

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



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*

(24) 6 / 2022

POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY

Scientific & Technical Journal

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2022
Т.24, № 6
Ноябрь-Декабрь
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 работы, соответствующие группе специальностей 05.14.00 – «Энергетика», 05.09.00 – «Электротехника», 05.11.00 – «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы».

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. Язык публикаций: русский, английский.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ИВШИН И.В.	БРЯКИН И.В.	ЯКИМОВ Н.Д.
КАСИМОВ В.А.	СУСЛОВ К.В.	ІЛІҮА К. ІЛІЕҮ
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.	ФЕДОТОВ А.И.	ВАФИН Д.Б.
ДОВГУН В.П.	ЗВЕРЕВА Э.Р.	ІОН V ІОН
ГРАЧЕВА Е.И.	ЩИННИКОВ П.А.	НИКОЛАЕВА Л.А.
ИЛЮШИН П.В.	МИНГАЛЕЕВА Г.Р.	КАЛАЙДА М.Л.
САФИН А.Р.	ВАНЬКОВ Ю.В.	БОРИСОВ А.В.
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.	АРАКЕЛЯН Э.К.	АНДРЕЕВ В.П.
STANIMIR VALTCHEV	ПАВЛОВ Г.И.	КОРНИЛОВ В.Ю.
RENTIUC RADU DUMITRU	ДМИТРИЕВ А.В.	КОЗЕЛКОВ О.В.
KOLCUN MICHAEL	БОРУШ О.В.	
БОЧКАРЕВ И.В.	ЛАПТЕВ А.Г.	

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-82947 от 31.03.2022 г.

PROCEEDINGS OF THE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS.
ENERGY SECTOR PROBLEMS

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2022
Vol. 24, № 6
November-December
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

**Founder: Kazan State Power Engineering University and the Ministry of
Education of the Russian Federation**

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: PIETRO ZUNINO

The journal covers fundamental and applied research, as well as discussion issues on power engineering and related industries and science.

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. Language of publications: Russian, English.

Sections:

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES
ELECTRICAL SYSTEMS
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING
METHODS AND DEVICES FOR CONTROLLING AND DIAGNOSING MATERIALS,
ARTICLES, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT
ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS
TECHNOSPHERE SAFETY IN ENERGY
TECHNOSPHERE SAFETY IN ENERGY

Editorial board:

IGOR IVSHIN
VASIL KASIMOV
GOLENISHCHEV-KUTUZOV
ALEXANDER
DOVGUN VALERY
GRACHEVA ELENA
ILYUSHIN PAVEL
SAFIN ALFRED
MESHCHERYAKOV VIKTOR
STANIMIR VALTCHEV
PENTIUC RADU DUMITRU
KOLCUN MICHAIL
BOCHKAREV IGOR

BRIAKIN IVAN
SUSLOV KONSTANTIN
FEDOTOV ALEXANDER
ZVEREVA ELVIRA
SHCHINNIKOV PAVEL
MINGALEEVA GUZEL
VANKOV YURY
ARAKELIAN EDIK
PAVLOV GRIGORY
DMITRIEV ANDREY
BORUSH OLESYA
LAPTEV ANATOLY
YAKIMOV NIKOLAY

ILIYA K. ILIEV
VAFIN DANIL
ION V ION
NIKOLAEVA LARISA
KALAI DA MARINA
BORISOV ANDREY
ANDREEV VICTOR
KORNILOV VLADIMIR
KOZELKOV OLEG

Address Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Russian Federation
Tel./fax: +7 (843) 527-92-76
Printing House: LLC «FOLIANT»
Address of the printing house 420111 g. Kazan, Str. Trade Union, 17 V
Email: problems_ener@mail.ru
Site: <https://www.energyret.ru/>
© Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems, 2022.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., ГРАЧЕВА Е.И., АЛЬЗАККАР А., НИЗАМИЕВ М.Ф., ШУМИХИНА О.А., ВАЛТЧЕВ С. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах.	3
ЛАПТЕВ А.Г., ЛАПТЕВА Е.А., АЛАСГАРЛИ С.У. Эффективность охлаждения жидкостей в турбулентном барботажном слое на ситчатых тарелках.	13
ВЛАСОВА А.Ю. Ресурсосберегающие технологии утилизации высокоминерализованных кислых отходов с ионитной части комбинированной водоподготовительной установки на Стерлитамакской ТЭЦ.	25
АВETИСЯН А.С., ЕФИМОВ Д.Н. Анализ аварии на Рефтинской ГРЭС, произошедшей 22.08.2016 года.	37
КОРОЛЕВ В.И., ЗВЕРЕВА Э.Р. Российский опыт применения отходов химводоподготовки в хозяйственной деятельности: перспективы использования при обработке осадков сточных вод (обзорная статья).	47
МАЛАХОВ А.О., ЛАРИОНОВ В.М., КОНСТАНТИНОВ Н.В. Аксиальное распределение температуры газа и скорости звука в трубе с закрученным пламенем.	63
ФИЛИМОНОВА А.А., ВЛАСОВА А.Ю., КАМАЛИЕВА Р.Ф. Методы декарбонизации процесса получения электроэнергии в твердооксидном топливном элементе.	72
ИВАНИЦКИЙ М.С. Токсичность канцерогенных ПАУ в дымовых газах котлов тепловой мощностью до 1 Мвт.	83

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ВАСИЛЬЕВ Д.А., ПАНТЕЛЕЕВА Л.А., ГРАЧЕВА Е.И. Оптимизации режима работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.	92
ИВАНОВ И.Ю., НОВОКРЕЩЕНОВ В.В., ИВАНОВА В.Р. Современное состояние проблем функционирования комплексов релейной защиты и автоматики, применяемых в активно-адаптивной сети.	102

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

СИНИЦЫН А.А., СОЛОВЬЕВА О.В., АХМЕТОВА И.Г., ВАНЬКОВ Ю.В., ЗАКРЕВСКАЯ Л.В., АНАНЬЕВ М.С., ШАКУРОВА Р.З. Результаты разработки технологии лёгких бетонов на основе диатомитовых пород и приборное исследование его теплопроводности.	124
РАЗАКОВ М.А. Особенности теплонапряженности машинного зала при отключении системы отопления.	133

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ДЕМИН А.В., ДЕМИНА Г.В. Экологические характеристики термической утилизации отходов с внешним и внутренним подводом тепловой энергии.	143
МАКОЕВ С.О., АХМЕТОВА И. Г. Биокотокс из илового осадка сточных вод – эффективный субстрат для обеззараживания полигонов ТКО и восстановления качества почв.	153

C O N T E N T S

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

ABDULLAZYANOV EY, GRACHEVA EI, ALZAKKAR A, NIZAMIEV MF, SHUMIKHINA OA, VALTCHEV S. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities.	3
LAPTEV AG, LAPTEVA EA, ALASGARLI SU. Efficiency of liquid cooling in a turbulent bubbling layer on strainer plates.	13
VLASOVA AY. Resource-saving technologies for utilization of highly mineralized acidic waste from the ionite part of the combined water treatment plant at the Sterlitamak thermal power plant.	25
AVETISYAN AS, EFIMOV DN. Analysis of the accident at Reftinskaya GRES, which occurred on 08/22/2016.	37
KOROLEV VI, ZVEREVA ER. Russian experience in the use of chemical water treatment waste in economic activity: prospects for use in the treatment of sewage sludge (review article). ...	47
MALAHOV AO, LARIONOV VM, KONSTANTINOV NV. Axial distribution of gas temperature and sound speed in a pipe with a swirled flame.	63
FILIMONOVA AA, VLASOVA AY, KAMALIEVA RF. Generating electricity in a solid oxide fuel cell decarbonization methods.	72
IVANITSKIY MS. Toxicity of carcinogenic pahs in boiler flue gases thermal capacity up to 1 Mw.	83

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

VASILIEV DA, PANTELEEVA LA, GRACHEVA EI. Optimization of the operating mode of a squirrel-cage induction motor.	92
IVANOV IYU, NOVOKRESHCHENOV VV, IVANOVA VR. Current state of the problems of functioning of relay protection and automation complexes used in an active adaptive network.	102

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

SINIT SIN AA, SOLOVEVA OV, AKHMETOVA IG, VANKOV YV, ZAKREVS KAYA LV, ANANIEV MS, SHAKUROVA RZ. Results of the development of the technology of light-weight concrete based on diatomite rocks and instrument study of its thermal conductivity.	124
RAZAKOV MA. Engine room thermal density specials in heating systems shutdown process.	133

TECHNOSPHERE SAFETY

DEMIN AV., DEMINA GV. Environmental characteristics of thermal utilization of waste with external and internal supply of thermal energy.	143
MAKOEV SO, AKHMETOVA IG. Biocoke from wastewater sludge is an effective substrate for disinfecting Msw polygons and restore soil quality.	153

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621, 620.9

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Абдуллазянов¹ Э.Ю., Грачева² Е.И., Альзаккар³ А., Низамиев⁴ М.Ф.,
Шумихина⁵ О.А., Valtchev⁶ S.

^{1,2,3,4,5} Казанский Государственный Энергетический Университет,
г. Казань, Россия

⁶UNINOVA–CTS, Faculty of Sciences and Technology University NOVA of Lisbon
2829-516 Campus Caparica, Portugal
epp.kgeu@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ. Провести исследование, позволяющее повысить достоверность прогнозирования величины электропотребления и потерь электроэнергии на промышленном предприятии. МЕТОДЫ. Используются методы определения и прогнозирования параметров расхода и потерь электроэнергии на промышленных объектах. РЕЗУЛЬТАТЫ. Для уточнения величины потерь электроэнергии предлагается использовать коэффициенты - учитывающий вид графиков нагрузки и показывающий соотношение значений суммы квадратов токов (мощностей) переменного графика нагрузки и значений суммы средних токов (мощностей), т.е. соотношение потерь электроэнергии при работе нагрузки по переменному и равномерному графикам ($K_{\text{граф}}$), а также коэффициент, учитывающий топологию схемы ($K_{\text{мон}}$). Проведено исследование радиальных и магистральных схем сетей и определены потери электроэнергии с использованием предлагаемых коэффициентов. Рассчитаны величины эквивалентных сопротивлений цеховых схем сетей различной топологии. Приведены эксплуатационные данные участка цеховой сети. Выявлено, что при постоянном технологическом процессе увеличение эквивалентного сопротивления схемы сети обусловлено ростом сопротивлений контактов коммутационных аппаратов, установленных на линиях. Определена величина расчетного отпуска электроэнергии с использованием параметра среднего значения эквивалентного сопротивления. При этом погрешность вычисления расчетного отпуска по отношению к фактическому годовому отпуску электроэнергии составила 2,63%. По данным ретроспективных значений среднего эквивалентного сопротивления схемы возможно определить прогнозируемое значение данного параметра с помощью среднего значения коэффициента изменения эквивалентного сопротивления. Данные характеристики схемы рекомендуется применять при оценке и прогнозировании потерь и расчетного отпуска электроэнергии, что повысит достоверность прогнозируемых параметров для промышленных объектов.*

Ключевые слова: электропотребление; потери электроэнергии; эквивалентное сопротивление; цеховые сети; прогнозирование.

Для цитирования: Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзаккар А., Низамиев М.Ф., Шумихина О.А., Valtchev S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.

PREDICTION AND ANALYSIS OF POWER CONSUMPTION AND POWER LOSS AT INDUSTRIAL FACILITIES

EY. Abdullazyanov¹, EI. Gracheva², A. Alzakkar³, MF. Nizamiev⁴,
OA. Shumikhina⁵, S. Valtchev⁶

^{1,2,3,4,5} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

⁶UNINOVA-CTS, Faculty of Sciences and Technology University NOVA of Lisbon 2829-516
Campus Caparica, Portugal
epp.kgeu@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Conduct a study to improve the reliability of forecasting the magnitude of power consumption and power losses at an industrial enterprise. *METHODS.* Methods are used to determine and predict the parameters of consumption and losses of electricity at industrial facilities. *RESULTS.* To clarify the magnitude of electricity losses, it is proposed to use coefficients that take into account the type of load curves and show the ratio of the values of the sum of the squares of currents (powers) of the variable load curve and the values of the sum of average currents (powers), that is. the ratio of power losses during load operation according to variable and uniform schedules (K_{graph}), as well as a coefficient that takes into account the topology of the circuit (K_{top}). The study of radial and main circuits of networks was carried out and the losses of electricity were determined using the proposed coefficients. The values of equivalent resistances of shop circuits of networks of various topologies are calculated. The operational data of the section of the workshop network are given. It was revealed that with a constant technological process, an increase in the equivalent resistance of the network circuit is due to an increase in the resistance of the contacts of switching devices installed on the lines. The value of the estimated supply of electricity was determined using the parameter of the average value of the equivalent resistance. At the same time, the error in calculating the estimated supply in relation to the actual annual supply of electricity amounted to 2,63%. According to the retrospective values of the average equivalent resistance of the circuit, it is possible to determine the predicted value of this parameter using the average value of the coefficient of change in the equivalent resistance. These characteristics of the scheme are recommended to be used in the assessment and forecasting of losses and the estimated supply of electricity, which will increase the reliability of the predicted parameters for industrial facilities.

Keywords: power consumption; power losses; equivalent resistance; workshop networks; forecasting.

For citation: Abdullazyanov EY, Gracheva EI, Alzakkar A, Nizamiev MF, Shumikhina OA, Valtchev S. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.

Введение

В современных условиях развития России особое внимание уделяется повышению точности процессов прогнозирования электропотребления и выделению, при этом, достоверной величины потерь электроэнергии, чему посвящены работы [1-2] автором Е.И. Грачевой и других. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, кризис в экономике и, особенно, энергетических отраслях, отрицательно влияет на эффективность функционирования оборудования промышленных комплексов. При этом характерно, что наблюдается взаимосвязь между таким важнейшим показателем эффективности работы электротехнических систем, как потери электроэнергии и кризисных явлениях во всех странах, независимо от уровня их развития, что исследуется в работе [3] Грачевой Е.И. и другими. Объясняется это процессами ослабления контроля электропотребления в данные периоды нестабильности экономики при, соответственно, требующих совершенствования методов управления энергетическими комплексами и совершенствования технологических процессов проектирования оборудования, что предлагается А.Р. Сафиним и другими [4], а также Т.И. Петровым [5]. Также в данных условиях наблюдается интерес к краткосрочному прогнозированию с использованием нейросетевых методов, предлагаемых Н.А. Серебряковым в работе [6] и управлению электропотреблением с помощью рангового анализа, рассматриваемого в работе [7] О.Р. Кивчуном. Методы прогнозирования электропотребления, предлагаемые А.С.

Маниковским [8] и технологический анализ электропотребления, представленный в работе [9] С.Д. Зубковым позволяют повысить достоверность оценки исследуемых параметров. Также могут быть приняты при имеющейся достаточной исходной информации для повышения точности и анализа параметров электропотребления результаты работы [10] на основе временных рядов, предлагаемой Дж.Х. Худжасаидовым и другими и модели управления спросом на электроэнергию, разработанные в [11] А.П. Дзюбой. В [12] А.В. Ляхомский и А.А. Шадрин используют для прогнозных моделей электропотребления полносвязную нейронную сеть, что предполагает получение быстрых результатов при учете изменения параметров. Авторами [13] Zhaosu Meng, Huike Sun, Xi Wang для прогнозирования энергопотребления на примере Китая используются марковские модели, что позволяет учесть множество состояний рассматриваемой системы. Авторами [14] S. B. Taieb, J. W. Taylor, R. J. Hyndman и [15] T. Ahmad, H. Chen предлагаются интеллектуальные системы при прогнозировании энергопотребления и спроса на электроэнергию, что получает широкое распространение в современных условиях. На актуальность проводимых исследований указывает тот факт, что данными вопросами заинтересован World Bank - [16] и, в настоящее время, существует вероятность снижения платежеспособности части электропотребителей и промышленных объектов.

Одна из главных задач развития и локализации промышленных производств - технологический суверенитет России. При этом необходимо, с одной стороны, увеличивать объемы производства электроэнергии, а с другой – совершенствовать методы прогнозирования электропотребления, в том числе потребителями жилых комплексов, что предлагается Ю.И. Солуяновым и другими в [17-18].

Эффективное внедрение мероприятий по экономии электроэнергии, а также, энергосберегающая политика государства, требуют разработки новых подходов к повышению достоверности прогнозируемых значений электропотребления.

Другим важным аспектом развития систем промышленного электроснабжения является повышение точности оценки потерь электроэнергии. Потери электроэнергии существенно влияют на технические и экономические характеристики большинства элементов электротехнических комплексов, так как их стоимость является частью приведенных затрат и эксплуатационных издержек. Достижение оптимального соотношения в общей структуре электропотребления между величиной электропотребления и уровнем потерь – одна из основных задач эффективного функционирования электрических систем.

Достижение технологической безопасности России требует особых подходов к вопросам выявления непроизводительного расхода электроэнергии. Современное развитие электроэнергетики позволяет повысить информационное обеспечение для разработки новых алгоритмов прогнозирования потребления электроэнергии, основанных на уточнении схемных и режимных параметров систем электроснабжения. Как известно, энергосберегающие технологии и оборудование позволяют снизить уровень электропотребления. С другой стороны, автоматизация технологических процессов и замена в них различных видов топлив на электроэнергию приводят к росту потребления электроэнергии. Такие условия делают особенно актуальной задачу достоверного прогнозирования электропотребления, оптимальное решение которой позволяет найти резервы экономии электроэнергии на основании исследования величины её расходов.

При этом средства от сэкономленной электроэнергии могут быть направлены на модернизацию электрооборудования и технологических процессов, повышение уровня зарплат персонала эксплуатационных служб, а также на увеличение технического перевооружения электрических сетей и систем электроснабжения.

Научной и практической значимостью предлагаемой статьи является совершенствование методов прогнозирования электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах, что позволяет повысить достоверность параметров расходов электроэнергии.

Отличия представленной работы от результатов исследований, проводимых российскими и зарубежными учеными, заключаются в использовании величины эквивалентного сопротивления схемы цеховой сети для уточнения параметров электропотребления и потерь электроэнергии.

Материалы и методы

Для прогнозирования электропотребления предлагается использовать величину эквивалентного сопротивления рассматриваемой схемы. Как правило, схемы подразделяются на 2 типа (рис.1).

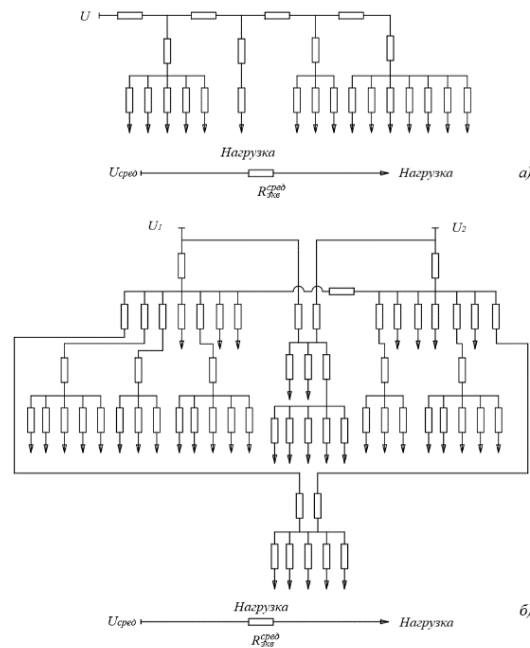


Рис.1. Типы схем внутрицехового электроснабжения потребителей: а) схема в виде одиночной линии с одной точкой присоединения источников питания и точкой присоединения электроприемников б) схема с несколькими точками источников питания и присоединений электроприемников

Fig.1. Types of circuits for intrashop power supply to consumers: a) a circuit in the form of a single line with one point of connection of power sources and a point of connection of power receivers b) a scheme with several points of power sources and connections of electrical receivers

Первый тип – рис.1 а) – одиночная линия с точкой присоединений источников питания и точкой присоединения потребителей. Для такой схемы характерно распределение токов нагрузки по элементам пропорционально величинам их сопротивлений. Данную схему можно представить как простейшую, имеющую один элемент – эквивалентное физическое сопротивление - $R_{экв}^{\phi}$.

Определим потери электроэнергии для исследуемой схемы

$$W_{cx} = 3R_{экв}^{\phi} \sum_{t=1}^{T_p} I_{i_{нг}}^2 = 3R_{экв}^{\phi} \cdot I_{ср.нг}^2 \cdot K_{граф} \cdot T_p, \quad (1)$$

где $I_{i_{нг}}$ - ток на интервалах графика нагрузки; T_p - интервал времени расчета, ч; t - интервал времени изменения токов графика, ч; $I_{ср.нг}$ - среднее значение тока, А; $K_{граф}$ - значение коэффициента графиков, показывающее соотношение значений суммы квадратов токов (мощностей) переменного графика и значений суммы средних токов (мощностей). Или, другими словами, соотношение потерь электроэнергии при работе нагрузки по переменному и равномерному графикам.

$$K_{граф} = \frac{R_{экв}}{R_{экв}^{\phi}} \quad (2)$$

отсюда

$$R_{экв}^{сред} = K_{граф} \cdot R_{экв}^{\phi} \quad (3)$$

Определим $I_{ср.нг}^2$ и $R_{экв}^{сред}$

$$I_{ср.нг}^2 = \frac{W^2}{\left(\sqrt{3} \cdot U_{сред} \cdot \cos \varphi_{сред} \cdot T_p\right)^2} \quad (4)$$

$$R_{экв}^{сред} = \frac{\square W \cdot U_{сред}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{сред}}{P_{сред}^2 \cdot T_p}, \quad (5)$$

где W - отпуск электроэнергии в сеть, $МВт\cdot ч$; $P_{ср}$ - величина средней мощности нагрузки, $МВт$; ΔW - потери электроэнергии, $МВт\cdot ч$; $U_{ср}$ - среднее напряжение сети, $кВ$; $\cos\varphi_{ср}$ - среднее значение коэффициента мощности нагрузки.

Второй тип схем – сюда относятся схемы с несколькими точками питания и присоединений нагрузки (рис. 1 б). Для схемы 2 характерным является зависимость токов нагрузок от расположения узлов питания, места присоединений и мощности нагрузки и, в меньшей степени – от сопротивлений участков сети. Для уточнения параметров схем второго типа требуется введение нового параметра – коэффициента топологии - $K_{мон}$, показывающего соотношение потерь активной мощности (электроэнергии) при фиксированном расположении электропотребителей и расположении нагрузок в соответствии с сопротивлением элементов схемы при $K_{мон} = 1$.

Тогда $R_{экв}^{ср}$ в сопротивления по (5) определится

$$R_{экв}^{ср} = R_{экв}^{\phi} \cdot K_{граф} \cdot K_{мон} \quad (6)$$

$K_{мон} = 1$ для схемы 1 (рис.1 а), так как протекающие токи по участкам схемы распределяются в соответствии со значениями их сопротивлений и, при постоянной величине передаваемой электроэнергии (равномерный график нагрузки), справедливы соотношения

$$\begin{aligned} K_{мон} &= K_{граф} = 1 \\ R_{экв}^{ср} &= R_{экв}^{\phi} \end{aligned} \quad (7)$$

Одним из частных случаев второй схемы является распределительный щит с фиксированным узлом питания и несколькими узлами питаемых электроприемников.

Вычислим для фиксированного момента времени значение суммы потерь активной мощности для исследуемых участков второй схемы и разделим полученное значение на величину квадрата тока головного участка $I_{г.уч}^2$ (или, другими словами, на величину квадрата суммы токов участков схемы).

