. В конце зоны подготовки температура изделий растет еще быстрее, при этом отставание температуры нижних рядов сохраняется.

После зоны смешивания перед зоной обжига разница температур между верхом и низом загрузки увеличивается, достигнув значений  $\Delta t = 250...270$  °С.

В зоне обжига достигнута максимальная температура ~996 °С, при этом разность температур поперек сечения канала и между верхом и низом загрузки уменьшается, показания всех термопар укладываются в пределах толщины кривой 3 (рис. 5). В зоне обжига не удастся нагнать запаздывание температуры нижних рядов кирпичей. Вся загрузка находится при необходимой температуре выдержки только в середине зоны обжига. Это можно объяснить тем, что в порталной печи зона обжига находится в разреженном состоянии, что приводит к затруднению обжига низа загрузки. Кроме этого расположение горелок на своде приводит к уменьшению уровня температуры продуктов

сгорания внизу туннеля печи.

Быстрое охлаждение после зоны обжига состоит из рядов воздухопроводов с 5-ю соплами, что в общем составляет 40 сопел. Каждый ряд имеет вентилятор быстрого охлаждения. 5 рядов высокотемпературной рекуперации (ВТ) из полурампы по 5 стаканов на каждой, что составляет 50 стаканов в общем. Каждая полурампа ВТ обладает своей ручной заслонкой. Воздуховоды рекуперации ВТ с правой и левой стороны соединены вентилятором рекуперации ВТ. Для обеспечения ритмичности работы печи надо бы автоматизировать регулировку заслонок рампы быстрого охлаждения по температуре в зоне охлаждения.

После выхода из зоны обжига температура кирпичей остается выше температуры газов (кривая 7) Разница температуры на выходе из зоны рекуперации достигает 180 °С. Загрузки проходят точку кварцования на выходе из зоны ВТ до зоны низкотемпературной рекуперации (НТ) с низким градиентом температуры 10 °С/ч, что способствует к уменьшению образования трещин кирпичей.

Низкотемпературная рекуперация состоит из 10 простых рядов, которые в свою очередь состоят из 2-х полурампы по 5 стаканов. На выходе из зоны рекуперации НТ вся загрузка охлаждается до температуры ниже 60 °С. За счет наддува подвагонеточного канала воздухопроводами, расположенными с двух сторон при выходе из печи кирпичи охлаждаются до температуры 30 °С.

Можно отметить, что графики типа рис. 4 при разных циклах измерений несколько отличаются, хотя общий характер изменения температуры изделий вдоль канала печи сохраняется. При этом относительное расположение графиков разных термпар также несколько меняются. Это, видимо, связано изменением внешних условий при разных циклах измерений и некоторых других факторов. Для установления влияния различных факторов на тепловое состояние в канале туннельной печи обжига предполагается смоделировать тепло и массообменные процессы по методу, описанному в работах [19, 20].

По анализу показаний приборов определено распределение теплового потребления печи: низшая теплота сгорания топлива – 6201 кВт (74 %); теплота вводимая воздухом – 2060 кВт (25%); теплота вводимая сырым кирпичом – 93 кВт (1%); теплота вводимая вагонами – 13 кВт (~0%). Итого 8365 кВт. Для производства 1 кг кирпичей затрачивается примерно 1670 кДж теплоты сгорания природного газа.

Тепловые потери (расходы): уходящими сухими дымовыми газами – 4490 кВт (54%); на испарение остаточной влаги 320 кВт (4%); на рекуперацию – 1460 кВт (18%); на керамизацию 310 (4%); утечка в подвагонеточное пространство – 930 кВт (11%); утечка через стены печи – 726 кВт (9%); теплота выходящих кирпичей – 81 кВт (~1%); теплота выходящих вагонов – 14 кВт (~0%). Итого 8332 кВт.

#### *Заключение (Conclusions)*

Для улучшения качества кирпичей для большей гибкости контроля условий обжига можно предусмотреть автоматическую регулировку вытяжки, рекупераций ВТ и НТ, температурного наддува и давления печи.

Небольшое количество кирпичей марки 1,4НФ имеют небольшие трещины, без предпочтительного местоположения в загрузке вагона. Этот дефект скорее связан формовкой или сушкой и не связан с обжигом. Для уменьшения данного типа дефекта желательно добиться совместимости разных типов глин в смеси и контролировать кривую сушки в конце процесса.

Второй тип дефекта неравномерность цвета некоторых кирпичей при выходе из печи. Этот дефект, видимо, связан с неравномерностью температуры загрузки верха и низа из-за расположения горелок на своде, и за счет недостаточности сечения каналов между рядами кирпичей на садках для циркуляции продуктов сгорания. При плановой остановки печи на ремонт можно бы расположить несколько рядов баковых горелок перед зоной обжига. Можно часть высокотемпературных продуктов сгорания из конца зоны обжига перенаправить в нижнюю часть зоны подготовки.

#### **Литература**

1. Перегудов В.В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и материалов / В.В. Перегудов, М.И. Роговой. М.; Стройиздат, 1983.- 416 с.
2. Химическая технология керамики Под ред. проф.И.Я. Гузмана.М.: ООО РИФ «Стройматериалы». 2003. – 496 с.
3. Дагаев М.И., Муртазова Х.Т., Авторханов А.М. Система управления процессом обжига кирпича. Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2019. – т. 15. № 3. – С. 5 – 9.