В результате получено значение эквивалентного сопротивления схемы 2 с учетом $K_{мон}$ в фиксированный момент времени без учета $K_{граф}$.

$$R_{экв} = R_{экв}^{\phi} \cdot K_{мон} = \frac{\sum_{i=1}^n I \cdot I_{ip}^2 \cdot R_i}{I_{г.уч}^2} \quad (8)$$

где I_{ip} - рабочий ток i -ого элемента (участка, отпайки); n – число участков схемы; R_i - сопротивление i -ого участка схемы; $I_{г.уч}$ - ток головного участка схемы; $R_{экв}^{\phi}$ определяется по (9) для схем радиальной топологии и (10) – магистральной топологии.

$$R_{экв.p}^{\phi} = \frac{\frac{\sum_{i=0}^n R_{i20} \cdot l_{icx}}{n} \left[1 + \alpha \cdot (\theta_{инров} - 20) \right] + \frac{\sum_{i=1}^m R_{i,an}}{n}}{n}, \quad (9)$$

где R_{i20} - параметр удельного сопротивления одного метра i -ой линии схемы при температуре $20^{\circ}C$, $МОм/м$; l_{icx} – параметр длины i -ой линии схемы, $м$; $\theta_{инров}$ - параметр температуры проводника i -ой линии, $^{\circ}C$; $R_{i,an}$ - параметр сопротивления контактов электрических низковольтных аппаратов на линии, $МОм$; n - число аппаратов i -ой участка схемы; α - параметр температурного коэффициента увеличения сопротивления материала проводника, $1/^{\circ}C$.

Для схемы магистральной топологии, выполненной распределительным шинопроводом с распределенной нагрузкой

$$\begin{aligned} R_{экв.шд}^{\phi} &= \left[R_{0шд20} \cdot l_{шд} \cdot \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(2 + \frac{1}{n} \right) \right] \cdot \left[1 + \alpha_{шд} (\theta_{шд} - 20) \right] + \\ &+ \frac{R_{20} \cdot l_{np.омс}}{n} \cdot \left[1 + \alpha_{np.омс} (\theta_{np.омс} - 20) \right] + \frac{\sum_{i=1}^K R_{ian}}{n} \end{aligned} \quad (10)$$

где $l_{шд}$ - значение длины распределительного шинопровода, $м$; $R_{0шд20}$ - сопротивление одного метра распределительного шинопровода при температуре $20^{\circ}C$; n - число электроприемников, питающихся от распределительного шинопровода; R_{20} - сопротивление

одного метра провода ответвления от шинпровода при температуре 20°C , мОм/м ; $\theta_{\text{шд}}$ - значение температуры шинпровода, $^{\circ}\text{C}$; $\theta_{\text{пр.отв.}}$ - значение температуры токопроводящей жилы ответвления, $^{\circ}\text{C}$; $l_{\text{пр.отв.}}$ - параметр длины провода ответвления, м ; $\alpha_{\text{пр.отв.}}$ - параметр температурного коэффициента увеличения сопротивления материала провода ответвления, $1/^{\circ}\text{C}$; $\alpha_{\text{шд}}$ - параметр температурного коэффициента увеличения сопротивления материала распределительного шинпровода, $1/^{\circ}\text{C}$; $\sum_{i=1}^K R_{\text{тан}}$ - сумма сопротивлений контактов

коммутационных аппаратов установленных на одном ответвлении, мОм ; K - количество низковольтных коммутационных аппаратов на одном ответвлении.

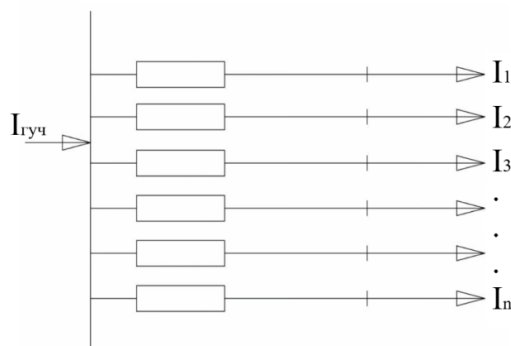


Рис. 2 Обобщенная схема замещения распределительного щита

Fig.2. Generalized switchboard equivalent circuit

Результаты расчета $R_{\text{экв}}$ и $R_{\text{экв}}^{\phi}$ с учетом компоновок оборудования распределительного щита и технических параметров – числа ответвлений, температуры нагревания токопроводящих жил, температуры окружающей среды даны в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты расчета $R_{\text{экв}}$ и $R_{\text{экв}}^{\phi}$

Номер опыта №	Средний длительно допустимый ток $I_{\text{дол.сред.}}$, А	Среднее значение длины провода ответвления $l_{\text{ср.отв.}}$, м	Число ответвлений n	Среднее значение коэффициента загрузки линий, $K_{\text{зг}}$	Температура окружающей среды, $\theta_{\text{о.с.}}$, $^{\circ}\text{C}$	$R_{\text{экв}}$	$K_{\text{топ}}$	$R_{\text{экв}}$	$K_{\text{топ}}$	$R_{\text{экв}}^{\phi}$
1	20,50	16,5	16	0,460	20	22,10	1,10	14,11	0,70	20,00
2	20,60	16,6	14	0,480	20	24,20	1,04	15,62	0,65	23,50
3	20,80	16,3	12	0,500	20	26,40	1,02	17,05	0,64	26,20
4	21,20	15,8	10	0,550	20	30,60	1,08	19,80	0,70	28,70
5	21,8	15,9	8	0,600	20	35,50	1,04	23,10	0,74	31,40

где $K_{\text{топ}} = \frac{R_{\text{экв}}}{R_{\text{экв}}^{\phi}}$

Эквивалентные сопротивления $R_{\text{экв}}$ и $R_{\text{экв}}^{\phi}$ вычисляются по (5). Для расчета $R_{\text{экв}}$ необходимо учитывать нагревание токопроводящих жил ответвлений и сопротивление контактов низковольтных аппаратов, установленных на линиях. При вычислении $R_{\text{экв}}$ данные параметры не учитываются. Результаты расчетов показали, что при вычислении $R_{\text{экв}}$ - $K_{\text{топ}}$ близок к единице.

При этом, использование величины $R_{\text{экв}}$ для оценки электропотребления и потерь электроэнергии в элементах оборудования цеховой сети будет вносить значительную погрешность в расчеты. Поэтому целесообразно составлять полиномиальные модели для исследования уровня потерь. Среднее значение эквивалентного сопротивления $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ рекомендуется для расчетов активных потерь по средним значениям тока или активной мощности графика нагрузки для схем цеховых сетей различной структуры за интервал времени вычисления $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$. Например, вычислим значение $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ участка схемы

низковольтной сети ОАО «Казанский электромеханический завода», включающего в себя распределительный щит с подключенными электроприемниками. Средняя длина ответвлений к электроприемникам $l_{cp}=16,50$ м, при числе потребителей – 16, длительно допустимый ток (среднее значение) $I_{сред.дон}=20,50$ А, средний коэффициент загрузки линий $K_{зс}=0,45$, температура окружающей среды $\theta_{о.с.}=20^{\circ}\text{C}$, средний коэффициент мощности двигателей электроприемников $\cos\varphi_{сред}=0,60$. При этом известными данными являются - величина годового электропотребления $W_{год}=95,52$ МВт·ч, беспотерьный отпуск электроэнергии потребителям $W_{б\text{пот}}=92,94$ МВт·ч, потери электроэнергии $\Delta W=2,58$ МВт·ч.

Определим значение суммы квадратов средней мощности при годовом числе часов работы $T_p=1987$ ч.

$$\sum P_{сред}^2 = P_{сред} \cdot T_p = \frac{\Delta W^2}{T_p^2} \cdot T_p = \frac{\Delta W^2}{T_p} = \frac{2,58^2}{1987} = 3,35 \cdot 10^{-3} \text{ МВт}$$

Тогда по (5)

$$R_{экв}^{сред} = \frac{\square W \cdot U_{сред}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{сред}^2}{P_{сред}^2 \cdot T_p} = \frac{2,58 \cdot 0,38^2 \cdot 0,60^2}{3,35 \cdot 1987 \cdot 10^{-3}} = 22,5 \text{ мОм}$$

Результаты исследования показали, что при постоянном технологическом процессе увеличение значения $R_{экв}^{сред}$ (табл.2) обусловлено ростом сопротивлений контактов коммутационных аппаратов, установленных на линиях схемы. Иначе величина $R_{экв}^{сред}$ оставалась бы постоянной и изменение нагрузочных потерь в низковольтной сети соответствовало бы квадрату пропускаемой электроэнергии (табл.2).

Результаты и обсуждение

Определим потери электроэнергии по данным 2018 г.

$$\Delta W = \frac{R_{экв}^{сред} \cdot P_{сред}^2 \cdot T_p}{U_{сред}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{сред}} \quad (11)$$

$$\Delta W = \frac{22,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,35 \cdot 1987}{0,38^2 \cdot 0,6^2} = 2,66 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

То есть, при постоянном технологическом цикле для исследуемой сети потери составили $\Delta W_{\%} = 2,86\%$ от беспотерьного отпуска электроэнергии (92,94 МВт·ч).

Определим величину расчетного отпуска электроэнергии

$$W_{расч} = \frac{100}{2,86} \cdot \frac{R_{экв}^{сред} \cdot P_{сред}^2 \cdot T_p}{U_{сред}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{сред}} \quad (12)$$

$$W_{расч} = 93,01 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Тогда погрешность определения $W_{расч}$ по величине эквивалентного сопротивления по отношению к фактическому годовому отпуску электроэнергии за 2018 г. (табл.2) δ , % составит

$$\delta, \% = \frac{W_{год} - W_{расч}}{W_{год}} \cdot 100 = \frac{95,52 - 93,01}{95,52} = 2,63\%$$

В табл.2 приведены эксплуатационные и расчетные данные расхода электроэнергии.

Определим фактическое значение изменения потерь электроэнергии за 2019 г.

$$\Delta W = (R_{экв19}^{сред} - R_{экв18}^{сред}) \sum P_{сред19}^2 \cdot 10^{-3} \cdot T_p = (22,4 - 22,5) \cdot 3,33 \cdot 10^{-3} \cdot 1982 = -0,66 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Знак «-» показывает, что величина потерь снизилась на 0,66 МВт·ч.

Таблица 2

Электропотребление за 2018-2022 г. и прогноз на 2023 г.

Год	2018	2019	2020	2021	2022	2023 (ожидаемое значение)
Параметры						
Годовое число часов работы, T_p , ч	1987	1982	1987	1971	1971	1972
Годовой отпуск электроэнергии, $W_{год}$, МВт·ч	95,52	95,31	95,55	94,92	94,92	95,00

Беспотерьный отпуск электроэнергии, $W_{\text{блп}}, \text{МВт} \cdot \text{ч}$	92,94	92,74	93,00	92,36	92,36	92,43
Потери электроэнергии, $\Delta W, \text{МВт} \cdot \text{ч}$	2,58	2,57	2,57	2,56	2,56	2,57
$\sum P_{\text{сред}}^2, \text{МВт} \cdot \text{ч} \cdot 10^{-3}$	3,35	3,33	3,35	3,32	3,32	3,34
$R_{\text{экв}}^{\text{сред}}, \text{МОм}$	22,5	22,4	22,3	22,6	22,6	22,6
$\overline{\Delta W}$ при $R_{\text{экв}}^{\text{сред}} = \text{const}, \text{МВт} \cdot \text{ч}$	2,66	2,66	2,66	2,64	2,64	2,64
Изменение $\overline{\Delta W}$ по годам		-0,33	-0,34	0,66	0	0
Коэффициент изменения $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ по годам K	-	0,996	0,996	1,009	1	1
Среднее значение коэффициента изменения $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ по годам $K_{\text{ср}}$				1,0002		

По данным ретроспективных значений $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ возможно определить прогнозируемое значение $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ с использованием среднего значения коэффициента изменения эквивалентного сопротивления.

Например, определим $R_{\text{экв}24}^{\text{сред}}$ и $R_{\text{экв}25}^{\text{сред}}$.

$$R_{\text{экв}24}^{\text{сред}} = K_{\text{ср}} \cdot R_{\text{экв}23}^{\text{сред}} = 22,605 \text{ МОм}$$

$$R_{\text{экв}25}^{\text{сред}} = 22,61 \text{ МОм}$$

Полученные результаты могут быть рекомендованы для оценки и анализа потерь по выражению (11) и прогнозирования расчетного отпуска электроэнергии по (12).

Заключение

Для повышения достоверности параметров электропотребления на промышленных предприятиях может быть рекомендовано применение величины эквивалентного сопротивления схемы сети. При этом предлагается в качестве корректирующей величины эквивалентного сопротивления использовать коэффициент изменения эквивалентного сопротивления для исследуемой схемы, показывающий динамику $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ за рассматриваемые интервалы времени. Однако, следует отметить, что значение данного коэффициента для временного интервала прогнозирования может отличаться от ретроспективных значений. Уменьшение величины эквивалентного сопротивления схемы возможно в случаях замены электрооборудования и отработавших ресурсы электрических аппаратов, а также внедрения мероприятий по энергосбережению, направленных на уменьшение уровня потерь электроэнергии.

Предлагаемый алгоритм позволяет повысить эффективность прогнозирования расходов электроэнергии и оценки потерь электроэнергии в среднесрочной перспективе.

Литература

1. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С. 87-96
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутриводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2020. № 2. С. 65-74.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутриводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2021. № 1. С. 93-104.
4. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., Максимов В.В., Цветков А.Н., Гибадуллин Р.Р., Петров Т.И. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // Вестник КГЭУ. 2018. №4(40). С. 77-85.
5. Петров Т.И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей // Проблемы энергетики. 2021. том 23. №3. С. 70-79

6. Серебряков Н.А. Применение адаптивного ансамблевого нейросетевого метода для краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса районных электрических сетей // Омский научный вестник. 2021. №1(175). С.39-45.
7. Кивчун О.Р. Методика комплексирования процедур рангового анализа при управлении электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 21. С.200-209.
8. Маниковский А.С. Анализ методов прогнозирования электропотребления // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. 2021. №60. С.23-30.
9. Зубков С.Д. Техноэнологический анализ электропотребления предприятия // Инновационная наука. 2020. №2. С.20-22.
10. Худжасаидов Дж.Х., Русина А.Г., Матренин П.В., Дмитриев С.А., Сафаралиев М.Х. Разработка моделей прогнозирования электропотребления на основе временных рядов в изолированных энергосистемах // ЭСиК. 2020. №3(48). С.23-27.
11. Дзюба А.П. Модель управления спросом на электроэнергию промышленных предприятий, подключенных к сетям производителей электроэнергии // Вестник СурГУ. 2021. Вып 1(31). С.12-25.
12. Ляхомский А.В., Шадрин А.А. Прогнозная модель электропотребления на основе полносвязной нейронной сети // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. №1. Вып. 18. С.107-113.
13. Zhaosu Meng, Huike Sun, Xi Wang. Forecasting Energy Consumption Based on SVR and Markov Model: A Case Study of China // Front. Environ. Sci., 06 April 2022 Sec. Environmental Economics and Management.
14. S. B. Taieb, J. W. Taylor, and R. J. Hyndman. Hierarchical probabilistic forecasting of electricity demand with smart meter data. Journal of the American Statistical Association, 2020.
15. T. Ahmad and H. Chen. Deep learning for multi-scale smart energy forecasting. Energy, vol.175, с.98112, 2019.
16. World Bank, Electric Power Consumption, The World Bank Group, Washington, D.C., USA, 2021. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC>.
17. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Галицкий Ю.Я., Чернова Н.В., Ахметшин А.Р. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // Электричество. 2021. № 6. С. 62–71.
18. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И., Горлов А.Н. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Московской области // Промышленная энергетика № 4. 2022. С. 20-28.

Авторы публикации

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

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Ахмад Альзаккар – аспирант КГЭУ.

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Шумихина Ольга Александровна – студентка, Казанского государственного энергетического университета.

Stanimir Valtchev – Associate Professor of Universidade NOVA of Lisbon, Portugal.

References

1. Gracheva E.I., Shakurova Z.M., Abdullazyanov R.E. Comparative analysis of the most common deterministic methods for determining electricity losses in workshop networks. *Problems of energy*. 2019;5:87-96
2. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Shakurova Z.M. Analysis and evaluation of energy savings in internal plant power supply systems. *Problems of energy*. 2020;2:65-74.
3. Gracheva EI, Naumov OV, Gorlov AN, Shakurova Z.M. Algorithms and probabilistic models of the parameters of the functioning of intra-factory power supply. *Problems of energy*. 2021;1:93-104.

4. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM, Maksimov VV, et al. Development of a method for topological optimization of electrical machines based on a genetic algorithm. *Bulletin of KSEU*. 2018;4 (40):77-85.
5. Petrov TI. Modification of the genetic algorithm for complex topological optimization of the rotor of synchronous motors. *Energy Problems*. 2021;23(3):70-79
6. Serebryakov NA. Application of the adaptive ensemble neural network method for short-term forecasting of power consumption of the electrical complex of district electrical networks. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021;1(175):39-45.
7. Kivchun O.R. The method of complexing the procedures of rank analysis in the management of power consumption of objects of the regional electrotechnical complex. *Izvestia of the TulGU. Technical science*. 2021;21:200-209.
8. Manikovsky A.S. Analysis of methods for forecasting power consumption. *Collected scientific papers DONIZhT*. 2021;60:23-30.
9. Zubkov S.D. Technocenological analysis of the enterprise's power consumption. *Innovative science*. 2020;2:20-22.
10. Khujasaidov JKh, Rusina AG, Matrenin PV, Dmitriev SA, et al. Development of power consumption forecasting models based on time series in isolated power systems. *ESiK*. 2020;3 (48):23-27.
11. Dziuba AP. Model of demand management for electricity of industrial enterprises connected to the networks of electricity producers. *Bulletin of SurGU*. 2021;1(31):12-25.
12. Lyakhovsky AV, Shadrin AA. Predictive model of power consumption based on a fully connected neural network. *Electrotechnical and information complexes and systems*. 2022;1. (18):107-113.
13. Zhaosu Meng, Huike Sun, Xi Wang. Forecasting Energy Consumption Based on SVR and Markov Model: A Case Study of China. *Front. Environ. Sci.*, 06 April 2022 *Sec. Environmental Economics and Management*.
14. S. B. Taieb, J. W. Taylor, and R. J. Hyndman. Hierarchical probabilistic forecasting of electricity demand with smart meter data. *Journal of the American Statistical Association*, 2020.
15. T. Ahmad and H. Chen. Deep learning for multi-scale smart energy forecasting. *Energy*, vol.175. c.98112, 2019.
16. World Bank, Electric Power Consumption, The World Bank Group, Washington, D.C., USA, 2021. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC>.
17. Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Galitsky Yu.Ya., Chernova N.V., Akhmetshin A.R. Actualization of the normative values of the specific electrical load of apartment buildings in the Republic of Tatarstan. *Electricity*. 2021;6: 62–71.
18. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI, et al. Analysis of the actual electrical loads of multi-apartment residential buildings in the Moscow region. *Industrial Energy*. 2022;4:20-28.

Authors of the publication

Edward Y. Abdullazyanov – Rector of Kazan State Energy University.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Akhmad Alzakkar – postgraduate student of Kazan State Power Engineering University.

Marat F. Nizamiev – Kazan State Power Engineering University.

Olga A. Shumikhina – Kazan State Energy University.

Stanimir Valtchev – Associate Professor of Universidade NOVA of Lisbon, Portugal.

Получено 21.11.2022г.

Отредактировано 28.11.2022г.

Принято 29.11.2022г.



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ТУРБУЛЕНТНОМ БАРБОТАЖНОМ СЛОЕ НА СИТЧАТЫХ ТАРЕЛКАХ

Лаптев А.Г., Лаптева Е.А., Аласгарли С.У.

Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань

Grivka100@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть и решить задачу определения тепломассообменной эффективности и конструктивных характеристик барботажных ситчатых тарелок при охлаждении жидкой фазы и нагрева газа. Моделируется процесс контактного испарительного охлаждения воды воздухом в турбулентном барботажном слое при пенном режиме. МЕТОДЫ. Использован подход с применением тепловых и массообменных чисел единиц переноса, где коэффициенты тепло-и массоотдачи вычисляются по критериальным выражениям или математической модели. Записано дифференциальное уравнение теплообмена в жидкой фазе с межфазным источником теплоты и уравнением баланса. РЕЗУЛЬТАТЫ. Приняты известные допущения о идеальном вытеснении газовой фазы по высоте газожидкостного слоя. Рассмотрены частные случаи записи уравнения теплообмена в виде ячейочной модели структуры потока жидкой фазы. Дан алгоритм определения термодинамических параметров при охлаждении воды воздухом с расчетом профилей температур воды и воздуха по длине ситчатой тарелки. Показаны примеры расчетов температуры охлаждаемой воды и нагреваемого воздуха при различной структуре потока и сравнение с аналогичным процессом на макете градирни с регулярной сетчатой насадкой. Сделаны выводы об эффективности барботажных и насадочных аппаратов. Представленная математическая модель и алгоритм расчета может использоваться при проектировании или модернизации барботажных аппаратов в различных отраслях промышленности и энергетике.

Ключевые слова: барботаж; контактные устройства; тепломассообмен; моделирование; структура потока.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках научного проекта РНФ 18-79-101-36

Для цитирования: Лаптев А.Г., Лаптева Е.А., Аласгарли С.У. Эффективность охлаждения жидкостей в турбулентном барботажном слое на ситчатых тарелках // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 13-24. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-13-24.

EFFICIENCY OF LIQUID COOLING IN A TURBULENT BUBBLING LAYER ON STRAINER PLATES

AG. Laptev, EA. Lapteva, SU. Alasgarli

Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan

Grivka100@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Consider and solve the problem of determining the heat and mass exchange efficiency and design characteristics of bubble strainer plates during liquid phase cooling and gas heating. Simulate the process of contact evaporative cooling of water with air in turbulent bubble layer under foam mode. METHODS. The approach is used using heat and mass exchange numbers of transfer units, where coefficients of heat and mass transfer are calculated by criteria expressions or mathematical model. A differential equation for heat exchange in the liquid phase with an inter-phase heat source and a balance equation is written. RESULTS. There are known assumptions about the ideal displacement of the gas phase by the height of the gas-liquid layer. The article considers specific cases of recording of heat exchange equation in the form of cell model of liquid phase flow structure. The algorithm of determination of thermodynamic parameters at cooling water by air with calculation of profiles of water and air temperatures along the length of strained plate is given. Examples of calculation of temperature of cooled water and heated air with different flow structure and comparison with the similar process on the cooling tower model with regular mesh nozzle are shown. The conclusions about the effectiveness

of bubble and nozzle devices are made. The presented mathematical model and calculation algorithm can be used in the design or modernization of barbotage devices in various industries and energy.

Keywords: bubbling; contact devices; heat and mass transfer; modeling; flow structure.

For citation: Laptev AG., Lapteva EA., Alasgarli SU. Efficiency of liquid cooling in a turbulent bubbling layer on strainer plates. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):13-24. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-13-24.

Введение

Тепломассообменные аппараты с непосредственным контактом газо (паро) жидкостных сред применяются в различных отраслях промышленности и энергетике для проведения процессов абсорбции газов, ректификации, десорбции, охлаждения (нагрева) газов и жидкостей, а также мокрой очистки технологических или дымовых газов от различного вида дисперсной фазы. Практически все эти процессы сопровождаются переходом теплоты из одной фазы в другую. Физическое и математическое моделирование таких процессов является актуальной проблемой в теоретических и прикладных исследованиях при разработке новых или модернизированных аппаратов конденсационного охлаждения газа [1], интенсификации процессов в аппаратах [2], при абсорбции газов в насадочных колоннах [3]. Например, на тепловых станциях в процессах водоподготовки применяются декарбонизаторы и термические деаэраторы различных конструкций, эффективность которых зависит от температурного режима при десорбции растворенного кислорода [4], термической деаэрации [5], влиянии температуры на эффективность деаэрации [6]. На предприятиях нефтехимии процессы абсорбции газов часто сопровождаются тепловыми эффектами, что необходимо учитывать в расчетах эффективности массопередачи в насадочных колоннах [7] и на барботажных тарелках [8]. Несмотря на многочисленные исследования и математическое моделирование процессов переноса на барботажных тарелках в литературе отсутствует алгоритм расчета тепловой эффективности в жидкой и газовой фазах с минимальной экспериментальной информацией.

Целью данной статьи является определение эффективности тепломассообмена на основе применения приближенной и численной математических моделей процессов испарительного охлаждения жидкой фазы газом в турбулентном барботажном слое на тарелках в колонных аппаратах.

Материалы и методы

Гидравлические характеристики барботажа

В промышленности многие десятилетия применяются ситчатые, провальные, колпачковые, клапанные, струйные и комбинированные тарелки, которые постоянно совершенствуются и модернизируются, например с дисперсно-кольцевыми потоками [7], струйно-направленные [8] и ситчато-клапанные тарелки [9].

Наиболее конструктивно простыми, на ряду с провальными, являются ситчатые тарелки. Однако, по сравнению с провальными они имеют более широкий интервал устойчивой работы. Например, при нормальных условиях для системы воздух-вода и других двухфазных сред с близкими к ним теплофизическими свойствами, средняя скорость газа в колонне примерно составляет от 0,6 до 1,2 м/с, а высота статического столба жидкости (т.е. без учета газа) от 0,01 до 0,05 м, газосодержание от 0,5 до 0,8 м³/м³, высота пены до 0,2 м.

При относительно не больших скоростях газа на ситчатой тарелке не все отверстия участвуют в процессе барботажа, а часть из них занята провалом (утечкой) жидкости. Преимущественно это происходит в зоне у приемной планки, где высота статического столба жидкости больше на несколько миллиметров из-за градиента к сливной планке. Схема процесса барботажа в колонне с ситчатыми тарелками показана на рис. 1.

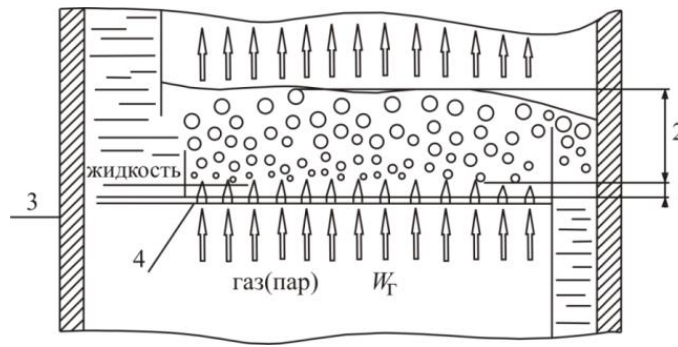


Рис. 1. Схема движения потоков на барботажной тарелке и структура барботажного слоя: 1 – область струй; 2 – пенный слой; 3 – стенка колонны; 4 – тарелка.

Fig.. 1. Flow diagram on the bubble plate and structure of the bubble layer: 1 - jet area; 2 - foam layer; 3 - column wall; 4 - plate.

Минимальная скорость газа в отверстиях тарелки, при которой прекращается утечка жидкости, находится по полуэмпирическому выражению [10]

$$W_{\text{omin}} = \left(1 - \frac{V_{\text{жв}}}{\alpha_o \sqrt{2gh_w}} \right) \left(\frac{2(\rho_{\text{ж}} gh_w - \Delta P_{\sigma})}{\rho_{\text{г}} (2\xi + 1)} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где $V_{\text{жв}}$ - приведенный объемный расход жидкости на длину сливной планки, $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{с})$; $\alpha_o = 0,62$ - коэффициент расхода; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления тарелки без жидкости ($\xi \approx 1,8$); $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{г}}$ - плотности жидкости и газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; ΔP_{σ} - перепад давления, вызванный силами поверхностного натяжения, Па; $h_w = h_{\text{сп}} + \Delta h$ - высота слоя жидкости при отсутствии провала, м; $h_{\text{сп}}$ - высота сливной планки, м, Δh - высота жидкости над сливной планкой (подпор жидкости), м.

Высота статического столба жидкости вычисляется по выражению [10]

$$h_{\text{ст}} = 0,787 V_{\text{ж,в}}^{0,21} h_{\text{сп}}^{0,56} W_{\text{к}}^m [1 - 0,31 \exp(-0,11 \mu_{\text{ж}})], \quad (2)$$

где $W_{\text{к}}$ - средняя скорость газа в колонне, $\text{м}/\text{с}$; $\mu_{\text{ж}}$ - динамическая вязкость жидкости, МПа с; $m = 0,05 - 4,6 h_{\text{сп}}$.

Например, при $V_{\text{ж,в}} = 2,8 \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{с})$, $(10 \text{ м}^3/\text{м} \cdot \text{ч})$; $h_{\text{сп}} = 0,04$; м $W_{\text{к}} = 1,0$ м/с; $\mu_{\text{ж}} = 1,0$ МПа с (вода при 20°C), получаем $h_{\text{ст}} = 0,024$ м. Минимальная скорость газа (воздуха) по формуле (1) $W_{\text{omin}} = 11,2$ м/с. Отсюда при скорости газа $W_{\text{к}} = 1,0$ м/с относительное свободное сечение тарелки (отверстий) должно быть $F_o = W_{\text{к}}/W_{\text{omin}} = 0,09$ (9%).

Эффективность теплообмена в барботажном слое

При составлении математических моделей процессов всегда принимается ряд допущений, которые не противоречат физическим представлениям о явлении переноса и не влияют существенно на точность моделирования. В колонном аппарате в межтарельчатом пространстве принимается идеальное смешение газа, т.е. температура и концентрация на выходе из барботажного слоя усредняются и на следующую вышерасположенную тарелку на входе имеют одинаковые значения по всему сечению. Кроме этого средняя скорость газа в слое на один – два порядка больше средней скорости жидкой фазы и учитывая, что высота газожидкостного слоя относительно размера аппарата небольшая (0,1-0,20 м) режим движения газа принимается с идеальным вытеснением. Эти два допущения широко применяются в моделировании барботажных тарелок и соответствуют экспериментальным данным различных авторов на ситчатых [7], клапанных [8] и провальных тарелках [10].

Структура потока жидкой фазы имеет более сложный характер из-за наличия байпасных, циркулирующих зон, областей с полным перемешиванием, а также с повышенным брызгоуносом при больших скоростях газовой фазы. Кроме этого сказывается

наличие градиента уровня жидкости и неравномерности скорости газа на входе. Гидродинамика потока жидкой фазы и, соответственно тепломассообмен, чаще описываются с применением моделей структуры потока – диффузионной или ячеечной. Также применяются более сложные модели – комбинированные. За последние 20-30 лет все более находит применение численное моделирование явлений переноса, связанное с решением систем дифференциальных уравнений с частными производными. Из-за сложного характера распределения в барботажном слое межфазной поверхности, которая образуется в процессе диспергирования газа в слой жидкости, системы дифференциальных уравнений записываются с применением объемных межфазных источников импульса, массы и теплоты, а также с средними коэффициентами турбулентного обмена в ядре потоков, которые также существенно зависят от режима барботажа на клапанных и ситчатых тарелках [11], а также на колпачковых тарелках с учетом химических реакций [12].

Тепловая и массообменная эффективность

Далее в качестве примера рассмотрен процесс охлаждения жидкости газовым потоком. Эффективность процессов записывают исходя из реально достигнутых показателей к максимально возможным.

Тепловые эффективности охлаждения жидкости (воды) и нагрева газа, записанные через разности температур [13]

$$E_{\text{ж}} = \frac{T_{\text{жн}} - T_{\text{жк}}}{T_{\text{жн}} - T_{\text{мт}}^*}; E_{\text{г}} = \frac{T_{\text{гк}} - T_{\text{гн}}}{T_{\text{ж ср}} - T_{\text{гн}}}, \quad (3)$$

где T – температура, °C; нижние индексы: «г» – газовая фаза; «ж» – жидкая фаза; «мт» – мокрый термометр; «н, к» – начальные и конечные значения; «ср» – среднее значение.

Тепловую эффективность в газовой фазе также записывают через разность удельных энтальпий I , Дж/кг

$$E_{\text{г}} = \frac{I_{\text{к}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{ср}}^* - I_{\text{н}}}. \quad (4)$$

Массообменная эффективность переноса влаги при охлаждении жидкости

$$E_{\text{х}} = \frac{x_{\text{к}} - x_{\text{н}}}{x_{\text{ср}}^* - x_{\text{н}}}, \quad (5)$$

где x – влагосодержание, кг/кг; $x_{\text{ср}}^*$ – влагосодержание на линии насыщения ($\varphi = 100\%$) при $T_{\text{ж ср}}$; φ – относительная влажность.

Для определения значений I^* и x^* (при $\varphi = 100\%$) удобнее пользоваться таблицей для воды и воздуха.

Табл. 1

Термодинамические параметры влажного воздуха

$T, ^\circ\text{C}$	$x^*, \text{кг/кг}$	$I^*, \text{кДж/кг}$	$T, ^\circ\text{C}$	$x^*, \text{кг/кг}$	$I^*, \text{кДж/кг}$
20	0,0147	57,3	34	0,0345	121,5
21	0,01566	60,77	34	0,0345	122,46
22	0,01667	64,37	35	0,03659	128,89
23	0,01775	68,15	36	0,03874	135,48
24	0,01888	72,06	37	0,04111	142,65
25	0,0201	76,20	38	0,04357	150,05
26	0,02136	80,45	39	0,04616	157,80
27	0,0227	84,91	40	0,04890	165,94
28	0,02412	89,58	41	0,05178	174,46
29	0,02562	94,45	42	0,05484	186,86
30	0,02721	99,57	43	0,05806	192,86
31	0,02889	104,92	44	0,06146	202,76
32	0,03066	110,50	45	0,06506	213,18
33	0,03253	116,35	46	0,0689	222,1

Согласно принятой модели идеального вытеснения газа эффективность процессов можно выразить с применением теплового $N_{\text{ог}}$ и массообменного $N_{\text{ох}}$ чисел единиц переноса, тогда

$$E_T = 1 - \exp(-N_{ог}); E_x = 1 - \exp(-N_{ох}), \quad (6)$$

где $N_{ог} = K_T F / (V_T \rho_T c_{pT})$; $N_{ох} = K_x F / V_T$; K_T – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²К); K_x – коэффициент массопередачи, м/с; F – площадь поверхности контакта фаз, м²; V_T – объемный расход газа, м³/с; c_{pT} – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг К).

Для процессов испарительного охлаждения жидкости и конденсационного охлаждения газа основное сопротивление тепломассообмену сосредоточено в газовой фазе, тогда коэффициенты K_T и K_x практически равны коэффициентом теплоотдачи α_T и массоотдачи β_T в газовой фазе.

При экспериментальных исследованиях тепло- и массообмена на барботажных тарелках находится сразу произведение средних значений $(\alpha_T F)$ и $(\beta_T F)$, а при математическом моделировании могут вычисляться отдельно α_T , β_T и площадь поверхности F , так и произведение $(\alpha_T F)$, $(\beta_T F)$. С точки зрения определения эффективности процессов все эти подходы равнозначные.

Для тарелок небольшого диаметра при равномерном режиме барботажа коэффициенты тепло- и массоотдачи можно вычислить по критериальным выражениям [10]. Причем, в большинстве выражений число Шервуда $Sh_T = \beta_{Tf} \chi / D_T$ содержит коэффициент массоотдачи, отнесенный к рабочей площади тарелки, т.е. $\beta_{Tf} = (\beta_T F) / S_T$, где S_T – рабочая площадь тарелки, м². Наибольшее применение для ситчатых тарелок получило критериальное уравнение Г.П. Соломахи в виде [13]

$$Sh_T = 2,5 Re_T^{0,72} We^{-0,25} Sc_T^{0,5}, \quad (7)$$

где $Re_T = W_K \chi / \nu_T$ – число Рейнольдса; $We = \sigma / (\rho_{ж} g h_{ст}^2)$ – число Вебера; $Sc_T = \nu_T / D_T$ – число Шмидта; ν_T – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; D_T – коэффициент молекулярной диффузии влаги, м²/с; $\chi = \sqrt{\sigma / (\rho_{ж} g)}$ – капиллярная постоянная, м;

При известном из выражения (5) значение коэффициента массоотдачи, коэффициент теплоотдачи, отнесенный к площади тарелки запишем применяя аналогию Льюиса $\alpha_{Tf} = \rho_T c_{pT} \beta_{Tf} (Sc_T / Pr_T)^{0,5}$, где $Pr_T = \nu_T / a_T$ – число Прандтля; a_T – коэффициент температуропроводности, м²/с; c_{pT} – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг К).

Для крупномасштабных тарелок можно применять теоретическое выражение, полученное на основе гидродинамической аналогии и модели турбулентного пограничного слоя, которое позволяет вычислить $(\beta F)_T$ как для всей тарелки при равномерном режиме барботажа, так и по характерным зонам с учетом профиля скорости газа и высоты столба жидкости, т.е. при наличии неравномерностей. Это выражение имеет вид как для колпачковых [12], так клапанных и ситчатых тарелок [14]

$$(\beta F)_T = \frac{u_{*T} \left[S_0 (\rho_T W_0^2 / 2 + \rho_{ж} g h'_{ст}) - \rho_T S_K W_K^2 / 2 \right]}{\arctg \sqrt{R_{1T} Sc_T} \sqrt{R_{1T}} (u_{*T}^2 \rho_T + 2\sigma / R_3)}, \quad (8)$$

где u_{*T} – динамическая скорость на межфазной поверхности в газовой фазе, м/с; R_{1T} – безразмерная толщина вязкого подслоя в газовой фазе, м/с; W_0 – скорость газа в отверстиях тарелки (зоны), м/с; S_0 – площадь отверстий, занятых газовым потоком на тарелке (зоне), м²; S_K – площадь поперечного сечения колонны, м²; R_3 – эквивалентный диаметр отверстия в тарелке, м.

Выражения для расчета параметров u_{*T} и R_{1T} приведены в работах для колпачковых [12], клапанных, ситчатых и других тарелок [14] и зависят как от режимных, так и конструктивных характеристик тарелки.

На рис. 2 даны результаты расчета тепловой эффективности E_T (6), где $(\alpha_T F)$ вычислялся по критериальному выражению (7). Установлено удовлетворительное согласование модели идеального вытеснения газа с экспериментальными данными [13].

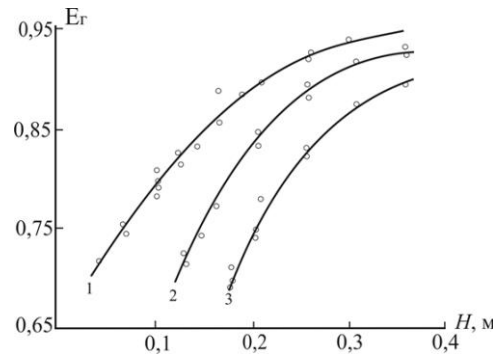


Рис. 2 Зависимость тепловой эффективности барботажной тарелки E_T от высоты газожидкостного слоя. o – экспериментальные данные [13]; сплошные линии расчет по (6); 1 – $W_K = 1,5$ м/с; 2 – $W_K = 2,5$ м/с; 3 – $W_K = 3,5$ м/с.

Fig. 2. The thermal efficiency of the bubble wrap depends on the height of the gas-liquid layer. o – experimental data [13]; continuous lines calculated for (6); 1 – m/s ; 2 – m/s ; 3 – m/s .

Поток теплоты на тарелке

$$Q = Lc_{рж}(T_{жн} - T_{жк}) - Q_u; \quad Q = G(I_k - I_n), \quad (9)$$

где $Q_u = c_{рж}T_{жк}G(x_k - x_n)$ – поток теплоты с испарившейся жидкостью, обычно составляет не более 3-5 %; L, G – массовые расходы жидкой и газовой фаз, кг/с.

При известных значениях входных термодинамических величин $T_{жн}, T_{мт}^*, I_n$, неизвестной величиной в зависимости (4) является $I_{ср}^*$, которая связана с средней температурой жидкой фазы на тарелке, т.е. $I_{ср}^* = (c_{рг} + c_{рп}x_{ср}^*)T_{жср} + rx_{ср}^*$, где $c_{рп}$ – удельная теплоемкость пара, Дж/(кг К), r – скрытая теплота испарения жидкости, Дж/кг (для воды $r = 250 \cdot 10^4$ Дж/кг).

Основной задачей в такой постановке является определение средней температуры жидкой фазы в барботажном слое, которая может находиться по принятой модели структуры потока или из численного решения дифференциального уравнения теплообмена в жидкой фазе с межфазным источником теплоты.

Результаты.

Численная модель.

Теоретической основой численного моделирования явлений переноса являются фундаментальные законы сохранения импульса, массы и энергии в локальной (дифференциальной) форме. Учитывая различные пространственно-временные масштабы физических явлений в промышленных аппаратах часто выполняется сокращение исходного математического описания до двух или одномерных моделей. Причем в двухфазных средах с хаотичной структурой (барботаж, нерегулярные насадки и т.д.) в математических моделях взаимодействия между фазами учитываются локальными или осредненными по всему объему среды межфазными источниками импульса, массы и теплоты. Такой подход является частным случаем модели многоскоростного континуума [15] и дает удовлетворительные результаты для процессов ректификации, абсорбции и в том числе с учетом химических превращений на барботажных тарелках различных конструкций, а именно на клапанных и ситчатых [11], колпачковых [12] и других типах контактных устройств [14]. С учетом того, что в турбулентном барботажном слое в ядре потока жидкости фазы по высоте наблюдается практически полное перемешивание дифференциальные уравнения движения, тепло-и массообмена записываются в двумерной форме в продольном и поперечном направлениях тарелки с уравнениями баланса.

Уравнение теплообмена в барботажном слое в ядре потока для жидкой фазы имеет вид

$$u_{ж}(r)\rho_{ж}c_{рж}\frac{\partial T_{ж}}{\partial \xi} = \lambda_{тж}\frac{\partial^2 T_{ж}}{\partial r^2} + \lambda_{тж}\frac{\partial^2 T_{ж}}{\partial \xi^2} + \frac{qdF}{dV}, \quad (10)$$

где $u_{\text{ж}}(r)$ – скорость жидкости, как функция поперечной координаты, м; r, ξ – поперечная и продольная координаты на плоскости тарелки, м; $\lambda_{\text{тж}}$ – коэффициент турбулентной теплопроводности в ядре жидкой фазы, Вт/(м²К), вычисляется по модели изотропной турбулентности [14]; q – плотность потока теплоты, Вт/м² через площадь межфазной поверхности dF (м²) в элементарном объеме dV двухфазного слоя, м³.

Уравнение теплообмена (10) решается совместно с уравнением баланса теплоты $dI = \rho_{\text{ж}} c_{\text{рж}} dT_{\text{ж}}$.

К уравнению (10) записываются граничные условия

– при $\xi = 0$; $u_{\text{ж}}(r) = u_{\text{жн}}(r)$; $T_{\text{ж}} = T_{\text{жн}}$; (на входе);

– при $\xi = l_{\text{ж}}$; $\partial T_{\text{ж}} / \partial \xi = 0$ (на выходе тарелки);

– при $r = R$; $u(r) = 0$; $\partial T_{\text{ж}} / \partial r = 0$ (на стенке колонны с теплоизоляцией), где R – радиус колонны (тарелки), м; l – длина пути жидкости от приемной планки к сливной, м; нижний индекс «н» – начальное значение.

Локальный поток теплоты

$$q = K_{\Gamma}(T_{\text{ж}} - T_{\Gamma}) + K_{\text{х}}(x^* - x)I. \quad (11)$$

Известно, что при охлаждении жидкости газом при непосредственном контакте фаз основное сопротивление тепло- и массопередачи сосредоточено в газовой фазе и тогда $K_{\Gamma} = \alpha_{\Gamma}$, $K_{\text{х}} = \beta_{\Gamma}$ – где α_{Γ} , β_{Γ} – коэффициенты тепло- и массоотдачи в газовой фазе. Кроме этого для упрощения расчетов применяется аналогия Льюиса и тогда локальный поток теплоты записывают используя разность энтальпий в газовой фазе $q = \beta_{\text{х}}(I^* - I)$, где $\beta_{\text{х}}$ – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м²с). Такой подход широко применяется в расчетах градирен и других аппаратов [14,16-18]. В данном выражении энтальпия I^* вычисляется при $T_{\text{ж}}$ и относительной влажности $\varphi = 100\%$ таблица 1.

В уравнении теплопереноса (10) профиль скорости $u_{\text{ж}}(r)$ зависит от условий входа жидкой фазы на тарелку, от конструкции тарелки и режима барботажа. Результаты численного решения системы уравнений движения жидкой фазы на тарелках представлены в работах клапанных и ситчатых [11], колпачковых [12] и многих других конструкций [14], и могут применяться при решении уравнения (10). Пример полученного профиля скорости дан на рис. 3.

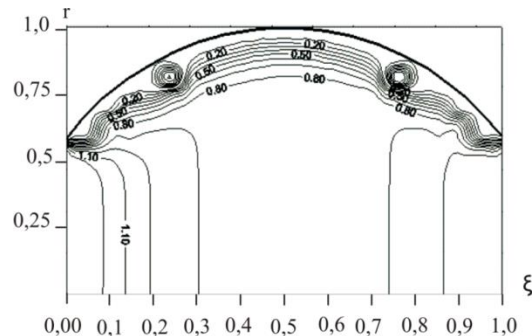


Рис. 3. Безразмерный профиль скорости жидкости u / u_n на клапанной тарелке (вид сверху)

Fig. 3. Dimensionless liquid speed profile on valve plate (top view)

Ячеечная модель

На барботажных тарелках небольшого диаметра (до 0,3-0,5 м) принято использовать модель полного смешения жидкой фазы при интенсивном режиме работы ($W_{\Gamma} > 0,4$ м/с). При увеличении диаметра тарелок структуру потоков чаще описывают диффузионной, ячейечной или комбинированными моделями структуры потока, где основным параметром является эмпирический коэффициент обратного (продольного) перемешивания [7]. Для наглядности расчетов примем ячейечную модель в продольном направлении, допуская в поперечном равномерное распределение фаз. Тогда барботажный слой условно делится на ряд последовательных ячеек полного перемешивания жидкой фазы в направлении от приемной планки к сливной, т.е. по пути движения жидкости.

Для i -ой ячейки запишем уравнение теплообмена между газовой и жидкой фазами

$$Lc_{рж}(T_{ж, i-1} - T_{ж, i}) - Q_{ui} = (\beta F)_{xi} \Delta I_{ср, i}, \quad (12)$$

где коэффициент $(\beta F)_{xi}$ отнесен к средней разности влагосодержаний газа в i -ой ячейке используя аналогию Льюиса; $\Delta I_{ср, i}$ – средняя разность энтальпий в i -ой ячейке, Дж/кг; $i = 1, 2, \dots, n$, n – число ячеек.