4. Шпегель И.Ф., Ивсанов В.Г. Оптимизация туннельных печей // Научно-технический и производственный журнал. Строительные материалы. 2016. – апрель. С. 52 – 54.
5. Исмаилов М.И., Пиров Ф.С. Умаралиев Р.Ш. Имитационное моделирование технологических процессов термической обработки в среде RDO // Ученые записи Орловского государственного университета. Серия: Естественные, технические и медицинские науки. науки. 2011, №3.- С. 54 – 60.
6. Klekovkin V S , Nikitm Y R, Trefilov S A , Goltsova O B Mathe-matical model of the tunnel kiln for baking bncks//Book of Abstracts - 2006 -№8.
7. Федосов, СВ. Моделирование тепловых процессов в регенеративных утилизаторах теплоты уходящих газов промышленных печей /С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин, С.В. Хавер. // Строительные материалы. 2007.- №9.- С.14 - 16.
8. Жежера Н.И., Сабанчин В.Р. Туннельная печь для обжига керамических изделий как объект автоматического управления по разрежению продуктов горения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ».2014.№6.-<http://naukovedenie.ru/PDF/166TVN614.pdf>.-DOI: 0.15862/166TVN614
9. Автоматизация процесса обжига керамического кирпича: монография / В.В. Тугов, В.Р. Сабанчин. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 150 с.
10. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4.P. 559-576.
11. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine, Feb. 2006, P.41-54.
12. Kayashev, A. I. Algorithm of physical quantities fuzzification on the basis of crisp sets / A. I. Kayashev, E. A. Muravyova, A. F. Antipin // CSIT'2007 : proceedings of the international workshop. – Ufa : USATU, 2007. – Vol. 2. – P. 82-83.
13. Vicente H.N., Alessandro P.D. Numerical and Experimental Thermal Analysis of a Tunnel Kiln used in Ceramic Production // J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.. -2009. – v. XXXI. – No. 4.- 297 - P. 297- 304.
14. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Temperature Regime and Thermal Stress in a Concrete Massif with Pipe Cooling// Power Technology and Engineering.- 2019. - v.52. No, 6 . - DOI 10.1007/s10749-019-01009-9. 1570-145X 19 5206-0638 © 2019 Springer Science+Business Media, LLC.
15. Zhuang-nian Li, Mag-sheng Chu, Zheng-gen Liu, Gen-ji Ruan, Bao-feng Li. Furnace heat prediction and control model and its application to large blast furnace // High Temp. Mater, Proc. 2019. 38:884-891.
16. Filipponi M., Rossi F., Presciutti A. and others. Thermal Analysis of an Industrial Furnace // Preprints (www.preprints.org) Posted: 3 August 2016. doi:10.20944/preprints201608.0029.v1.
17. Cheremiskina N., Loshkarev N., Lavrov V., Spirin N. Study of thermal performance of modern design of the drum-type batch furnace // in VII All- Russian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists on “Heat Engineering and Computer Science in Education, Science and Production”, KnE Engineering, pages 138–143. DOI 10.18502/keg.v3i5.2662.
18. Yitong Xie, Chaokui Qin, Shuangqian Cuo, Zhicuang Chen. Experimental reserch of a small-scale industrial furnace with regenerative disc-flame burners // Thermalprocessing.com. 2024. – P/ 33-40
19. Вафин Д.Б. Тепловые и аэродинамические параметры камеры радиации печи пиролиза углеводородов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – т.24. - №3. – С. 198-210.
20. Вафин Д.Б., Ваньков Ю.В. Тепловой расчет камеры радиации печи пиролиза углеводородов с несимметричным расположением настенных горелок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – т.25. - №5. – С. 136-150.

#### Авторы публикации

**Вафин Данил Биалович** – докт. техн. наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0002-6411-3640>. *Email:* [vafdanil@yandex.ru](mailto:vafdanil@yandex.ru)

**Мукатдаров Алик Альбертович** – аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики и

систем теплоснабжения (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID\*: <http://orcid.org/0009-0007-4052-4326>. Email: [alikhjan1155@yandex.ru](mailto:alikhjan1155@yandex.ru)

**Мукатдарова Диана Альбертовна** – магистрант кафедры промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Email автора. [Di\\_mukatdarovaaa@mail.ru](mailto:Di_mukatdarovaaa@mail.ru)