Из выражения (12) средняя температура $T_{ж, i}$ в i -ой ячейке

$$T_{ж, i} = T_{ж, i-1} - \frac{(\beta F)_{xi} \Delta I_{ср, i} - Q_i}{Lc_{рж}}. \quad (13)$$

Произведение $(\beta F)_{xi}$ имеет размерность кг/с, где $\beta \square \text{кг}/(\text{м}^2 \text{с})$, $F \square \text{м}^2$.

Первоначально в качестве наглядного примера для системы воздух-вода рассмотрим модель полного смешения жидкой фазы на всей тарелке ($n=1$). Тогда $T_{жк}=T_{жср}$.

В первом приближении находится температура жидкой фазы на выходе тарелки $T_{жк} = T_{жн} - E_{ж}(T_{жн} - T_{мг}^*)$, где тепловая эффективность по жидкой фазе принимается $E_{ж} \approx 0,5$, а затем уточняется в процессе решения задачи. Вычисляется поток теплоты (9) $Q = c_{рж} L(T_{жн} - T_{жк})$, энтальпия на линии насыщения из выражений (4), (9)

$I_{ср}^* = I_{н} + Q / (E_{г} G)$, где тепловая эффективность задается исходя из технического задания на проектирование аппарата, например $E_{г} = 0,8 \div 0,9$. Первоначально можно записать поток теплоты $Q_u \approx 0,03Q$. По значению $I_{ср}^*$ из таблицы 1 уточняется температура $T_{жк}$ и если между принятым и полученным значениями расхождение более 5-7 %, то выбирается новое приближение. Вычисляется по заданной эффективности $E_{г}$ требуемое число единиц переноса $N_{г} = \ln(1 / (1 - E_{г}))$ и далее коэффициент массоотдачи $\beta_{гf} = N_{г} W_{г} S_{к} / S_{г}$, м/с. Затем для выбранного типа тарелки по выражению (7) или (8) коэффициент $\beta_{гf} = (\beta F)_{г} / S_{г}$. Выбирается режим работы и конструктивные параметры, обеспечивающие требуемые значения $\beta_{гf}$ и, соответственно, $N_{г}$ и эффективность $E_{г}$.

Находится средняя движущая сила переноса (при $\Delta I_{\delta} - \Delta I_{м}$)

$$\Delta I_{ср} = \frac{\Delta I_{\delta} - \Delta I_{м}}{\ln \frac{\Delta I_{\delta}}{\Delta I_{м}}}, \quad (14)$$

где $\Delta I_{\delta} = \Delta I_{ср}^* - I_{н}$; $\Delta I_{м} = \Delta I_{ср}^* - I_{к}$ – большая и меньшая значения движущих сил на входе газа в барботажный слой и на выходе из него.

Вычисляется конечная температура (13) при $n=1$

$$T_{жк} = T_{жн} - \frac{(\beta F)_{x}}{Lc_{рж}} \Delta I_{ср}, \quad (15)$$

где коэффициент $(\beta F)_{x} = \beta_{гf} S_{г} \rho_{г} / S_{к}$, кг/(м²с).

Температура газа и влагосодержание находятся из выражений (3) и (4)

$$T_{гк} = T_{гн} + E_{г}(T_{жср} - T_{гн}), \quad (16)$$

$$x_{к} = x_{н} + E_{x}(x_{ср}^* - x_{н}). \quad (17)$$

Таким образом, для заданного типа тарелки определены все выходные параметры процесса охлаждения жидкой фазы газом и далее находится тепловая эффективность охлаждения жидкости $E_{ж}$ (3). Для определения энергозатрат на подачу газа вычисляется перепад давления $\Delta P_{г}$ газожидкостного слоя и мощность на подачу газа $N_0 = W_{г} S_{к} \Delta P_{г}$, Вт.

Пример расчета

В качестве примера расчета и сравнения результатов использованы исходные экспериментальные данные [14] по режимным и термодинамическим параметрам, полученным при охлаждении воды воздухом на макете градирни с сетчатой полиэтиленовой насадкой высотой $H=0,4$ м. Скорость воздуха в градирне $W_{к}=1,07$ м/с, плотность орошения $q = 7,61 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{час})$, т.е. $L = 2,11$ кг/с, массовый расход воздуха $G = 1,44$ кг/с при $S_{к}=1,15 \text{ м}^2$.

Начальная температура воды $T_{\text{жн}} = 38,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$; температура смоченного термометра $T_{\text{мт}}^* = 16,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$; температура воздуха $T_{\text{гн}} = 25,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность $\varphi_{\text{н}} = 35\%$; $x_{\text{н}} = 0,00727 \text{ кг/кг}$; $I_{\text{н}} = 44,4 \text{ кДж/кг}$; $\rho_{\text{г}} = 1,175 \text{ кг/м}^3$.

По исходным данным требуется определить температуру воды и воздуха на выходе барботажной тарелки и тепловые эффективности $E_{\text{г}}$, $E_{\text{ж}}$ и сравнить с исследованным процессом на макете градирни.

В первом приближении принимаем $T_{\text{жк}} \approx 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$; ($T_{\text{жк}} = T_{\text{жн}} - 0,5(T_{\text{жн}} - T_{\text{мт}}^*)$). Поток теплоты $Q = Lc_{\text{рж}}(T_{\text{жн}} - T_{\text{жк}}) = 91,72 \text{ кВт}$. Энтальпия воздуха

$$I_{\text{к}} = Q / G + I_{\text{н}} = 108 \text{ кДж/кг}; \text{ энтальпия } I_{\text{ср}}^* \text{ при } E_{\text{г}} = 0,9, I_{\text{ср}}^* = I_{\text{н}} + \frac{Q}{GE_{\text{г}}} = 115,2 \text{ кДж/кг}.$$

Согласно табл.1 необходимо увеличить $T_{\text{жк}}$.

Принимаем согласно таблице 1 $T_{\text{жк}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Поток теплоты $Q = 74,0 \text{ кВт}$; $I_{\text{к}} = 95,85 \text{ кДж/кг}$; $I_{\text{ср}}^* = 101,5 \text{ кДж/кг}$. По табл.1 температура близка к значению температуры $T_{\text{жк}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Число единиц переноса при $E_{\text{г}} = 0,9$ равно $N_{\text{г}} = 2,3$. Коэффициент массоотдачи $\beta_{\text{гф}} = 2,83 \text{ м/с}$ или $(\beta A)_x = 3,32 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ (при $S_{\text{г}} = 1,0 \text{ м}^2$). Большая и меньшая движущие силы $\Delta I_{\text{с}} = 57,1 \text{ кДж/кг}$ и $\Delta I_{\text{м}} = 5,65 \text{ кДж/кг}$. Среднее значение (14) $\Delta I_{\text{ср}} = 22,27 \text{ кДж/кг}$. По выражению (15) $T_{\text{жк}} = 30,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Получили практически полное согласование с принятым значением.

Для ситчатой тарелки при заданной скорости газа $W_{\text{к}} = 1,07 \text{ м/с}$ по выражению (7) или математической модели выбирается высота статического столба жидкости (2) в расчете $\beta_{\text{гф}}$, обеспечивающая $\beta_{\text{гф}} = 2,83 \text{ м/с}$. Получаем $Re_{\text{г}} = 173,4$ (при $\chi = 2,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}$); $Sc_{\text{г}} = 0,7$ и число Шервуда $Sh_{\text{г}} = 309,0$ при числе $We = 5,89 \cdot 10^{-3}$, откуда $h_{\text{сг}} = 0,035 \text{ м}$. Далее по экспериментальному выражению (2) для расчета $h_{\text{сг}}$ находится высота сливной планки на ситчатой тарелке, обеспечивающие данное значение $h_{\text{сг}}$.

При $T_{\text{жк}} = 30^{\circ}\text{C}$, тепловая эффективность по охлаждению воды $E_{\text{ж}} = 0,387$. На макете насадочной градирни при аналогичных входных параметрах получено [14] $E_{\text{г}} = 0,392$, что практически соответствует $E_{\text{г}}$ для ситчатой тарелки. Однако учитывая, что рабочая высота градирни (насадки) $H = 0,4 \text{ м}$, а высота барботажного слоя (пены) $H_{\text{г-ж}} = h_{\text{сг}} / (1 - \varphi_{\text{г}})$, где $\varphi_{\text{г}}$ – газосодержание ($\varphi_{\text{г}} = \sqrt{Fr} / (1 + \sqrt{Fr})$), составляет значение $H_{\text{г-ж}} = 0,1 \text{ м}$ ($Fr = W_{\text{г}}^2 / gh_{\text{сг}}$ – критерий Фруда), барботажная ситчатая тарелка имеет некоторое преимущество. Но перепад давления газа на тарелке $\Delta P_{\text{г}} \approx 345 \text{ Па}$, что больше в несколько раз, чем в градирне.

Температура воздуха на выходе из газожидкостного слоя (16) $T_{\text{гк}} = 29,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Влажосодержание на выходе (17) $x_{\text{к}} = 0,02527 \text{ кг/кг}$. Поток теплоты с испарившейся жидкостью $Q_{\text{и}} = 3,25 \text{ кВт}$. Тепловой поток без учета испарения $Q = 74,0 \text{ кВт}$. Значение $Q_{\text{и}}$ составляет около 4% и может быть учтено в повторном расчете, однако это слабо влияет на результаты.

При делении барботажного слоя в поперечном направлении на ячейки полного перемешивания решение модели идеального смешения ($n=1$) может применяться в качестве начального приближения.

Для каждой ячейки вычисляется по заданному температурному профилю $Q_i = Lc_{\text{рж}}(T_{\text{ж}i-1} - T_{\text{ж}i})$; $I_{\text{ср}i}^* = I_{\text{н}} + Q_i / (E_{\text{г}}G_{\text{г}})$, по таблице уточняется температура, расчет значений Q_i , $\Delta I_{\text{ср}i}^*$ повторяется до уточнения температуры жидкости в i -ой ячейке. Затем находится $I_{\text{к}i}$; $\Delta I_{\text{с}i}$; $\Delta I_{\text{м}i}$; $\Delta I_{\text{ср}i}$ и $T_{\text{ж}i}$ по формуле (13), где значение $(\beta F)_{\text{х}i}$

имеет вид $(\beta F)_{xi} = (\beta F)_x S_{Ti} / S_T$, где S_{Ti} – площадь i -ой ячейки; $(\beta F)_x$ – вычисляется, как показано выше для всей тарелки.

Число и размеры ячеек полного перемешивания жидкости зависит от конструкции, размера тарелки и режима барботажа и находится экспериментально. Например, для ситчатых тарелок диаметром около одного метра при устойчивом режиме работы различными исследователями установлено три ячейки полного перемешивания. Одна у приемной планки ($l_1 / l_{ж} \approx 0,25$), одна в центре тарелки ($l_2 / l_{ж} \approx 0,5$) и у сливной планки ($l_3 / l_{ж} \approx 0,25$). Для выше приведенного примера выполнены расчеты охлаждения воды воздухом и получены следующие значения температур по ячейкам $T_{ж1} = 35,3$ °C; $T_{ж2} = 31$ °C; $T_{ж3} = T_{жк} = 29,8$ °C (при $T_{жн} = 38,4$ °C). Как следует из полученных результатов ячеечная модель ($n=3$) не приводит к существенному отличию по конечной температуре по сравнению с полным перемешиванием ($n=1$) при условии равномерного профиля скорости газа на входе тарелки. Однако ячеечная модель дает информацию о профиле температур жидкой и газовой фаз по длине барботажного слоя, что имеет важное значение в расчетах тепломассообменных процессов с тепловыми эффектами и нежелательном термополимерообразованием.

Выводы и заключение

Математическое моделирование процессов в аппаратах с газожидкостными средами имеет важное значение при выборе вариантов модернизации аппаратов или разработке новых конструкций в различных отраслях промышленности и теплоэнергетике. Решение этих задач в основном имеет полуэмпирический характер и связано с многочисленными экспериментальными и численными исследованиями аппаратов газожидкостного контакта.

В данной статье показано последовательное решение задачи от численных к упрощенным моделям, где основной информационной являются гидравлические характеристики барботажных тарелок.

Показаны примеры расчета эффективности тепломассообмена при испарительным охлаждением воды воздухом на ситчатой тарелке. Дано сравнение с экспериментальными данными и разработан алгоритм применения ячеечной модели в расчетах температурных профилей в барботажном слое. Сделано сравнение с аналогичным процессом охлаждения воды в насадочной градирне. Таким образом, основной эмпирической информацией о процессе барботажа является высота статического столба жидкости, которая выбирается исходя из заданной эффективности тепломассообмена и затем уточняется по эмпирическим выражениям для выбранной конструкции тарелки. Представленная математическая модель и алгоритм расчета охлаждения жидкости газовым потоком позволяет снизить число уровней экспериментальных исследований при проектировании или модернизации барботажных колонн.

Таким образом, на основе применения моделей структуры потоков газовой и жидкой фаз представлен алгоритм решения задачи определения эффективности охлаждения жидкости и нагрева газа на барботажной тарелке при пенном режиме работы.

Литература

1. Bepalov V.V., Belyaev L.A., Kuchman L.S. Simulation of surface-type condensing units for heat recovery from the flue gas with air heating // MATEC Web of Conferences. 2017. № 91. C. 01003.
2. Voinov N.A., Deryagina N.V., Zemtsov D.A., Bogatkova A.V., Zhukova O.P. Intensification of heat removal in diabatic columns // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. C. 52080.
3. Boyadjiev C.H. R.B., Dzhonova D.B., Popova-Krumova P.G., Stefanova K.V., Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Slesareva E.Yu. Liquid wall flow in counter-current column apparatuses for absorption processes with random packings // Bulgarian Chemical Communications. 2020. T. 52. C. 74-79.
4. Ledukhovskiy G.V., Zhukov V.P., Barochkin Y.E., Barochkin E.V. Modeling the dissolved oxygen desorption when superheated water enters the rarefaction zone // Thermal engineering. 2021. T. 68. № 7. C. 570-576.
5. Ledukhovskiy G.V., Zhukov V.P., Barochkin Y.E. Simulation of thermal water deaeration based on a matrix approach to the design of heat-and-mass exchangers // Thermal Engineering. 2019. T. 66. № 4. C. 287-292.

6. Sharapov V.I., Mingaraeva E.V. Energy, mass-exchange and hydrodynamic efficiency of degassers at low-temperature deaeration of water for thermal power plants // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. С. 012026.
7. Комиссаров, Ю.А., Гордеев Л. С., Вент Д. П., Процессы и аппарата химической технологии: М.: Химия, 2011. 1230 с.
8. Разинов А.И., Клинов А.В., Дьяконов Г.С. Казань: Процессы и аппараты химической технологии. Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017, 860 с.
9. Молоканова Л.С., Шибитова Н.В., Колоскова В.В. Современные конструкции массообменных тарелок // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. №9. Стр. 9-13.
10. Скобло А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Щелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: 3е изд. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 677с.
11. Laptev A.G., Lapteva E.A. Determination of heat and mass transfer efficiency on a bubbling plate with account for scale transition // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. Т. 88. № 4. С. 806-814.
12. Laptev A.G., Karpeev S.V., Lapteva E.A. Modeling and modernization of tray towers for reactive distillation processes // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2018. Т. 52. № 1.
13. Тарат Э. Я. Пенный режим и пенные аппараты: монография. Л.: Химия, 1977. 303 с.
14. Лаптев А. Г., Башаров М. М., Лаптева Е. А. Математические модели и методы расчетов теплообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах: Казань: КГЭУ; Старый Оскол: ТНТ, 2021. 288 с.
15. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М: Наука, 1987. 464 с.
16. Дмитриев А.В., Круглов Л.В., Хафизова А.И., Дмитриева О.С., Шешуков Е.Г. Методика расчета гидравлического сопротивления струйно-пленочных контактных устройств в теплоэнергетическом оборудовании // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. Т. 10. № 2 (38). С. 53-59.
17. Шарипов И.И., Круглов Л.В., Круглов В.И., Дмитриева О.С. Разработка конструкции струйно-пленочного контактного устройства с целью интенсификации теплообмена // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 146-153.
18. Шарипов В.И., Кудрявцева Е.В., Пазушкина О.В. Массообмен и гидродинамика деаэраторов ТЭС при использовании в качестве десорбирующей среды природного газа. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017;19(1-2):86-94. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-1-2-86-94>.

Авторы публикации

Лаптев Анатолий Григорьевич – профессор, д.т.н., профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: tv_t_kgeu@mail.ru

Лаптева Елена Анатольевна – доцент, к.т.н., доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: grivka100@mail.ru.

Аласгарли Сеймур Ульви Оглы – аспирант кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: tv_t_kgeu@mail.ru.

References

1. Bepalov VV, Belyaev LA, Kuchman L.S. Simulation of surface-type condensing units for heat recovery from the flue gas with air heating. MATEC Web of Conferences. 2017;91:01003.
2. Voinov NA, Deryagina NV, Zemtsov DA, Bogatkova AV, Zhukova OP. Intensification of heat removal in diabatic columns. In the collection: *Journal of Physics: Conference Series*. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. P. 52080.

3. Boyadjiev CH, Dzhonova DB, Popova-Krumova PG, et al. Liquid wall flow in counter-current column apparatuses for absorption processes with random packings. *Bulgarian Chemical Communications*. 2020;52:74-79.
4. Ledukhovskiy GV, Zhukov VP, Barochkin YE, et al. Modeling the dissolved oxygen desorption when superheated water enters the rarefaction zone. *Thermal engineering*. 2021;68(7):570-576.
5. Ledukhovskiy GV, Zhukov VP, Barochkin YE. Simulation of thermal water deaeration based on a matrix approach to the design of heat-and-mass exchangers. *Thermal Engineering*. 2019;66(4):287-292.
6. Sharapov VI, Mingaraeva EV. *Energy, mass-exchange and hydrodynamic efficiency of degassers at low-temperature deaeration of water for thermal power plants*. In the collection: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. P. 012026.
7. Komissarov YuA, Gordeev LS, Vent DP. *Processes and apparatus of chemical technology: textbook for universities*. Moscow: Chemistry, 2011. 1230 p.
8. Razinov AI, Klinov AV, Dyakonov G.S. Kazan: Kazan National Research Technological University, *Processes and Apparatuses of Chemical Technology*. 2017, 860 p.
9. Molokanova LS, Shubitova NV, Koloskova VV. Modern designs of mass transfer trays. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;9:9-13.
10. Skoblo AI, Molokanov YuK, Vladimirov AI, et al. *Processes and apparatus of oil and gas processing and petrochemistry*. 3rd ed. M.: Nedra-Businesscenter LLC, 2000. 677p.
11. Laptev A.G., Lapteva E.A. Determination of heat and mass transfer efficiency on a bubbling plate with account for scale transition. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015;88(4):806-814.
12. Laptev AG, Karpeev SV, Lapteva EA. Modeling and modernization of tray towers for reactive distillation processes. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2018;52(1).
13. Tarat EYa. *Foam mode and foam apparatus: monograph*. L.: Chemistry, 1977. 303 p.
14. Laptev AG, Basharov MM, Lapteva EA. *Mathematical models and methods for calculating heat and mass transfer and separation processes in two-phase media*: Kazan: KSPU; Stary Oskol: TNT, 2021. 288 p.
15. Nigmatulin RI. *Dynamics of multiphase media*. M: Nauka, 1987. 464 p.
16. Dmitriev AV, Kruglov LV, Khafizova AI, et al. Method for calculating the hydraulic resistance of jet-film contact devices in thermal power equipment. *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2018;10(2 (38)):53-59.
17. Sharipov II, Kruglov LV, Kruglov VI, et al. Development of the design of a jet-film contact device for the purpose of heat and mass transfer intensification. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Energy problems*. 2018;20(9-10):146-153.
18. Sharapov VI, Kudryavtseva EV, Pazushkina OV. Mass transfer and hydrodynamics of TPP deaerators when using natural gas as a desorbing medium. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2017;19(1-2):86-94. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-1-2-86-94>.

Authors of the publication

Anatoly G. Laptev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Engineering Ecology and Labor Safety», Kazan State Power Engineering University. E-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Elena A. Lapteva – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of «Energy-Saving technologies and energy supply of enterprises», Kazan State Power Engineering University, E-mail: grivka100@mail.ru.

Seymour Ulvi Ogly Alasgarli – Postgraduate student of the Department of Engineering Ecology and Labor Safety, Kazan State Power Engineering University. E-mail: tvt_kgeu@mail.ru.

Получено 16.11.2022г.

Отредактировано 23.11.2022г.

Принято 24.11.2022г.

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ
ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ КИСЛЫХ ОТХОДОВ С ИОНИТНОЙ ЧАСТИ
КОМБИНИРОВАННОЙ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА
СТЕРЛИТАМАКСКОЙ ТЭЦ**

Власова А.Ю.

**Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия**

ORCID: 0000-0001-8520-5432, vlasovaay@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка технологических решений для снижения количества сточных вод и повторное их использование в цикле модернизированной установки водоподготовки на Стерлитамакской ТЭЦ. *МЕТОДЫ.* Для решения поставленной цели использовались приемы системного анализа химико-технологической системы, определены источники и трансформация загрязняющих веществ. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* На сегодняшний день в России имеется опыт утилизации сточных вод водоподготовительных установок энергетических предприятий. В основном этот метод основывается на нейтрализации с применением различных дополнительных химических реагентов. В результате проведенного анализа были представлены варианты технологических схем модернизированной установки водоподготовки, где концентрат после установки обратного осмоса проходит дополнительную очистку с применением H- и Na- катионитных фильтров при совместном либо локальном использовании. Вариант технологической схемы напрямую будет зависеть от качественного и количественного состава сточных вод. Для утилизации кислого отработанного регенерационного раствора предусмотрен гипсовый реактор, где в качестве продукта получают гипс. Данные технологические схемы позволяют очищать сточные воды установки и повторно их использовать. Данные схемы относятся к малосточным и являются перспективными направлением развития станций. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Разработанные технологические решения не требуют закупки дорогостоящих химических реагентов и оборудования, а требуют лишь переобвязки оборудования и наличия контактной емкости. Данные технологии являются ресурсосберегающими, в результате снижается потребление сырой воды за счет повторного использования отходов, т.е. цикл малосточный. В последние десятилетия многие производства переходят на политику малосточности. Т.к. сточные воды несут в себе большое количество ценных веществ, которые могут быть переработаны повторно и использованы.

Ключевые слова: ресурсосберегающие технологии; водоподготовительная установка; кислые отработанные регенерационные растворы.

Работа выполнена при финансовой государственной поддержке молодых российских ученых — кандидатов и докторов наук при Президенте РФ (Конкурс - МК-2021). Заявка № МК-1312.2021.4. Соглашение №075-15-2021-289 от 15.04.2021

Для цитирования: Власова А.Ю. Ресурсосберегающие технологии утилизации высокоминерализованных кислых отходов с ионитной части комбинированной водоподготовительной установки на Стерлитамакской ТЭЦ . 2022. Т.24. № 6. С. 25-36. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-25-36.

**RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR UTILIZATION OF HIGHLY
MINERALIZED ACIDIC WASTE FROM THE IONITE PART OF THE COMBINED
WATER TREATMENT PLANT AT THE STERLITAMAK THERMAL POWER PLANT**

AY. Vlasova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: 0000-0001-8520-5432, vlasovaay@mail.ru

Abstract: Purpose. Development of technological solutions to reduce the amount of wastewater and reuse them in the cycle of the modernized water treatment plant at the Sterlitamak thermal power plant. METHODS. To achieve this goal, the methods of system analysis of the chemical-technological system were used, the sources and transformation of pollutants were determined. RESULTS. To date, Russia has experience in the disposal of wastewater from water treatment plants of energy enterprises. Basically, this method is based on neutralization with the use of various additional chemical reagents. As a result of the analysis, variants of technological schemes of a modernized water treatment plant were presented, where the concentrate after the reverse osmosis installation undergoes additional purification with the use of H- and Na-cationite filters with joint or local use. The variant of the technological scheme will directly depend on the qualitative and quantitative composition of wastewater. A gypsum reactor is provided for the disposal of acidic waste regeneration solution, where gypsum is obtained as a product. These technological schemes make it possible to purify the wastewater of the installation and reuse it. These schemes are low-cost and are promising directions for the development of stations. conclusion. The developed technological solutions do not require the purchase of expensive chemicals and equipment, but only require the re-binding of equipment and the presence of a contact tank. These technologies are resource-saving, as a result, the consumption of raw water is reduced due to the reuse of waste, i.e. the cycle is low-flow. In recent decades, many industries have switched to a low-waste policy, since wastewater carries a large amount of valuable substances that can be recycled and reused.

Keywords: resource-saving technologies; water treatment plant; acidic waste regeneration solutions.

For citation: Vlasova AY. Resource-saving technologies for utilization of highly mineralized acidic waste from the ionite part of the combined water treatment plant at the Sterlitamak thermal power plant. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):25-36. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-25-36.

Введение и литературный обзор

Выработка тепловой и электрической энергии связана с потреблением огромного количества природной воды и сбросом сточных вод различного вида загрязненности. Вид загрязнений и объем сточных вод напрямую зависит от способа организации водоподготовительных установок. В условиях ограниченности водных ресурсов и ухудшения состояния водных объектов при постоянном повышении требований контролирующих органов к качеству сбросных вод оценка масштабов воздействия ТЭС на водные объекты становится одним из основных критериев при выборе места их строительства и прогнозе развития энергетики в целом. Все чаще возникают проблемы при согласовании сброса не только загрязненных, но и нормативно-чистых стоков [1].

Ориентируясь на опыт зарубежных стран, в которых повторно используется 76% промышленных стоков, в Российской Федерации используются лишь стоки высокой чистоты - например, продувочная вода котлов или стоки после промывки обессоливающих установок. Поэтому все большее признание получают станции с минимальным потреблением свежей воды и сбросом сточных вод. Экономическая эффективность внедрения мероприятий по снижению негативного воздействия на окружающую среду за счет внедрения современных технологий и создания «безотходных» систем природопользования определяется ставками платы за негативное воздействие [2].

Большинство действующих ВПУ на территории Российской Федерации включают такие методы, как осветление, фильтрование, ионный обмен и пр., обеспечивающие высокое качество воды и простоту в эксплуатации оборудования. Однако они обладают рядом недостатков, связанных со значительными затратами реагентов, наличием высокоминерализованных стоков, проблемами их нейтрализации и утилизации.

Во второй половине XX века начали активно развиваться мембранные технологии. В 80–90-е годы уровень развития этих технологий стал достаточным для широкого промышленного применения. Эти технологии по своей сути являются ресурсосберегающими, так как в их основе лежит физический процесс разделения на мембране без объемного использования химических реагентов. Таким образом, основным достоинством является снижение экономических затрат на закупку химических реагентов и как следствие сокращение агрессивных сточных вод и

возможность повторного их использования в цикле станции. Поэтому данный вид технологий относится к ресурсосберегающим и все чаще применяется на станциях.

Переход на мембранные технологии сопровождается существенными экономическими и эксплуатационными затратами на реконструкцию оборудования водоподготовительных установок. Поэтому при реконструкции, внедрение мембранных аппаратов происходит поэтапно, с узловой заменой оборудования, что позволяет комфортно перейти на физические процессы очистки без долгого простоя оборудования. Поэтому большая часть установок, находящихся на стадии модернизации представляет собой комбинированный тип установок. Комбинирование может быть осуществлено различными способами с учетом показателей качества исходной воды и требуемой степени очистки с учетом теплосилового оборудования. Чаще всего предварительная очистка воды комбинируется с обратным осмосом и на конце устанавливается одна ступень Н-катионитных и ОН-анионитных фильтров. В то время как «традиционные» технологии ориентированы на использование только ионитных фильтров 2-ступеней. Н-катионитные фильтры используются как в «традиционных» так и в комбинированных ВПУ. Применение Н-катионитных фильтров предполагает наличие большого количества кислых сульфатных высокоминерализованных отработанных регенерационных растворов, которые составляют большую часть сточных вод предприятия. Для сокращения сбросов кислых сточных вод необходимо провести качественно-количественный анализ с последующим прогнозированием повторно-последовательного использования воды в нескольких технологических циклах.

Экспериментально установлено, что при регенерации Н-катионитных фильтров максимальное солесодержание сбрасываемой воды достигает при пропуске регенерационного раствора 50 г/кг. Среднее солесодержание отмывочных вод составляет 2,0–8,0 г/кг всего количества использованной на регенерацию воды 0,5–5,5 г/кг при средней кислотности 0,3–0,4%.

При регенерации анионитных фильтров I ступени максимальное солесодержание достигает 20–60 г/кг, среднее солесодержание 1,4–1,6 г/кг, средняя щелочность 0,5–0,7%; для анионитных фильтров последующих ступеней эти величины соответственно составляют 15–30 г/кг, 1,2–1,4 г/кг и 0,8–1,0%.

Среди всех сточных вод на ТЭС, наибольшая проблема создается при превышении норм ПДК по концентрации сульфатов и других веществ в СВ. Превышение концентрации сульфатов в воде обосновано технологическими процессами на ТЭС, а именно регенерацией серной кислотой ИО установок. В процессе образуются кислые отработанные регенерационные растворы с высоким содержанием сульфатов. В этих растворах концентрация сульфатов превышает ПДК в 10–15 раз. За превышение ПДК экологические службы выставляют штрафные санкции энергетическим предприятиям. [3–5]

На сегодняшний день в России имеется опыт утилизации сточных вод водоподготовительных установок энергетических предприятий. Но в виду больших объемов сточных вод, технологии и методы являются отчасти дорогостоящими и труднореализуемыми, поэтому станции часто готовы выплачивать штрафы за сброс сточных вод с ненормированными показателями, а не утилизировать их. Данный способ не является гуманным по отношению к окружающей среде и водоемам. Поэтому на сегодняшний день создание систем повторного использования воды для снижения водопотребления и водоотведения является одной из важных экологических задач. Но даже данная задача имеет свои особенности, которые ориентированы на выделение из отходов максимально полезных компонентов из объема очищающей среды. [6–11]

Автором Зайнуллиным Л.А. была предложена установка нейтрализации кислых стоков, где перекачивающее устройство выполнено в виде эрлифта, а рабочая емкость выполнена в нижней конической части. Данная установка выполнена в виде резервуара, где протекает реакция нейтрализации. Большая часть аналогичных разработок подкрепляется дополнительным вводом химических реагентов. Чаще всего используют смесь извести с гидроокисью алюминия аморфной структуры, которая извлекается из кислого раствора алюминиевой соли. При этом спектр химических реагентов может меняться, так например используют известковое молоко 5–10% с алюмосодержащими солями. Но у химических методов очистки есть минус в том, что при обработке реагентами возникает риск вторичного загрязнения и как следствие негативное влияние на животных и здоровье человека. [12–14,16]

В патенте №2691052 С1 ученые ФГБОУ ВО «КГЭУ» использовали способ очистки сточных вод от сульфатов, который включает обработку щелочным

кальцийсодержащим реагентом, при этом одновременно дозируют нейтральную водорастворимую соль кальция. В качестве кальцийсодержащего реагента используют шлам предочистки, который на 80-90% состоит из карбоната кальция. Данный метод может быть эффективным при правильном расчете стехиометрического соотношения реагентов, участвующих в реакции нейтрализации. [8, 21-22]

Авторами Куценко С.А. и Хрулевой Ж.В. был предложен комбинированный метод обработки сточных вод известковым молоком до pH 7,5-8,0 и после отделения выпавшего осадка в осветленную воду вводят карбонат бария и выдерживают полученную суспензию при перемешивании до превращения его в сульфат бария. После завершения обменной реакции осадок сульфата бария отделяют от воды. Изобретение позволяет очищать кислые сточные воды от сульфатов тяжелых металлов ниже значений ПДК.[17]

В патенте №2149221 С1 авторы предложили способ очистки сточных вод путем смешивания отработанных кислых вод с промывными водами и дальнейший пропуск через электролизер. Далее вода направляется в окислительный реактор для окисления ионов железа до трехвалентного состояния. Гидроксид трехвалентного железа отделяют на фильтре. На заключительном этапе раствор пропускают через анодные пространства всех электролизеров каскада. Особенность данной разработки заключается в сокращении затрат на расход кислоты и создание малосточного технологического процесса. [18]

Ученые Гришин В.П, Макаров О.В. и Некряченко С.Г. предложили способ очистки сточных вод с применением глиноземистого цемента. Данный способ носит широкий спектр применения и подходит для очистки сточных вод различных видов промышленности. Особенность данного метода основывается на том, что цементный реагент вводят в уже подготовленную сточную воду, а именно нейтрализуют известковым молоком и поддерживают pH 10,5-12 ед. Далее цемент вводят в виде 5÷12,5%-ной водной суспензии и добавляют флокулянт на основе высокополимеризованного полиакриламида. Был использован флокулянт Floпам AN 934, но в виду санкционных ограничений можно применять любые известные флокулянты на основе высокополимеризованного полиакриламида.[19]

Большая часть зарубежных исследований в данной области ориентируются на биологическую очистку стоков. Так ученые Peter Dale Rose, John Richard Duncan, Robert Paul Van Hille предложили способ очистки сточных вод от сульфатов путем перевода их в сульфиты за счет бактерий. Биологическое восстановление сульфатов в пруду осуществляется за счет введения метаболизируемого источника углерода и происходит его метаболизация организмами, участвующие в биологическом восстановлении сульфата. В качестве пруда может быть использован анаэробный котлован с восходящим потоком. Таким образом пруд может содержать насыщенный кислородов поверхностный слой воды. Стоит отметить, что данный метод несмотря на свою полную безопасность и экологичность имеет такие недостатки, как создание пруда для проведения биохимической реакции и длительность прохождения реакции, от 20 до 60 дней. [20]

На сегодняшний день существует новое поколение биологической очистки – мембранные биореакторы, представляет собой совмещение стандартного биореактора с ультрафильтрационной установкой. Схемы традиционной биологической очистки и очистки с применением биореактора приведены на рисунке 1.

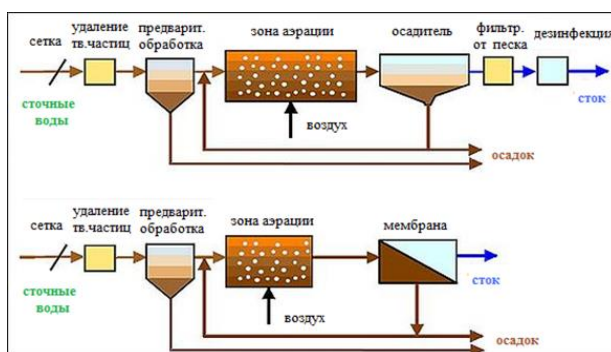


Рис. 1. Схема биологической очистки с применением активного ила (сверху) и очистки

Fig. 1. Biological cleaning scheme with active sludge (above) and cleaning with membrane

с применением мембранного биореактора
(снизу).

bioreactor (bottom).

Необходимо учитывать, что зарубежные исследования в данной области несмотря на глубокую очистку сточных вод мало применимы на территории РФ, так как количество сточных вод в РФ в 10-30 раз больше, чем за рубежом. Поэтому при разработке технологических решений по утилизации сточных вод необходимо учитывать их объемность. Поэтому наиболее часто реализуемый метод основывается на взаимной нейтрализации дополнительными химическими реактивами до достижения водородного показателя нейтральных значений, с дальнейшим сбросом сточных вод на очистные сооружения. Данный способ очень дорогостоящий, требует постоянной закупки химических реактивов[15].

В последние десятилетия многие производства переходят на политику малосточности. Так как сточные воды несут в себе большое количество ценных веществ, которые могут быть переработаны повторно и использованы. Поэтому данная тематика является весьма актуальной как для производственных комплексов, так и для сохранения окружающей среды.

Разработка технологических решений по утилизации сточных вод тепловых станций была рассмотрена на примере Стерлитамакской ТЭЦ в Республике Башкортостан.

Материалы и методы

Технологическая схема ВПУ Стерлитамакской ТЭЦ

На сегодняшний день установка водоподготовки Стерлитамакской ТЭЦ организована с применением «традиционной» технологии (рисунок 2). Предварительная очистка воды осуществляется с применением осветлителя 1, в емкость подаются химические реагенты, такие как известь и коагулянт. В качестве стоков после осветлителя образуются шламовые воды, которые по компонентному составу представляют собой суспензию из карбоната кальция, остатков коагулянта и взвешенных веществ, содержащихся в исходной воде. После осветлителя осветленная вода подается на механический фильтр 2. Обессоливание происходит с применением Н и ОН ионитных фильтров I и II ступени, на выходе получаем химически обессоленную воду. Данные фильтры требуют регенерации растворами химических реагентов, серной кислотой и гидроксидом натрия соответственно. В результате регенерации образуются большие объемы сточных вод, которые превышают ПДК по нормируемым значениям. На сегодняшний день кислые отработанные регенерационные растворы не представляют никакой ценности для станции и поэтому сбрасываются на очистные сооружения. Щелочные отработанные регенерационные растворы могут быть использованы повторно после в цикле станции после установки электродиализации, которая применяется для концентрирования.

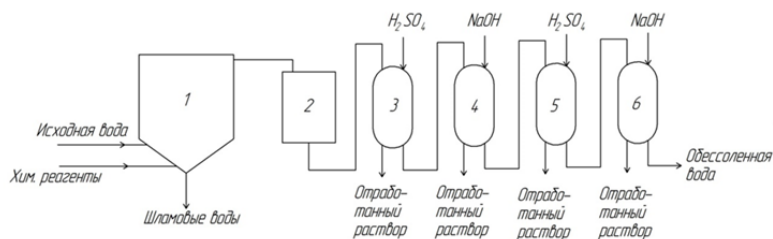


Рис. 2 Технологическая схема ВПУ Стерлитамакской ТЭЦ 1-осветлитель; 2-механический фильтр; 3- Н-катионитный фильтр I ступени; 4- ОН-анионитный фильтр I ступени; 5- Н-катионитный фильтр II ступени; 6- ОН-анионитный фильтр II ступени

Fig. 2. Sterlitamak CHP Technological Diagram 1-clarifier; 2-mechanical filter; 3-N-cationic filter I stage; 4-H-anion filter I stage; 5-N-cationic filter II stage; 6-H-anion filter II stage

Данная установка имеет ряд недостатков, которые серьезно сказываются на экономической составляющей станции. Установка является морально и физически устаревшей, расходует большое количество химических реагентов и имеет сточные воды с ненормированными значениями ПДК. Поэтому было принято решение о реконструкции. Реконструкция установки предполагает замену части ионообменных фильтров на баромембранную технологию, а именно установку обратного осмоса.

Предварительная очистка также организована с применением осветлителя и механических фильтров. После предварительной очистки осветленная вода направляется на установку обратного осмоса, где образуется пермеат (очищенная вода), который направляется на дополнительную очистку с применением ионитных фильтров Н и ОН и концентрат, который сбрасывается на очистку (рисунок 3). Основное преимущество данного метода это снижение негативного фактора на окружающую среду, а также сокращение на 90 % количества потребляемых реагентов (серной кислоты и гидроксида натрия) и одновременное сокращение сточных вод, содержащих эти реагенты. Основным недостатком установки обратного осмоса является большой сброс сточных вод на всех этапах обработки воды. Стоит отметить, что сточные воды маловредные. Поэтому на сегодняшний день существуют ресурсосберегающие технологии, которые позволяют сократить объемы водопотребления благодаря повторному использованию части сбрасываемых сточных вод в основном цикле ВПУ, а также выделение из сточных вод части растворенных в них солей в виде товарных продуктов.

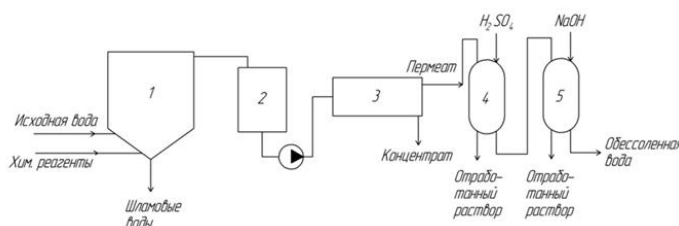


Рис. 3 Технологическая схема ВПУ
Стерлитамакской ТЭЦ после реконструкции

Fig. 3 Processing diagram of the
Sterlitamak CHP after reconstruction

Подобная реконструкция ВПУ частично решит проблему агрессивности сточных вод. Несмотря на реконструкцию, кислые высокоминерализованные сточные воды будут, так как остается одна ступень ионитных фильтров на «хвосте» установки. Поэтому были разработаны технологические решения, которые позволят сократить сточные воды и вернуть часть сточной воды в цикл станции.

Результаты

Технологии утилизации сточных вод ВПУ для Стерлитамакской ТЭЦ

На станции была произведена замена одной ступени ионитных фильтров на блок обратного осмоса. Так как станция нуждается в сокращении объемов сточных вод, то были разработаны технологические решения для уменьшения объема сбрасываемого в окружающую среду концентрата обратноосмотической установки. В ходе анализа рекомендовано умягчение концентрата на Н-катионитном фильтре, загруженном катионитом слабой кислотности с карбоксильными функциональными группами COOH . Режим работы Н-катионитного фильтра выбирают таким, чтобы в процессе рабочей части фильтроцикла из концентрата извлекался кальций, в результате чего с образованием угольной кислоты будет снижаться гидрокарбонатная щелочность, а также уменьшаться минерализация концентрата и содержание малорастворимых солей. Технологическая схема установки ВПУ с включением Н-катионитного фильтра для повторного использования стоков представлена на рисунке 4.

Регенерация Н-катионитного фильтра проводят серной кислотой. Серная кислота, как двухосновная образует два ряда солей: кислые сульфаты (гидросульфаты) или биосульфаты, M^1HSO_4 и нормальные (нейтральные) сульфаты M^1_2SO_4 . В процессе регенерации фильтров серной кислотой, кислота реагирует с солями жесткости, образуя соответственно сульфаты Mg и Ca . Утилизация сточных вод после Н-катионитных фильтров базируется на их обработке кальцийсодержащим реагентом, в роли которого выступает шлам предочистки. Отработанный регенерационный раствор насыщен CaSO_4 и $\text{Ca}(\text{OH})_2$; Ca^{2+} находятся в равновесии как с SO_4^{2-} , так и с OH^- . Отсюда следует, что при данных условиях между концентрациями OH^- и SO_4 имеется жесткая зависимость. В результате образуются труднорастворимые соединения с катионами кальция и магния, которые выпадают в осадок. Именно на данном принципе основана утилизация стоков на Стерлитамакской ТЭЦ.

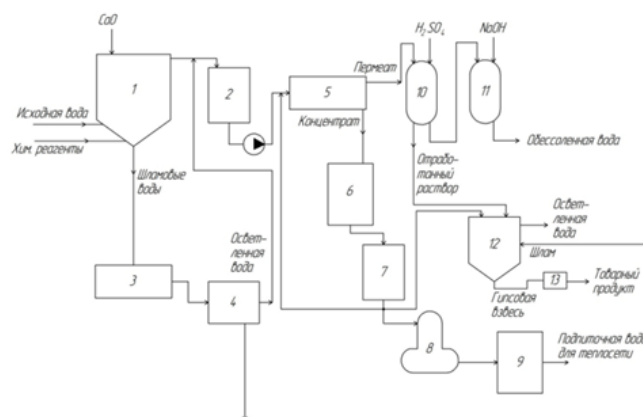


Рис. 4 Технологическая схема ВПУ с применением Н-катионитного фильтра в качестве очистки стоков

1-осветлитель; 2- механический фильтр; 3- бак шламовых вод; 4- фильтр пресс; 5- установка обратного осмоса, 6- бак концентрата; 7- Н-катионитный фильтр; 8- деаэратор; 9- бак; 10- Н-катионитный фильтр; 11- ОН-анионитный фильтр; 12- гипсовый реактор; 13 – сушильная камера.

Fig.4. Industrial design of the H-cationic filter as waste water treatment

1-clarifier; 2-mechanical filter; 3-tank of sludge water; 4-filter press; 5-reverse osmosis plant, 6-tank concentrate; 7-N-cationite filter; 8-deaerator; 9-tank; 10-N-cationic filter; 11-OH-anion filter; 12-plaster; 13-reactor chamber.

Исходная вода поступает в осветлитель 1, в который дозируется коагулянт и известковый реагент при необходимости вводится флокулянт для интенсификации процесса коагуляции и сокращения времени осветления воды. Осветленная вода поступает на механический фильтр 2, а шламовая вода после осветлителя скапливается в баке шламовых вод 3 и далее поступает на фильтр-пресс. 4 Обезвоженный шлам поступает в реактор извести 12, а отделившаяся вода направляется на механическую фильтрацию 2. Фильтрат после механического фильтра направляется на установку обратного осмоса 5. Концентрат после обратного осмоса 5 скапливается в баке концентрата 6 и далее направляется на Н-катионитный фильтр 7 либо с «голодной» регенерацией, либо загруженным катионитом слабой кислотности с карбоксильными функциональными группами -COOH. Особенность «голодной» регенерации заключается в том, что происходит не глубокое умягчение воды, а разрушение карбонатной щелочности без образования кислого фильтрата. Вода после Н-катионитного фильтра может быть разделена на три потока: один поток направляется на повторное прохождение установки обратного осмоса 5, второй поток направляется в гипсовый реактор 12 и третий поток в зависимости от степени кислотности и содержания коррозионно-агрессивных газов проходит деаэратор 8 и вода скапливается в баке 9 и затем может быть использована для тепловых сетей. Пермеат после установки обратного осмоса 5 проходит Н-катионитовый фильтр 10 и ОН-анионитовый фильтр 11 с получением обессоленной воды. В свою очередь фильтры в зависимости от назначения регенерируются серной кислотой и гидроксидом натрия. Кислые промывные отработанные регенерационные растворы направляются в гипсовый реактор 12, а щелочные отработанные регенерационные растворы могут быть использованы повторно в цикле станции после предварительной концентрации. В гипсовом реакторе 12 происходит процесс нейтрализации кислые стоки смешиваются с щелочным карбонатным шламом и образуется сульфат кальция (гипс), который выводится из реактора в виде гипсовой воды и отправляется на сушку 13 и далее может быть использован в качестве товарного продукта. На образование твердых отложений влияет произведение растворимости. Труднорастворимые сульфаты щелочноземельных металлов образуют твердые отложения белого цвета. Отложения образованы различными структурами, образующие сложные комплексы со связанной водой. Сульфат кальция существует в виде дигидрата $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, – гипса (селенит), и в безводном состоянии в виде ангидрита (карстенит, мурицит). Сульфат магния легко образует двойные соли с сульфатами щелочных металлов. Осветленная вода после гипсового реактора 12 может быть использована повторно на станции.

Одним из методов утилизации стоков является совместное использование Н и Na –катионитовых фильтров, технологическая схема приведена на рисунке 5.