### References

1. Peregudov V.V. Thermal processes and installations in the technology of construction products and materials / V.V. Peregudov, M.I. Horny. M.; Stroyizdat, 1983.- 416 p.
2. Khimicheskaya tekhnologiya keramiki / Pod red. prof. I.Ya. Guzman [Chemical ceramic technology. Ed. by I.Ya. Guzman.]. Moscow: OOO RIF «Stroimaterialy». 2003. - 496 p.
3. Dagaev M.I., Murtazova Kh.T., Avtorkhanov A.M. Brick firing process control system. Bulletin of GGNTU. Technical science. – 2019. – vol. 15. No. 3. – P. 5 – 9.
4. Hpegel I.F., Ivsanov V.G. Optimization of tunnel kilns / Scientific, technical and production magazine. Construction Materials. 2016 – April. P. 52 – 54.
5. Ismailov M.I., Pirov F.S. Umaraliev R.Sh. Simulation modeling of technological processes of heat treatment in the RDO environment // Scientific records of Oryol State University. Series: Natural, technical and medical sciences. Sciences . 2011, No. 3.- P. 54 – 60
6. Klekovkin V S , Nikitm Y R, Trefilov S A , Goltsova O B Mathe-matical model of the tunnel kiln for baking bncks//Book of Abstracts - 2006 -№8.
7. Fedosov, SV. Modeling of thermal processes in regenerative heat utilizers of exhaust gases of industrial furnaces / S.V. Fedosov, V.E. Mizonov, N.N. Elin, S.V. Haver. // Construction Materials. 2007.- No. 9.- P. 14 – 16,
8. Zhezhera N.I., Sabanchin V.R. Tunnel kiln for firing ceramic products as an object of automatic control for rarefaction of combustion products // Internet journal "NAUKOVEDENIE". – 2014.-№6. <http://naukovedenie.ru/PDF/166TVN614.pdf>.-DOI: 0.15862/166TVN614.
9. Automation of the firing process of ceramic bricks: monograph / V.V. Tugov, V.R. Sabanchin. – Orenburg: OGU, 2019. – 150 p.
10. . Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4.P. 559-576.
11. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine.,Feb. 2006, P.41-54.
12. Kayashev, A. I. Algorithm of physical quantities fuzzification on the basis of crisp sets / A. I. Kayashev, E. A. Muravyova, A. F. Antipin // CSIT'2007 : proceedings of the international workshop. – Ufa : USATU, 2007. – Vol. 2. – P. 82-83.
13. Vicente H.N., Alessandro P.D. Numerical and Experimental Thermal Analysis of a Tunnel Kiln used in Ceramic Production // J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.. -2009. – v. XXXI. – No. 4.- 297 - P. 297- 304.
14. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Temperature Regime and Thermal Stress in a Concrete Massif with Pipe Cooling// Power Technology and Engineering.- 2019. - v.52. No, 6 . - DOI 10.1007/s10749-019-01009-9. 1570-145X 19 5206-0638 © 2019 Springer.
15. Zhuang-nian Li, Mag-sheng Chu, Zheng-gen Liu, Gen-ji Ruan, Bao-feng Li. Furnace heat prediction and control model and its application to large blast furnace // High Temp. Mater, Proc. 2019. 38:884-891.
16. Filipponi M., Rossi F., Presciutti A. and others. Thermal Analysis of an Industrial Furnace // Preprints (www.preprints.org) Posted: 3 August 2016. doi:10.20944/preprints201608.0029.v1.
17. Cheremiskina N., Loshkarev N., Lavrov V., Spirin N. Study of thermal performance of modern design of the drum-type batch furnace // in VII All- Russian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists on “Heat Engineering and Computer Science in Education, Science and Production”, KnE Engineering, pages 138–143. DOI 10.18502/keg.v3i5.2662.
18. Yitong Xie, Chaokui Qin, Shuangqian Cuo, Zhicuang Chen. Experimental reserch of a small-scale industrial furnace with regenerative disc-flame burners // Thermalprocessing.com. 2024. – P/ 33-40
19. Vafin D.B. Thermal and aerodynamic parameters of the radiation chamber of the hydrocarbon pyrolysis furnace // News of higher educational institutions. Energy problems. –

2022. – v.24. - No. 3. – pp. 198-210.

20. Vafin D.B., Vankov Yu.V. Thermal calculation of the radiation chamber of a hydrocarbon pyrolysis furnace with an asymmetrical arrangement of wall burners // News of Higher Educational Institutions. Energy problems. – 2023. – t.25. - No. 5. – pp. 136-150.

**Authors of the publication**

**Vafin Danil Bilalovich** – Kazan State Power Engineering University. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6411-3640>. Author's email: [vafdanil@yandex.ru](mailto:vafdanil@yandex.ru)

**Mukatdarov Alik Albertovich** – Kazan State Power Engineering University. ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-4052-4326>. Email. [alikjan1155@yandex.ru](mailto:alikjan1155@yandex.ru)

**Mukatdarova Diana Albertovna** – Kazan State Power Engineering University. Email. [Di\\_mukatdarovaaa@mail.ru](mailto:Di_mukatdarovaaa@mail.ru)

*Шифр научной специальности по паспорту научной специальности: 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» или 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника».*

**Получено** *15.03.2024 г.*

**Отредактировано** *30.05.2024 г.*

**Принято** *10.06.2024 г.*

Сдано в набор 15.06..2024 г.  
Бумага офсет 80 г. Печать  
ризографическая  
Тираж 500 экз.

Подписано к печати  
Усл. печ. л. 18,3  
Заказ №  
Дата выхода в свет

Формат 60\*90/8  
Уч.изд. л. 11,62.  
Цена свободная