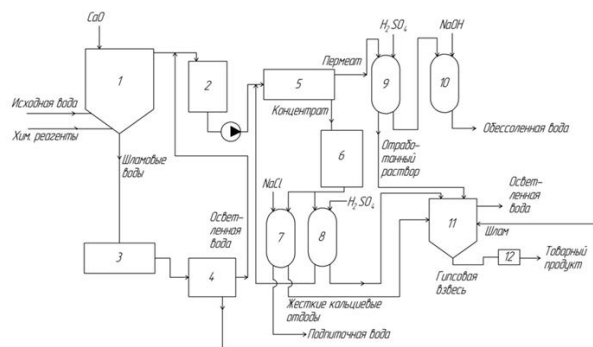


Рис. 5 Технологическая схема ВПУ с применением Н - и Na -катионитного фильтра в качестве очистки стоков

1 - осветлитель; 2 - механический фильтр; 3 - бак шламовых вод; 4 - фильтр пресс; 5 - установка обратного осмоса, 6 - бак концентрата; 7 - Na-катионитный фильтр; 8 - Н катионитный фильтр; 9 - Н-катионитный фильтр ; 10- ОН-анионитный фильтр; 11- гипсовый реактор; 12 – сушильная камера.

Fig.4. Industrial design of the H-cationic filter as waste water treatment

1-clarifier; 2-mechanical filter; 3-tank of sludge water; 4-filter press; 5-reverse osmosis plant, 6-tank concentrate; 7-N-cationite filter; 8-deaerator; 9-tank; 10-N-cationic filter; 11-HE-ionic filter; 12-plaster; 13-reactor chamber.

Исходная вода поступает в осветлитель 1 , в который дозируется коагулянт и известковый реагент при необходимости вводится флокулянт для интенсификации процесса коагуляции и сокращения времени осветления воды. Осветленная вода поступает на механический фильтр 2, а шламовая вода после осветлителя скапливается в баке шламовых вод 3 и далее поступает на фильтр-пресс. 4 Обезвоженный шлам поступает в реактор извести 12, а отделившаяся вода направляется на механическую фильтрацию 2. Фильтрат после механического фильтра направляется на установку обратного осмоса 5. Концентрат после обратного осмоса 5 скапливается в баке концентрата 6 и далее направляется двумя параллельными потоками на Na-катионитовый фильтр 7 и Н-катионитовый фильтр 8. Умягченная вода после Na-катионитового фильтра может быть использована в качестве теплоносителя для теплосети. После регенерации Na-катионитового фильтра образуются жесткие высокоминерализованные сточные воды, которые далее направляются в гипсовый реактор 11. Вода после Н-катионитового фильтра 8 делится на два потока один поток направляется в точку подачи воды на установку обратного осмоса, а второй поток направляется в гипсовый реактор. Пермеат после установки обратного осмоса 5 проходит Н-катионитовый фильтр 9 и ОН-анионитовый фильтр 10 с получением обессоленной воды. В свою очередь фильтры в зависимости от назначения регенерируются серной кислотой и гидроксидом натрия. Кислые промывные отработанные регенерационные растворы направляются в гипсовый реактор 11, а щелочные отработанные регенерационные растворы могут быть использованы повторно в цикле станции после предварительной концентрации. В гипсовом реакторе 11 происходит процесс нейтрализации все стоки смешиваются в стехиометрическом количестве и образуется сульфат кальция (гипс), который выводится из реактора в виде гипсовой воды и отправляется на сушку 12 и далее может быть использован в качестве товарного продукта. Осветленная вода после гипсового реактора 11 может быть использована повторно на станции.

Заключительная вариация технологической схемы организована с применением Na-катионитного фильтра (рисунок 6).

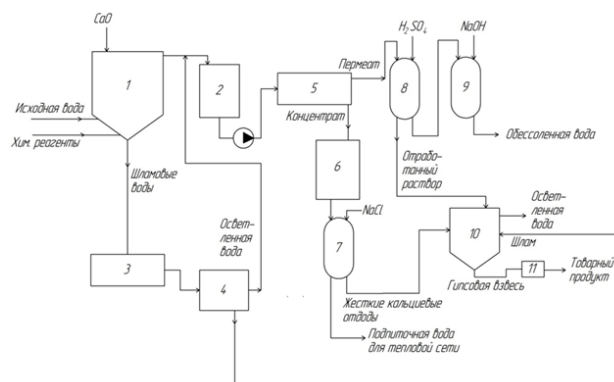


Рис. 6 Технологическая схема ВПУ с применением Na-катионитного фильтра в качестве очистки стоков

1 - осветлитель; 2 - механический фильтр; 3 - бак шламовых вод; 4 - фильтр пресс; 5 - установка обратного осмоса; 6 - бак концентрата; 7 - Na-катионитный фильтр; 8 - H катионитный фильтр; 9 - OH-анионитный фильтр; 10 - гипсовый реактор; 11 - сушильная камера.

Fig. 6 Industrial design of the UPU using a Na-cationic filter as a sewage treatment
1 - clarifier; 2 - mechanical filter; 3 - tank of slurry water; 4 - filter press; 5 - reverse osmosis installation; 6 - tank of concentrate; 7 - Na-cationic filter; 8 - H cationic filter; 9 - OH-anionite filter; 10 - gypsum reactor; 11 - drying chamber.

В данной технологической схеме весь поток концентрата после установки обратного осмоса направляется сначала в бак концентрата и потом проходит Na-катионитный фильтр. Вода, после Na-фильтра может быть использована для подпитки тепловой сети, после проведения количественного и качественного состава. Отработанные жесткие регенерационные растворы направляются в гипсовый реактор, в котором образуется гипсовая взвесь. Взвесь направляется на сушку и далее гипс может быть использован в качестве товарного продукта.

Предполагаем, что в результате корректного подбора технологии утилизации стоков количество сточных вод сократиться на 30-40%. Сокращение стоков повлечет за собой снижение затрат на использование: сырой воды, химических реагентов, а также оплаты штрафов за сброс с ненормированными значениями. Также дополнительная очистка сточных вод может быть организована с применением физических методов, а именно использование отстойников и механических фильтров.

Выбор технологической схемы утилизации сточных вод необходимо определять на основании расчета компонентного состава сточных вод, с дальнейшей апробацией на лабораторном стенде. Экономическую эффективность данного метода, возможно, оценить только после проведения опытно-промышленных испытаний на производственной площадке.

Выводы

Одним из важных критериев эксплуатации водоподготовки на ТЭС является сброс высокоминерализованных стоков. В России используется в основном два три типа ВПУ: ионный обмен, мембранные технологии и комбинированные установки. Но, несмотря на разнотипность ВПУ основная проблема ТЭС – сокращение, утилизация и эффективная очистка образующихся сточных вод.

Основные методы применяемые для очистки сточных вод можно разделить на группы: физические, химические, биологические. Использование одного метода крайне нерационально, поэтому для достижения наилучшего результата чаще используют их комбинацию.

Выбор метода утилизации сточных вод зависит от состава сточных вод и от способа организации ВПУ. На Стерлитамакской ТЭЦ реконструировали установку водоподготовки с внедрением мембранных методов, что в свою очередь привело к увеличению объемов сточных вод. Для данной станции было разработано три технологических решения, которые позволяют сократить количество сточных вод и позволяют перевести станцию в разряд малосточных предприятий. Выбор оптимального решения опирается на качественный и количественный состав сточных вод. Однако отходы комбинированных установок очень сложно поддаются классификации, поэтому при выборе метода необходимо опираться на усредненные лабораторные анализы.

Дальнейшая работа будет ориентирована на определение качественного и

количественного состава сточных вод в разные сезонные периоды. На основании результатов будет выбрано оптимальное технологическое решение и в последствии его апробация в лабораторных условиях.

Литература

1. Шищенко В.В., Хазиахметова, Ф.Р. Пути сокращения водопотребления и водоотведения на ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. 2. С. 14-16.
2. Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Королёв А.Г., Вафин Т.Ф. Экологическая и экономическая эффективность внедрения ресурсосберегающих технологий на тепловых электрических станциях // Труды академэнерго. 2010. 3. С. 65-71.
3. Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 7-е испр. Под ред. К.П. Мищенко. Л.:Химия, 1974. с.200.
4. РД 52.24.405-2005. Массовая концентрация сульфатов в водах. Методика выполнения измерений турбидиметрическим методом. - Взамен РД 52.24.405-95; Введен 30.06.2005. с.19.
5. Власова А.Ю., Рахматуллин С.С., Окунева Л.А. Экологизация и повышение эффективности традиционной энергетики Польши на примере проекта бурого угольной тепловой электростанции "TUROW" // Экологическая безопасность в техносферном пространстве. 2021. С. 45-49.
6. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д. Утилизация жидких высокоминерализованных отходов химобессоливающей водоподготовительной установки ТЭС с генерацией электроэнергии методом обратного электродиализа // Мембраны и мембранные технологии. 2021. С 382-390.
7. Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонова А.А., Бабилов О.Е. Ресурсосберегающая технология регенерации ионитной водоподготовительной установки ТЭЦ // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 2020. С.211-216.
8. Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Власов С.М., Власова А.Ю., Минибаев А. И., Филимонова А. А. Способ очистки высокоминерализованных кислых сточных вод водоподготовительной установки от сульфатов // патент на изобретение №2691052 С1.
9. Chichirov A.A., Chichirova N.D., Filimonova A.A., Minibaev A.I., Buskin R.V. Laboratory investigations of processing highly mineralized alkali solutions by means of electromembrane technology // Thermal engineering. 2019. С.527-532.
10. Vlasov S.M., Vlasova A.Y., Chichirova N.D. et al Research into bacterial contamination of the coolant of the chemical demineralization scheme at Kazan CHPP-1. Thermal engineering. 2022. С. 222-226.
11. Chichirov A.A., Chichirova N.D., Filimonova A.A., Minibaev A.I., Tolmachev L.I. Electrodialysis concentration of highly mineralized wastes of water treatment plants modeling // IOP conference series: earth and environmental science. 2019. С. 6-12.
12. Сайтов С.Р., Чичирова Н.Д., Чичиров А. А. Программа расчета состава исходной воды, пермеата и концентрата установки обратного осмоса // свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2018.
13. Николаева Л.А., Исхакова Р.Я. Очистка оборотных и сточных вод тэс от нефтепродуктов модифицированным шламом водоподготовки // Теплоэнергетика. 2017. С. 72-78.
14. Савельева А.В, Савельев С.Н., Фридланд С.В., Шайхiev И.Г. Очистка сернисто-щелочных сточных вод с применением в качестве реагентов медьсодержащих сточных вод гальванического производства // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды. 2018. С.194-199.
15. Семенова О.С., Добросмыслова И.В. Биологическая очистка сточных вод // Региональная научная студенческая конференция. 2010. С. 8-9.
16. Зайнуллин Л.А. Установка для нейтрализации кислых стоков // патент на изобретение № 2510870
17. Куценко С. А., Хрулева Ж. В. Способ очистки кислых сточных вод от цинка // патент на изобретение № 2294316
18. Элькинд К.М., Тишков К.Н., Смирнова В.М., Трунова И.Г., Кондрашев П.Ю. Способ регенерации отработанных растворов, содержащих серную кислоту // патент на изобретение №2149221 С1.
19. Гришин В.П, Макаров О.В., Некряченко С.Г. Способ очистки сточных вод от сульфат-ионов // патент на изобретение № 2559489 С1.
20. Peter Dale Rose, John Richard Duncan, Robert Paul Van Hille Process for treating

sulphate-containing waste water // United States Patent, US 6 315 904 B1.

21. Николаева Л. А., Бородай Е. Н., Голубчиков М. А. Сорбционные свойства шлама осветлителей при очистке сточных вод электростанций от нефтепродуктов // Известия высших учебных заведений. проблемы энергетики. 2011. №1-2. С132-136.

22. Николаева Л. А., Голубчиков М. А., Захарова С.В. Изучение сорбционных свойств шлама осветлителей при очистке сточных вод ТЭС от нефтепродуктов // Известия высших учебных заведений. проблемы энергетики. 2012. №9-10. С.86-91.

Авторы публикации

Власова Алена Юрьевна – кан. техн. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» (АТЭС) Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Shishchenko VV, Khaziakhmetova FR. Ways to reduce water consumption and wastewater disposal at thermal power plants. *Energy saving and water treatment*. 2010;2:14-16.

2. Chichirova ND, Chichirov AA, Korolev AG, et al. *Ecological and economic efficiency of the introduction of resource-saving technologies at thermal power plants*. Proceedings of akademenergo. 2010;3:65-71.

3. *Brief reference book of physical and chemical quantities*. Ed. 7th rev. Ed. K.P. Mishchenko. L.: Chemistry, 1974. p.200.

4. RD 52.24.405-2005. Mass concentration of sulfates in waters. Method for performing measurements by the turbidimetric method. Instead of RD 52.24.405-95; Introduced on 06/30/2005. p.19.

5. Vlasova AY, Rakhmatullin SS, Okuneva LA. Greening and improving the efficiency of traditional energy in Poland on the example of the project of brown coal thermal power plant TUROW. *Ecological safety in the technosphere space*. 2021, pp. 45-49.

6. Filimonova AA, Chichirov AA, Chichirova ND. Utilization of highly mineralized liquid wastes of a chemically desalinated water treatment plant at a thermal power plant with electricity generation by reverse electrodialysis. *Membranes and membrane technologies*. 2021. Pp.382-390.

7. Chichirov AA, Chichirova ND, Filimonova AA, et al. Resource-saving technology for the regeneration of an ion-exchange water treatment plant at a thermal power station. *Methodological issues of researching the reliability of large power systems*. 2020. pp.211-216.

8. Chichirova ND, Chichirov AA, Vlasov SM, et al. *Method for purification of highly mineralized acid wastewater from a water treatment plant from sulfates*. Patent for invention No. 2691052 C1.

9. Chichirov AA, Chichirova ND, Filimonova AA, et al. Laboratory investigations of processing highly mineralized alkali solutions by means of electromembrane technology. *Thermal engineering*. 2019. pp.527-532.

10. Vlasov SM, Vlasova AY, Chichirova ND. et al. Research into bacterial contamination of the coolant of the chemical demineralization scheme at Kazan CHPP-1. *Thermal engineering*. 2022, pp. 222-226.

11. Chichirov AA, Chichirova ND, Filimonova AA, et al. *Electrodialysis concentration of highly mineralized wastes of water treatment plants modeling*. IOP conference series: earth and environmental science. 2019, pp. 6-12.

12. Saitov SR, Chichirova ND, Chichirov AA. *The program for calculating the composition of the source water, permeate and concentrate of a reverse osmosis plant*. Certificate of state registration of a computer program. 2018.

13. Nikolaeva LA, Iskhakova RYa. Purification of circulating and waste water from thermal power plants from oil products with modified water treatment sludge. *Teploenergetika*. 2017, pp. 72-78.

14. Savelyeva AV, Savelyev SN, Fridland SV, et al. Purification of sulphurous-alkaline wastewater using copper-containing wastewater from galvanic production as reagents. *Innovative ways to solve urgent problems of nature management and environmental protection*. 2018. pp.194-199.

15. Semenova OS, Dobrosmyslova IV. *Biological wastewater treatment*. Regional scientific student conference. 2010, pp. 8-9.

16. Zainullin LA. Acid waste neutralization plant. Patent for invention No. 2510870
17. Kutsenko SA, Khruleva Zh. V. *Method for purification of acid waste water from zinc*. Patent for invention No. 2294316
18. Elkind KM, Tishkov KN, Smirnova VM. *The method of regeneration of waste solutions containing sulfuric acid*. Patent for invention No. 2149221 C1.
19. Grishin VP, Makarov OV, Nekryachenko SG. *Method for wastewater treatment from sulfate ions*. Patent for invention No. 2559489 C1.
20. Peter Dale Rose, John Richard Duncan, Robert Paul Van Hille. *Process for treating sulphate-containing waste water*. United States Patent, US 6 315 904 B1.
21. Nikolaeva LA, Borodai EN, Golubchikov MA. Sorption properties of clarifier sludge in the treatment of waste water from power plants from oil products. *Energy problems*. 2011;1-2:132-136.
22. Nikolaeva LA, Golubchikov MA, Zakharova SV. Study of the sorption properties of clarifier sludge in the treatment of wastewater from thermal power plants from oil products. *Energy problems*. 2012;9-10:86-91.

Authors of the publication

Alyona Yu. Vlasova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Nuclear and Thermal Power Plants» (APEC) of Kazan State Energy University (KGEU).

Получено	25.11.2022г.
Отредактировано	30.11.2022г.
Принято	11.12.2022г.

АНАЛИЗ АВАРИИ НА РЕФТИНСКОЙ ГРЭС, ПРОИЗОШЕДШЕЙ 22.08.2016 ГОДА

Аветисян А.С.¹, Ефимов Д.Н.^{1,2}

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

²Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия
avetisyan_geven@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. В работе исследуется авария, произошедшая 22 августа 2016 года в ЕЭС России. Начальные аварийные события случились в энергосистеме Свердловской области на Рефтинской ГРЭС – одной из самых мощных тепловых электростанций России. Затем последовали срабатывания технологических защит и, как следствие, каскадные отключения с нарушением целостности ЕЭС России. МЕТОДЫ. В рамках поставленной задачи авторами был проведен ряд исследований, направленных на выявление причинно-следственных связей на основе актов расследования аварии. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследованы основания возникновения и развития аварии и выделены главные причины происшествия. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Составлена единая причинно-следственная диаграмма возникновения и развития аварии с указанием событий, времени их возникновения и связей между ними.

Ключевые слова: Рефтинская ГРЭС; авария; конденсатор связи; энергосистема Свердловской области; отходящие линии; анализ; короткое замыкание.

Для цитирования: Аветисян А.С., Ефимов Д.Н. Анализ аварии на Рефтинской ГРЭС, произошедшей 22.08.2016 года // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 37-46. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-37-46.

ANALYSIS OF THE ACCIDENT AT REFTINSKAYA GRES, WHICH OCCURRED ON 08/22/2016

AS. Avetisyan¹, DN. Efimov^{1,2}

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia
avetisyan_geven@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. The work is devoted to the study and analysis of the accident on August 22, 2016 at the Reftinskaya GRES, which resulted in the operation of technological protection and, as a result, cascade shutdowns with a violation of the integrity of the UES of Russia. It should be noted that Reftinskaya GRES is one of the largest thermal power plants in Russia, with an installed capacity of 3800 MW. METHODS. Within the framework of the task set, the authors carried out a number of studies aimed at identifying cause-and-effect relationships on the basis of accident investigation acts. RESULTS. The grounds for the occurrence and development of the accident are investigated and the main causes of the accident are identified. CONCLUSION. A unified cause-and-effect diagram of the occurrence and development of an accident was compiled, indicating the events, the time of their occurrence and the links between them.

Keywords: Reftinskaya GRES; accident; communication capacitor; power system of the Sverdlovsk region; outgoing lines; analysis; short circuit.

For citation: Avetisyan AS, Efimov DN. Analysis of the accident at Reftinskaya GRES, which occurred on 22.08.2016. Power engineering: research, equipment, technology. 2022; 24(6):37-46. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-37-46.

Введение

Энергетика каждого государства функционирует в рамках национальной энергосистемы. В свою очередь, энергосистема представляет собой совокупность звеньев цепочки получения, преобразования, распределения и использования всех видов энергии. При этом вся энергосистема обладает единым режимом и постоянством процесса производства и распределения электроэнергии.

Непредвиденные или аварийные ситуации случаются на объектах электроэнергетики довольно часто. В результате отдельные элементы выводятся из работы, нередко – с повреждениями. К таким ситуациям относятся короткие замыкания, обрывы проводов, взрывы и повреждения в результате резких скачков напряжения в трансформаторных узлах, отказы функционирования систем управления и многие другие.

Целью представляемой научно-исследовательской работы является изучение и анализ аварии, случившейся 22 августа 2016 года на Рефтинской ГРЭС, в ходе которой происходили срабатывания технологических защит, и как следствие, каскадные отключения с нарушением целостности ЕЭС России.

Значимость исследования энергетических аварий очевидна. Аварии в электроэнергетических системах могут привести к длительным перерывам электроснабжения потребителей, обширных территорий, нарушению графиков движения общественного электротранспорта, поражению людей электрическим током. И для того, чтобы предотвратить катастрофические последствия, необходимо знать причины их возникновения.

Несмотря на большое количество исследований в этой и смежных областях такими учеными как Булыгина А.А., Егоров А.О., Савосина А.А. [1] по анализу структуры балансов мощности и электроэнергии региональной энергосистемы Свердловской области, Саенко Е.П., Младова Т.А. [2] по исследованиям и прогнозам чрезвычайных ситуаций на объектах ГРЭС, Решетов Е.В., Кальсин Н.В., Неплюев С.А. [3] по системе контроля состояния конденсаторов связи, Савченко Р.И. [4] по повышению безопасности и надёжности оборудования присоединения ВЧ-связи, тема анализа аварий остаётся актуальной и неисчерпаемой. В представляемой работе производится анализ и отслеживается причинно-следственная связь между событиями, приведшими к возникновению и развитию аварии в энергосистеме.

Состояние энергосистемы до аварии

Рефтинская ГРЭС

ВЛ 220 кВ Рефтинская ГРЭС – Сирень подключена через ОВ-220 на Рефтинской ГРЭС. Связь шин 500 кВ и 220 кВ на Рефтинской ГРЭС реализуется благодаря автотрансформатору 4 АТГ. Автотрансформатор 3 АТГ находился в отключенном состоянии со стороны 500 кВ [1, 5].

Состояние энергоблоков:

- в нормальной работе: №№2, 4, 6, 7;
- в работе с ограничением максимальной нагрузки (по условиям низкого вакуума и высокой температуры охлаждающей воды): №№ 9, 10;
- в холодном резерве - №1 с 00:26 20.08.2016 до 02:00 24.08.2016;
- в холодном резерве - №3 с 12:05 18.08.2016 до 02:00 24.08.2016;
- в аварийном ремонте - №5 с 12:01 21.08.2016 до 00:01 05.09.2016;
- в капитальном ремонте - №8 с 00:01 01.08.2016 до 00:01 01.09.2016.

Нагрузка электростанции на момент возникновения аварии составляла 2202 МВт.

ОЭС Урала

В энергосистеме Свердловской области в ремонте по заявкам:

- ВЛ 220 кВ Окунёво-Рефтинская ГРЭС (2-я цепь) - с 04:13 22.08.2016 до 18:00 26.08.2016 с аварийной готовностью 4 часа.
- ВЛ 220 кВ Белоярская АЭС Ново-Свердловская ТЭЦ - с 07:42 22.08.2016 до 21:00 31.08.2016 с аварийной готовностью 2 часа.

В энергосистеме Тюменской области, ХМАО и ЯНАО ВЛ 500 кВ Иртыш–Беркут находилась в ремонте по заявке с 04:40 02.08.2016 до 17:28 23.08.2016 с аварийной готовностью 24 часа.

Состав контролируемого сечения «ОЭС Урала - Тюменская энергосистема»:

- ВЛ 500 кВ Тюмень – Нелым;
- ВЛ 500 кВ Тюмень – Луговая;
- ВЛ 500 кВ Беркут – Иртыш.

Переток в контролируемом сечении «ОЭС Урала - Тюменская энергосистема» составлял 1248 МВт (выдача из Тюменской энергосистемы) при максимально

допустимом перетоке, равном 1850 МВт. Потребление в ОЭС Урала составляло 10136 МВт при фактической нагрузке электростанций 11443 МВт.

Гидроэлектростанции ОЭС Сибири

Нагрузки ГЭС на момент возникновения аварии составляли (МВт): Саяно-Шушенская – 4316, Братская – 3179, Усть-Илимская – 2674, Красноярская – 2428, Богучанская – 1734.

Карта-схема электрической сети Свердловской области и условные обозначения к ней приведены на рис. 1 и 2.

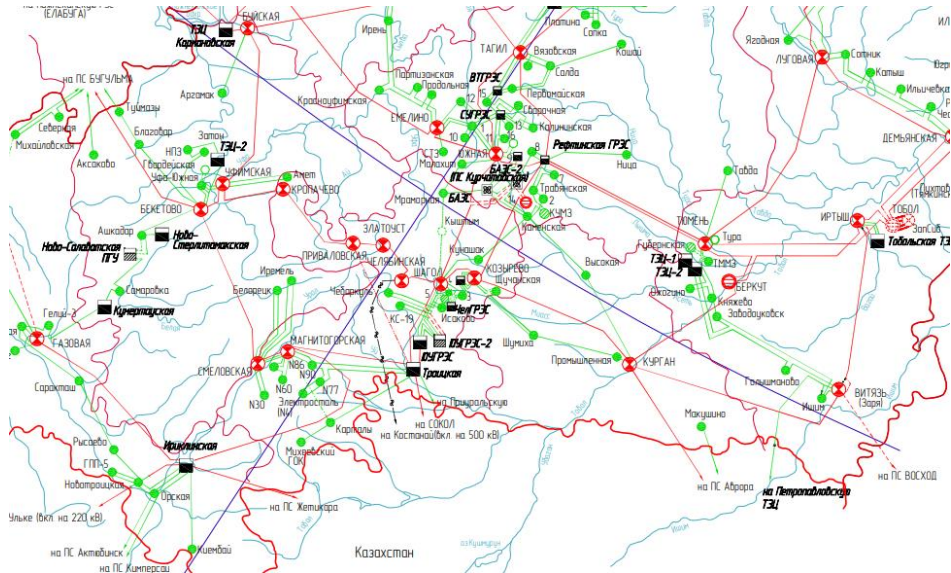


Рис. 1. Энергосистема Свердловской области.

Fig. 1. The power system of the Sverdlovsk region.

- 1 – ПС 220 кВ Первоуральская
- 2 – ПС 220 кВ Электрализная
- 3 – ПС 220 кВ НМеталлургическая
- 4 – ПС 220 кВ Цинковая
- 5 – ПС 220 кВ Таминский ГОК
- 6 – ПС 220 кВ Металлург
- 7 – ПС 220 кВ Анна
- 8 – ПС 220 кВ Окунево
- 9 – ПС Свердловская ТЭС
- 10 – ПС 220 кВ Метиз
- 11 – ПС 220 кВ Рядина
- 12 – ПС 220 кВ Трудная
- 13 – ПС 220 кВ Искра
- 14 – ПП 500 кВ Исеть
- 15 – ПС 220 кВ Песчаная
- 16 – ПС 220 кВ Надежда
- 17 – ПС 220 кВ Барсобо
- 18 – ПС 220 кВ Эмтор
- 19 – ПС 220 кВ Межуан
- 20 – ПС 220 кВ ГПП-2
- 21 – ПС 220 кВ Кирьяновская
- 22 – ПС 220 кВ Каркатеевы
- 23 – ПС 220 кВ Прадинская
- 24 – ПС 220 кВ Вектор
- 25 – ПС 220 кВ Полоцкая

	Существующие на 01.01.2014 г.	Вводимые в 2014 г.	Вводимые в 2015-2017 гг.	Вводимые в 2018 - 2020 гг.
Электростанции				
АЭС				
ГЭС				
ТЭС				
Подстанции				
500 кВ				
220 кВ				
Переключательный пункт				
Линии электропередачи				
500 кВ				
220 кВ				
Границы Государственной Энергосистемы ОЭС				

Рис. 2. Условные обозначения.

Fig. 2. Legend.

Аварийные события

Отходящие от Рефтинской ГРЭС линии электропередачи показаны на рис. 3. На рис. 4 представлена диаграмма событий, произошедших перед началом и в ходе развития аварии. События распределены по классам: слева – случайные события и управляющие воздействия, справа – естественные события как реакции энергосистемы и энергетического оборудования на изменение условий функционирования. На диаграмме представлены также причинно-следственные связи между событиями. Нумерация групп событий на рис. 4 соответствует цифровым обозначениям мест их локализации на рис. 3.

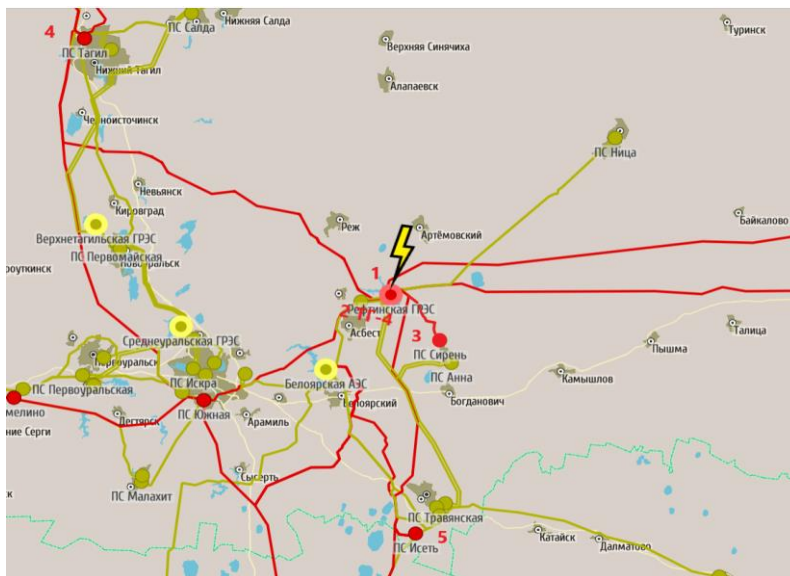


Рис. 3. Рефтинская ГРЭС и отходящие линии.

Fig. 3. Reftinskaya GRES and outgoing lines.

Последовательность событий (время – московское)

В 14:12:03 на ОРУ 220 кВ Рефтинской ГРЭС произошло разрушение конденсатора связи воздушной линии «Анна – Рефтинская ГРЭС». Это сопровождалось выбросом и возгоранием масла. Продукты взрыва вызвали дуговое двухфазное короткое замыкание на ОРУ. В результате замыкания произошло снижение напряжения – в том числе и в сети собственных нужд электростанции [6-8].

В 14:12:04 проявился отказ срабатывания релейной защиты поврежденного присоединения 220 кВ, и короткое замыкание ликвидировано не было. Одновременно началось последовательное отключение энергоблоков Рефтинской ГРЭС технологическими защитами от понижения напряжения. В течение нескольких секунд были отключены все находившиеся в работе генераторы станции суммарной нагрузкой 2,3 ГВт [2, 9].

В 14:12:06 проявился отказ срабатывания резервной защиты на автотрансформаторе 500/220 кВ, и в итоге короткое замыкание было отключено через несколько секунд защитами дальнего резервирования (на ВЛ 500 кВ, отходящих от Рефтинской ГРЭС).

В 14:12:15 вследствие задержки (более 5 с) ликвидации короткого замыкания возник асинхронный режим и сработала автоматика его ликвидации (АЛАР) на отключение ВЛ 500 кВ. В результате отключения ВЛ 500 кВ, связывающих энергосистемы Урала и Тюмени (Рефтинская ГРЭС – Тагил), Тюменская энергосистема оказалась изолированной от ЕЭС России с избытком мощности 1,4 ГВт. При этом частота в ЕЭС России снизилась до 49,74 Гц.

Далее, в 14:20 в ОЭС Сибири действием АЛАР было произведено отключение транзитных ВЛ 500 кВ и шунтирующих их ВЛ 110–220 кВ. Тем самым восточная часть ОЭС Сибири выделилась на изолированную от ЕЭС России работу с избытком мощности 2,1 ГВт [4, 10].

В результате срабатывания устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики с действием на отключение линий электропередачи ЕЭС России разделилась на несколько несинхронно работающих частей. В азиатских регионах России, а также в Монголии и Казахстане были произведены отключения потребителей [11, 12] действием автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) и автоматической частотной разгрузки (АЧР). В ходе аварии в период с 14:00 до 15:00 московского времени в ОЭС Урала и ОЭС Сибири генерация снизилась примерно на 2,5 ГВт по каждой из ОЭС, а в ЕЭС России – примерно на 3 ГВт.

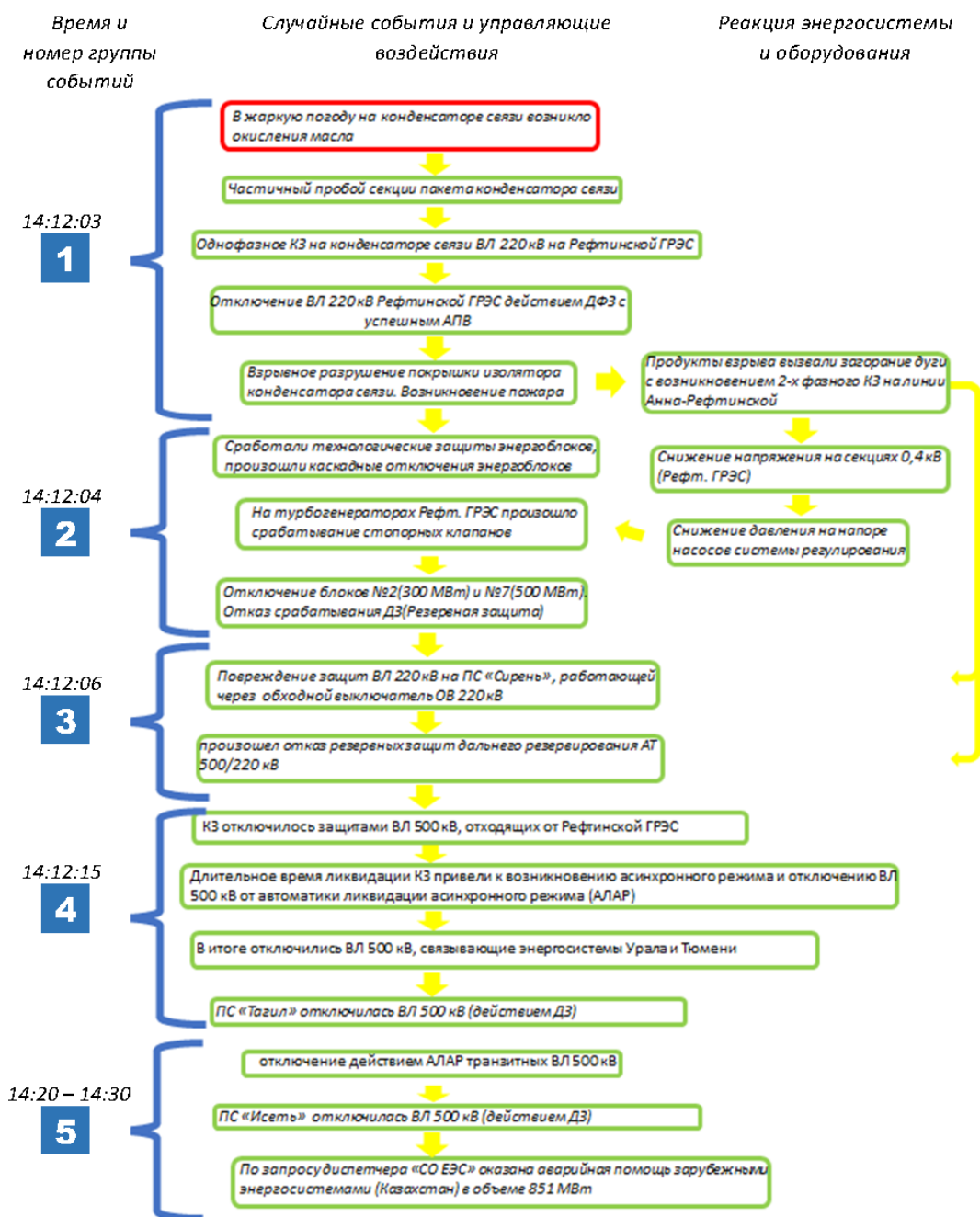


Рис. 4. Диаграмма причинно-следственных связей (время – московское).

Fig. 4. Diagram of causal relationships (Moscow time)

Использование конденсаторов связи

Конденсаторы связи используются во многих типах цепей, где необходимы выходные сигналы переменного тока, в то время как сигналы постоянного тока используются только для питания отдельных элементов и не должны появляться на выходе [3, 13].

Конденсаторы связи комплексируются с высокочастотными заградителями. Такой фильтр пропускает высокочастотный ток и ограничивает ток промышленной частоты. Кроме того, он отделяет высокое напряжение ЛЭП от низковольтной высокочастотной аппаратуры (рис. 5).

Ёмкостное сопротивление конденсатора связи обратно пропорционально электрической ёмкости (она постоянна для конкретного конденсатора) и электрической частоте сети. Для тока промышленной частоты сопротивление конденсатора будет высоким, а при повышении частоты сопротивление снижается.

Из рис. 6 видно, что ток высокой частоты идёт по пути наименьшего сопротивления через конденсатор связи, затем поступает на фильтр присоединения (ФП). ФП вместе с конденсатором связи образуют так называемый полосовой фильтр.

Его задача принять посланный сигнал только определённой заданной частоты и не пропустить (отфильтровать) помехи. Затем нужный сигнал поступает на соответствующую ВЧ-аппаратуру.

Конденсаторы связи состоят из фарфоровой покрывки, внутри которой находятся три соединённых параллельно пакета, в каждом из которых размещены по 90 секций рулонного типа, соединённых последовательно. Выход из строя конденсатора связан с окислением масла и повреждением проводника, соединяющего фланец с пакетами. В случае на Рефтинской ГРЭС это привело к частичному пробоем секции пакета, локальному нагреву и полному пробоем одной или нескольких секций пакета. Последнее вызвало увеличение ёмкости пакета, снижение его сопротивления и, соответственно, значительное увеличение протекающего по нему тока (рис. 7, [14]).

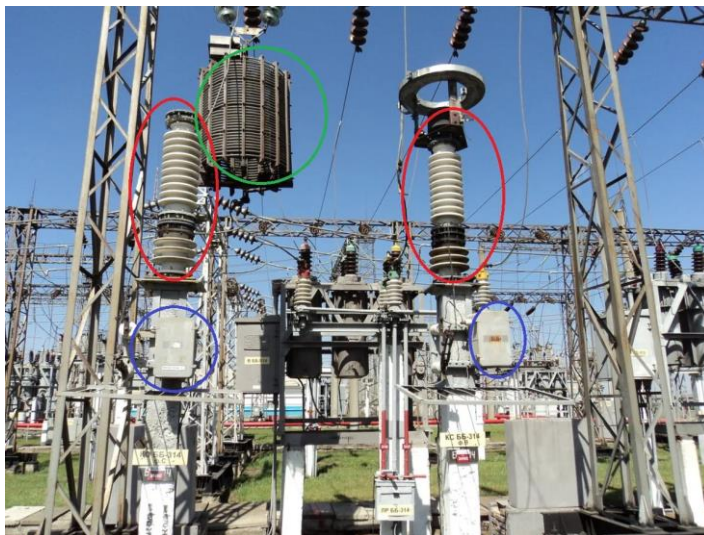


Рис. 5. Конденсаторы связи. Красным выделены конденсаторы связи; зелёным – высокочастотный заградитель; синим – фильтры присоединения.

Fig. 5. Coupling capacitors. The coupling capacitors are highlighted in red; the high-frequency barrier is highlighted in green; the connection filters are highlighted in blue.

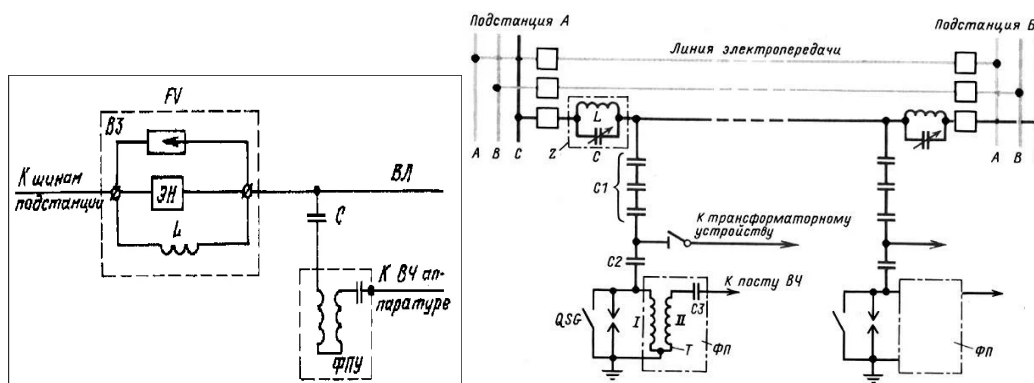


Рис. 6. Схемы организации высокочастотного канала на ЛЭП.

Fig. 6. Schemes of the organization of the high-frequency channel on the power line.

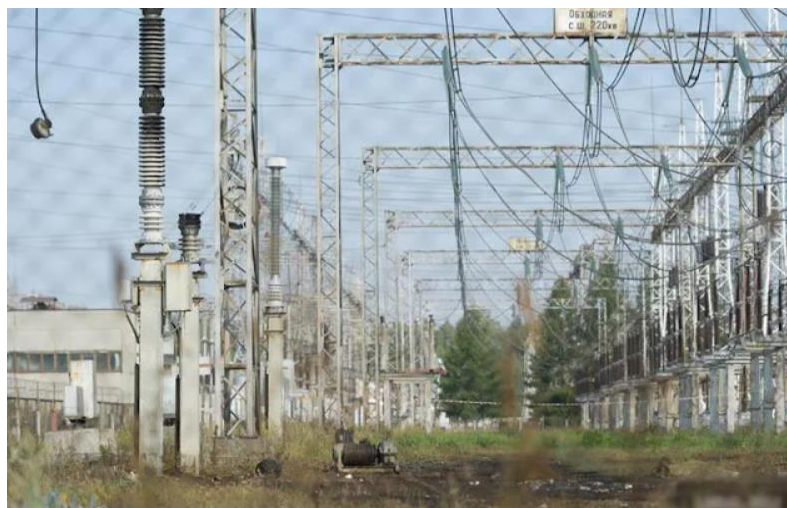


Рис. 7. Конденсатор связи ВЛ 220 кВ и ОРУ 220 кВ Рефтинской ГРЭС после пожара.

Fig. 7. Coupling capacitor of 220 kV overhead line and 220 kV outdoor switchgear at Reftinskaya GRES after a fire.

Результаты и их обсуждение

В результате выполнения представляемой работы был исследована доступная информация и проведен анализ аварии, начавшейся в Свердловской энергосистеме и распространившейся на объединенные энергосистемы Урала и Сибири.

Первопричиной аварии явилось разрушение конденсатора связи на ОРУ 220 кВ Рефтинской ГРЭС, приведшее к короткому замыканию. Вследствие отказов срабатывания двух устройств релейной защиты (при штатном срабатывании остальных устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики) возникли каскадные отключения энергоблоков и линий электропередачи.

В процессе аварии на изолированную от ЕЭС работу выделились Тюменская ЭЭС, восточная часть ОЭС Сибири, а также (совместно) энергосистемы Бурятии и Забайкалья (рис. 8, [6]).

Согласно «Акту №13-01-16/02-16 Расследования причин аварии, произошедшей 22.08.2016 года» [15] ошибочных действий оперативного персонала Рефтинской ГРЭС выявлено не было, и рабочая мощность электростанции после аварии была восстановлена в кратчайшие сроки.

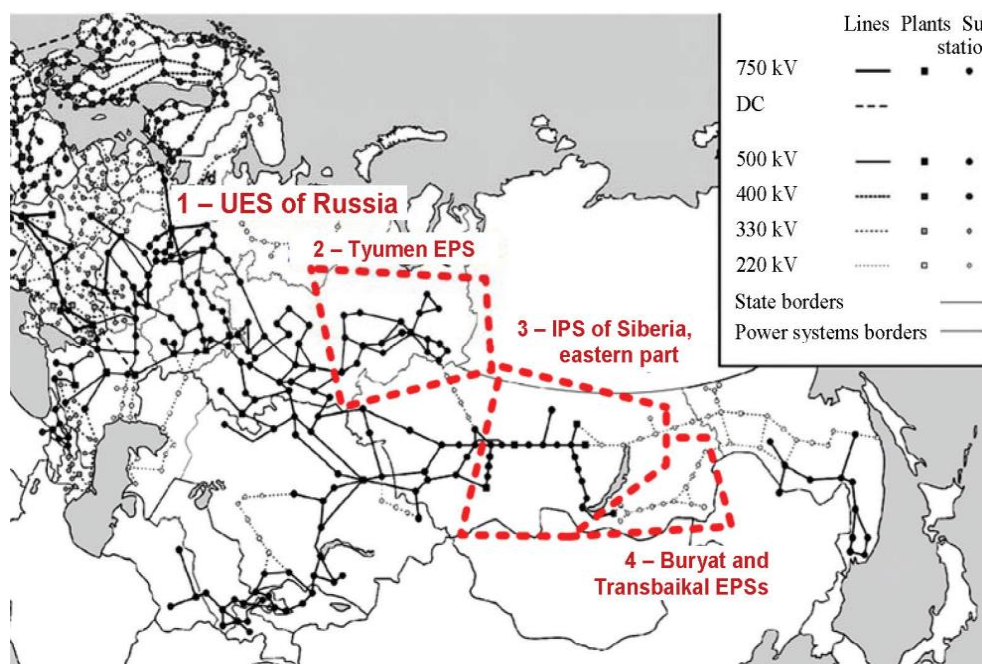


Рис. 8. Выделение трёх энергосистем на изолированную от ЕЭС России работу.

Fig. 8. Allocation of three power systems for operation isolated from the UES of Russia.

Выводы

1. Аварии и катастрофы в РФ часто оказываются следствием ведомственно-технократической стратегии, которая приводит к сооружению объектов с недостаточным количеством средств по обеспечению безопасности. Одним из примеров является рассмотренная в статье авария, начавшаяся на Рефтинской ГРЭС Свердловской энергосистемы с разрушения конденсатора связи ВЛ 220 кВ, выброса и возгорания масла и последовавшего короткого замыкания на ОРУ 220 кВ. Далее последовали каскадные отключения энергоблоков и линий электропередачи в двух объединенных энергосистемах.

2. На основе источников, находящихся в открытом доступе авторами была составлена диаграмма причинно-следственных связей с указанием событий и времени их возникновения.

3. В результате аварии была нарушена целостность ЕЭС России – на изолированную работу выделились энергосистемы Тюмени, восточной части ОЭС Сибири, Бурятии и Забайкалья. Это, в свою очередь, привело к дисбалансу между генерацией и потреблением электрической мощности во всех названных энергосистемах. По причине такого дисбаланса произошло снижение частоты тока в сети и его напряжения, что и привело к каскадному срабатыванию автоматики на смежных подстанциях. Из последствий аварии для потребителей стоит отметить, что один из крупнейших в стране производителей полимеров «Томскнефтехим», подконтрольный «Сибуру», был вынужден приостановить свою деятельность на продолжительное время (около 24 часов). Перебои электроснабжения имели место также на шахтах Кузбасса (ЛУКОЙЛ).

Литература

1. Булыгина А.А., Егоров А.О., Савосина А.А. Анализ структуры балансов мощности и электроэнергии региональной энергосистемы Свердловской области. В сборнике: Развивая энергетическую повестку будущего. Сборник докладов Международной научно-практической конференции для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК. Санкт-Петербург, 2021. С. 99-104. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=47381798>].

2. Исследования и прогноз чрезвычайных ситуаций на объектах ГРЭС. Саенко Е.П., Младова Т.А. В сборнике: Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч. Комсомольск-на-Амуре, 2020. С. 67-69. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=43947535>].

3. Система контроля состояния конденсаторов связи. Решетов Е.В., Кальсин Н.В., Неплюев С.А. Патент на изобретение RU 2675250 C1, 18.12.2018. Заявка № 2018110229 от 22.03.2018. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=37364381>].

4. Повышение безопасности и надёжности оборудования присоединения ВЧ-связи. Савченко Р.И. Энергетик. 2019. № 11. С. 17-19. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=41432287>].

5. Анализ системной аварии 2016 г. в ЕЭС России, вызванной повреждением оборудования на Рефтинской ГРЭС. Воропай Н. И., Осак А. Б., Смирнов С. С. Электричество. 2018. № 3. С. 27-32. [<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32477464>].

6. Some Generalizations of an Analysis of 2016-2017 Blackouts in the Unified Power System of Russia. N.I. Voropai, D.N. Efimov, A.B. Osak, M.V. Chulyukova. Energy Systems Research. V. 3, No. 2, 2020.

7. B. Li, P. Gomes, R. Baumann. Lessons learned from recent emergencies and blackout incidents. Electra. no. 279, pp. 66–73, 2015.

8. Y. Besanger, M. Eremia, N. Voropai. Major grid blackouts: Analysis, classification, and prevention, in Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control, Hoboken, IEEE Press-Wiley. 2013, pp. 789–863.

9. B. Martins, P. Gomes, F. Alves. Lessons learned in restoration from recent blackout incidents in Brazilian power system. CIGRE 2012 Session, Paris, France, August 25–30, C2-214, 2012, 8 p.

10. P. Hines, J. Apt, S. Talukdar. Large blackouts in North America: Historical trends and policy implications. Energy Policy. V. 37. no. 12, pp. 5249–5259, 2009.

11. P. Pourbeik, P. S. Kundur, C. W. Taylor. The anatomy of a power grid blackout. IEEE Power and Energy Magazine. V. 4 no. 5, pp. 22–29, 2006.

12. W. Bialek. Blackouts in the US/Canada and continental Europe in 2003: is liberalization to blame? 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech, St. Petersburg, Russia, June 27–

30, 2005, 7 p.

13. Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2014-2020 годы. Приказ Минэнерго России от 1 августа 2014 №495.

14. PROenergo. Кто заплатит потребителям за убытки: итоги расследования масштабной аварии 22 августа 2016 г. на Рефтинской ГРЭС [Электронный ресурс] <https://proenergo.blogspot.com/2016/10/investigation-of-blackout-in-Siberia-2016.html>

15. АКТ № 13-01-16/02-16 Расследования причин аварии, произошедшей 22.08.2016 года.

Авторы публикации

Аветисян Артур Сергеевич – магистрант кафедры Электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ).

Ефимов Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского университета (ИРНИТУ); старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

References

1. Bulygina AA, Egorov AO, Savosina AA. *Analysis of the structure of power and electricity balances of the regional power system of the Sverdlovsk region. In the collection: Developing the energy agenda of the future.* Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference for representatives of the community of young fuel and energy engineers. St. Petersburg, 2021. pp. 99-104. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=47381798>].

2. Sayenko EP, Mladova TA. *Research and forecast of emergency situations at the GRES facilities. In the proceedings: Youth and Science: actual problems of fundamental and applied research.* Materials of the III All-Russian National Scientific Conference of Students, postgraduates and young scientists, in 3 parts. Komsomolsk-on-Amur, 2020. pp. 67-69. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=43947535>].

3. Reshetov EV, Kalsin NV, Neplyuev SA. *A system for monitoring the condition of communication capacitors.* Patent for invention RU 2675250 C1, 12/18/2018. Application No. 2018110229 dated 22.03.2018. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=37364381>].

4. Savchenko RI. *Improving the safety and reliability of RF connection equipment.* Power engineer. 2019. No. 11. pp. 17-19. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=41432287>].

5. Voropai NI, Osak AB, Smirnov SS. Analysis of the 2016 system accident in the UES of Russia caused by equipment damage at Reftinskaya GRES. *Electricity.* 2018;3:27-32. [<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32477464>].

6. Voropai I, Efimov DN, Osak AB, et al. Some MV. Generalizations of an Analysis of 2016-2017 Blackouts in the Unified Power System of Russia. *Energy Systems Research.* 2020;3(2).

7. B. Li, P. Gomes, R. Baumann. Lessons learned from recent emergencies and blackout incidents. *Electra.* 2015;279:66–73, 2015.

8. Besanger Y, Eremia M, Voropai N. Major grid blackouts: Analysis, classification, and prevention, in *Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control*, Hoboken, IEEE Press-Wiley, 2013, pp. 789–863.

9. Martins B, Gomes P, Alves F. *Lessons learned in restoration from recent blackout incidents in Brazilian power system.* CIGRE 2012 Session, Paris, France, August 25–30, C2-214, 2012, 8 p.

10. Hines P., Apt J., Talukdar S. Large blackouts in North America: Historical trends and policy implications. *Energy Policy.* 2009;37(12):5249–5259, 2009.

11. Pourbeik P., Kundur PS, Taylor CW. The anatomy of a power grid blackout. *IEEE Power and Energy Magazine.* 2006;4(5):22–29, 2006.

12. Bialek W. *Blackouts in the US/Canada and continental Europe in 2003: is liberalization to blame?* 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech, St. Petersburg, Russia, June 27–30, 2005, 7 p.

13. *Scheme and program for the development of the Unified Energy System of Russia for 2014-2020.* Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 495 dated August 1, 2014.

14. PROenergo. *Who will pay consumers for losses: the results of the investigation of a large-scale accident on August 22, 2016 at Reftinskaya GRES* [Electronic resource] <https://proenergo.blogspot.com/2016/10/investigation-of-blackout-in-Siberia-2016.html>.

15. ACT No. 13-01-16/02-16 Investigation of the causes of the accident that occurred on 22.08.2016.

Authors of the publication

Arthur S. Avetisyan – graduate student of the department «Power Supply and Electrical Engineering», Irkutsk National Technical Research University, Irkutsk, Russia.

Dmitry N. Efimov – PhD in technical sciences, associate professor of the department «Power Supply and Electrical Engineering», Irkutsk National Research University, Irkutsk, Russia; Senior researcher of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia.

Получено **14.11.2022г.**

Отредактировано **22.11.2022г.**

Принято **29.11.2022г.**



РОССИЙСКИЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ ХИМВОДОПОДГОТОВКИ В ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)

Королев¹ В.И., Зверева² Э.Р

^{1,2}Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
ORCID*:0000-0002-7632-2642 ezidepakes@gmail.com¹
ORCID*: 0000-0003-2285-6312 belvira6@list.ru²

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть опыт применения отходов химводоподготовки в хозяйственной деятельности. Провести анализ научных публикаций российских и зарубежных авторов с целью определения наиболее востребованных отраслей промышленности в данном отходе и информации о уже реализованных в России и за рубежом проектах. Предоставить краткий анализ по основным направлениям переработки и утилизации осадков сточных вод в мире и в России. Оценить перспективы использования отходов химводоподготовки при обработке осадков сточных вод. МЕТОДЫ. Для решения поставленной цели проведена оценка экологического воздействия отходов химводоподготовки на экологическую обстановку и здоровье людей на примере Казанской ТЭЦ-1 (КТЭЦ-1). Проведен ряд исследований карбонатного шлама КТЭЦ-1 по определению гранулометрического и элементного состава. РЕЗУЛЬТАТЫ. Физико-химический состав карбонатного шлама зависит от ряда параметров системы водоподготовки на объекте энергетики: процесса известкования и коагуляции воды, количества нерастворимых солей, применяемой технологии обезвоживания и т.д. Карбонатный шлам нерастворим в воде, имеет типовой химический состав, содержащим карбонат кальция (CaCO_3), оксид кальция (CaO), карбонат магния (MgCO_3), оксид магния (MgO), гидроксид железа ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), диоксид кремния (SiO_2) и др. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование такого типа технологического процесса позволяет снизить количество используемого оксида кальция и заместить его оксидом кальция из карбонатного шлама. Использование карбонатного шлама в качестве стабилизатора осадка из-за содержания CaO подтверждается лабораторными исследованиями. За счет этих данных обеспечивается утилизация отходов химводоподготовки, достигается меньшее загрязнение объектов окружающей среды.

Ключевые слова: ТЭК; карбонатный шлам; отходы химводоподготовки; осадок сточных вод; утилизация осадка; реагентное обеззараживание осадков; негашеная известь.

Благодарности: Результаты получены при финансовой поддержке Ассоциации граждан и организаций по содействию развитию корпоративного образования «МАКО» в лице президента Голышенковой Ольги Михайловны.

Для цитирования: Королев В.И., Зверева Э.Р. Российский опыт применения отходов химводоподготовки в хозяйственной деятельности: перспективы использования при обработке осадков сточных вод (обзорная статья). 2022. Т.24. № 6. С. 47-62. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-47-62.

RUSSIAN EXPERIENCE IN THE USE OF CHEMICAL WATER TREATMENT WASTE IN ECONOMIC ACTIVITY: PROSPECTS FOR USE IN THE TREATMENT OF SEWAGE SLUDGE (REVIEW ARTICLE)

VI. Korolev¹, ER. Zvereva²

^{1,2} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID*:0000-0002-7632-2642 ezidepakes@gmail.com¹
ORCID*: 0000-0003-2285-6312 belvira6@list.ru²

Abstract: *PURPOSE. To consider the experience of using chemical water treatment waste in economic activity. To analyze scientific publications of Russian and foreign authors in order to determine the most popular industries in this waste and information about projects already implemented in Russia and abroad. To provide a brief analysis of the main areas of processing and disposal of sewage sludge in the world and in Russia. To assess the prospects for the use of chemical water treatment waste in the treatment of sewage sludge. METHODS. To achieve this goal, an assessment of the environmental impact of chemical water treatment waste on the environmental situation and human health was carried out on the example of Kazan CHP-1 (KTEC-1). A number of studies of KTEC-1 carbonate sludge have been carried out to determine the granulometric and elemental composition. results. The physico-chemical composition of carbonate sludge depends on a number of parameters of the water treatment system at an energy facility: the process of liming and coagulation of water, the amount of insoluble salts, the dewatering technology used, etc. Carbonate sludge is insoluble in water, has a typical chemical composition containing calcium carbonate (CaCO_3), calcium oxide (CaO), magnesium carbonate (MgCO_3), magnesium oxide (MgO), iron hydroxide ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), silicon dioxide (SiO_2), etc. CONCLUSION. The use of this type of technological process makes it possible to reduce the amount of calcium oxide used and replace it with calcium oxide from carbonate sludge. The use of carbonate sludge as a sediment stabilizer due to the CaO content is confirmed by laboratory studies. Due to these data, the disposal of chemical water treatment waste is ensured, less pollution of environmental objects is achieved.*

Keywords: *fuel and energy complex; carbonate sludge; chemical water treatment waste; sewage sludge; sludge disposal; reagent disinfection of sediments; quicklime.*

Acknowledgments: *The results were obtained with the financial support of the Association of Citizens and Organizations for the Promotion of Corporate Education «МАКО» in the person of President Golysheva Olga Mikhailovna.*

For citation: Korolev VI, Zvereva ER. Russian experience in the use of chemical water treatment waste in economic activity: prospects for use in the treatment of sewage sludge (review article). *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):47-62. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-47-62.

Введение

В Российской Федерации количество образуемых отходов на объектах негативного воздействия на окружающую среду, генерирующих тепло и электроэнергию, составляет около 40 % от общего количества производственных отходов (без учета отходов, образующихся при добыче энергоресурсов) и оценивается примерно в 90-95 млн тонн в год. При этом объем накопленных на территории России золошлаковых отходов (ЗШО) приближается к 2 млрд т, размещенных на территориях более чем 22 000 га [1].

Правительство России в июне 2020 года утвердило Энергетическую стратегию до 2035 года. В документе впервые установлен целевой показатель утилизации золошлаков тепловых электростанций: к 2035 году объем их полезного использования должен составлять не менее 50 % от годового уровня образования по отрасли в целом [2]. По данным Минэнерго России, в 2018 году данный показатель составлял 8,4 %. Этот уровень был взят за базовый в Энергостратегии-2035 [3].

Отвалы ЗШО являются источниками негативного воздействия на компоненты окружающей среды и представляют опасность как для растительного и животного мира, так и для здоровья граждан, живущих в непосредственной близости к объектам их размещения. На отвалах должны соблюдаться определенные правила хранения, поскольку воздействие таких природных факторов как ветровая эрозия, дождевые и талые воды приводят к загрязнению грунтовых и поверхностных водных источников, атмосферного воздуха и почв мелкодисперсной пылью и токсичными элементами в ЗШО [4].

Важно отметить, что в независимости от вида используемого топлива (уголь, мазут, газ) для генерации тепла и электроэнергии на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК) необходимо проводить химводоподготовку теплоносителя, в большинстве случаев это вода. В результате типового процесса работы систем химводоподготовки (известкования и коагуляции в осветлителях) образуется большое количество карбонатного шлама. Традиционно шламы химводоподготовки (ХВО) складываются и временно накапливаются в шламоотвалах [4].

Настоящая статья является описательной для оценки степени возможного применения отходов ХВО в хозяйственной деятельности в качестве предмета исследования. Проведен анализ технологий, основанные на принципе «отходы-в-ресурс», при котором возможно достижение «нулевого» размещения производственных отходов на территории предприятий, что удовлетворяет условиям реализации циркулярной экономики на предприятиях ТЭК.

Научная значимость заключается в нахождении технологического решения повторного применения отходов химводоподготовки в промышленном обороте, и его соответствие условиям реализации циркулярной экономики на предприятиях топливно-энергетического комплекса, с целью предотвращения эколого-экономического ущерба на окружающую среду.

Практическая значимость заключается в повторном использовании карбонатного шлама в промышленном обороте, что позволит не только сократить их количество на шламоотвалах, но и предотвратить складирование вновь образующиеся отходов, тем самым создавать безотходные производства и снизить нагрузку объектов ТЭК на окружающую среду.

Литературный обзор

Проведен литературный обзор научных трудов, используя ресурсы поисковых систем и научных электронных библиотек «КиберЛенинка», eLIBRARY.RU, Google Scholar по вышеуказанным ключевым словам. В обзорной статье использованы научные статьи, содержащие доказательную экспериментальную базу применения и определенными ресурсами, аргументами и фактами, которые помогают разобраться в ситуации, подталкивая к определенному пути действий. Также в статье использованы результаты исследований, выполненных авторами.

На текущий момент, объекты ТЭК ежегодно вкладывают значительные финансовые и человеческие ресурсы на содержание, эксплуатацию и реконструкцию действующих отвалов карбонатного шлама, а также на строительство и отчуждения огромных территорий земельных участков под новые отвалы, что приводит к изъятию земель из промышленного и сельскохозяйственного производства. Все эти издержки потенциально влияют на повышение себестоимости генерации тепла и электроэнергии, платы за негативное воздействие на окружающую среду [1]. Таким образом, перед объектами ТЭК стоит задача по решению проблемы дальнейшей обработки, хранения и утилизации ЗШО с получением экологической и экономически выгодной продукции.

Возможные способы и практический опыт использования карбонатного шлама в качестве вторичного сырья приведен в таблице 1.

Таблица 1

Способ использования карбонатного шлама в различных отраслях промышленности*

Отрасль экономики (деятельность)	Способ использования
Строительство	1. В качестве компонента для производства стеновых изделий кирпича (силикатный, глинистый) и гипсополистиролбетонных стеновых панелей; сухие строительные смеси [6-12]. 2. В качестве добавки к сырьевой смеси для производства бетонов, цементов, бетоны, растворов; мелкий заполнитель; микрозаполнитель в асфальтобетон [13-16]. 3. В качестве компонента материалов для строительства дорог: для строительства обсыпки нижних слоев дорожных покрытий из укрепленных грунтов дорог, аэродромов, автострад.
Энергетика	1. Повышение показателей эффективности с использованием присадок на эксплуатационные свойства топочных мазутов [17-19].
Сельское хозяйство	1. В качестве мелиоранта для известкования кислых почв [21-22]. 2. В производстве минеральных удобрений [23-24].
Инженерная экология (природоохранные мероприятия)	1. В качестве адсорбента для очистки дымовых газов [25-27]. 2. В качестве адсорбента для очистки сточных вод [28-30]. 3. В качестве адсорбционной осушки природного газа [31]. 4. В качестве добавки в искусственные почвогрунтовые смеси и в качестве рекультивационного материала для рекультивации земель [32-33].

Примечание * – перечислены основные направления

Экологическое воздействие объектов размещения отходов ХВО (карбонатного шлама).

В данный момент на территории Российской Федерации действующими являются 90 специализированных объектов размещения отходов на территориях которых, размещены 1 352,782 тыс. тонн отходов ХВО энергетики, согласно сведениям федеральной статистической отчетности 2-ТП (отходы) по кодам федерального классификационного каталога (ФККО) в таблице 2 [34].

Таблица 2

Отходы химводоподготовки, согласно сведениям федеральной статистической отчетности 2-ТП (отходы)

Номер ФККО	Наименование	Кол-во отходов, т
6 12 282 25 30 4	Осадок при отстое вод взрыхления осадка, регенерации, отмывки ионообменных фильтров водоподготовительных установок	18 457
6 18 211 01 20 4	Отходы механической очистки внутренних поверхностей котельно-теплогового оборудования и баков водоподготовки от отложений	2
7 10 110 02 39 5	Отходы (осадки) водоподготовки при механической очистке природных вод	1 222 401
7 10 200 00 00 0	Отходы при водоподготовке	379
7 10 200 00 00 0	Отходы при водоподготовке	100 112

Отдельно энергетика Татарстана является одним из центральных секторов экономики России, обеспечивающий производство, транспортировку и сбыт электрической и тепловой энергии. В настоящее время на территории Республики Татарстан действующими являются 5 специализированных объектов размещения отходов ХВО (таблица 3).

Таблица 3

Объекты размещения отходов химводоподготовки на территории Республики Татарстан

№	Наименование	Организация	Населенный пункт Республики Татарстан
1	Шламоотвал Нижнекамской ТЭЦ	ООО «Нижнекамская ТЭЦ»	г. Нижнекамск
2	Шламоотвал Нижнекамской ТЭЦ (ПТК-1)	АО «ТГК-16»	г. Нижнекамск
3	Шламонакопитель Казанской ТЭЦ-3 (шлам ХВО)	АО «ТГК-16»	г. Казань
4	Кировский золошлакоотвал Казанской ТЭЦ-2	АО «Татэнерго»	г. Казань
5	Шламоотстойник Казанской ТЭЦ-1	АО «Татэнерго»	г. Казань

Из-за значительного количества образуемых отходов, согласно законодательным требованиям, собственники объектов размещения отходов должны проводить мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды в пределах их воздействия на окружающую среду в целях предотвращения негативных изменений качества окружающей среды [35]. Для осуществления наблюдений за состоянием и загрязнением окружающей среды на территории объекта размещения отходов привлекаются организации (лаборатории), имеющие соответствующую область аккредитации по определению:

1. Качества и загрязнения подземных вод;
2. Микробиологических и паразитологических показателей загрязненности подземных вод;
3. Степени загрязненности почвы;
4. Уровня загрязненности атмосферного воздуха;

Перечни наблюдаемых показателей состояния загрязнения окружающей среды, количество и расположение контрольных точек, а также периодичность проведения наблюдений определяются и согласовываются с уполномоченным органом власти для получения достоверной информации, позволяющей предотвратить опасность загрязнения.

В ходе проведения оценки экологического воздействия объектов размещения отходов энергетики в Республике Татарстан, по имеющимся в открытом доступе данным отчетов о результатах мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территории шламоотстойника филиала АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1 за 2018-2021 гг. (далее – Объект).

1. Воздействие Объекта на атмосферный воздух не наблюдается, т.к. значение показателей по взвешенным веществам из года в год остаются на одном уровне, это вероятнее всего обусловлено тем, что отход «Отходы водоподготовки при механической очистке природных вод» находится во влажном состоянии (влажность более 60%), тем самым оказывает минимальное «пыление» (таблица 4).

Таблица 4

Показатели воздействия Объекта на атмосферный воздух					
Наименование показателя	Фоновое загрязнение	Данные за 2018 г.	Данные за 2019 г.	Данные за 2020 г.	Данные за 2021 г.
Взвешенные вещества, мг/м ³	0,157	0,26	<0,26	<0,26	<0,26

2. Влияние Объекта размещения отходов на подземные воды не представляется объективно определить, т.к. не наблюдается характерные изменения показателей загрязненности подземных вод шламовыми водами, входящими в состав отхода (таблица 5).

Таблица 5

Показатели воздействия Объекта на подземные воды				
Наименование показателя	Данные за 2018 г.	Данные за 2019 г.	Данные за 2020 г.	Данные за 2021 г.
Перманганатная окисляемость, мг/л	5,01	3,41	0,59	5,34
Нефтепродукты, мг/л	0,019	0,01	0,02	0,03
Аммоний-ион, мл/л	0,14	0,1	0,33	0,27
Хлориды, мг/л	22,18	16,32	13,16	15,44
СПАВ, мг/л	0,017	0,025	0,02	0,02
Марганец, мг/л	0,008	0,013	0,02	0,01
Алюминий, мг/л	0,094	0,067	0,053	0,09
Свинец, мг/л	0,001	0,0013	0,003	0,01
Никель, мг/л	0,005	0,0055	0,011	0,01
Железо, мг/л	0,39	0,428	1,245	0,13
Минерализация, мг/л	223,66	257,58	190,75	189,67
Магний, мг/л	20,6	17,2	14,04	16,06
Фенолы, мг/л	<0,0005	0,017	0,005	<0,0005
Мутность, мг/л	20,74	32,6	46,36	11,8
Запахи, баллы	4,54	1,75	0,8	0,58

3. Относительно данных имеющихся за весь период наблюдений начиная с 2018 г. по настоящее время демонстрирует, что количественный состав загрязняющих веществ почвы меняется без какой-либо системности (таблица 6):

Таблица 6

Показатели воздействия Объекта на почвы				
Наименование показателя	Данные за 2018 г.	Данные за 2019 г.	Данные за 2020 г.	Данные за 2021 г.
рН водной вытяжки	7,1	8,7	8,0	6,8
Медь, мг/кг	0,9	24,96	13,0	26,4
Никель, мг/кг	<1	4,36	3,4	0,95
Кадмий, мг/кг	<0,02	<0,02	<0,10	0,11
Цинк, мг/кг	31,3	38,0	65,6	62,0
Свинец, мг/кг	16,4	17,5	8,2	<2,5
Хром (валовый), мг/кг	15,3	9,3	3,1	2,9
Марганец (валовый), мг/кг	123	116	104	72

Исходя из вышеизложенного, определить результативность мер по уменьшению последствий влияния Объекта крайне сложно, однако, вопрос отчуждения больших

территорий для размещения отходов энергетики, которые практически безвозвратно изымаются из полезного использования остается актуальным даже после их рекультивации. Также содержание таких сооружений требует значительных эксплуатационных затрат, повышающих себестоимость производства энергоносителей.

Анализ научных публикаций российских и зарубежных авторов показал, что карбонатный шлак представляют собой универсальный материал для получения различных видов продукции и использования в различных отраслях промышленности. Наиболее востребованным карбонатный шлак в строительной отрасли, а также в качестве сорбционного материала при реализации технологических и технических решений различных природоохранных мероприятий по очистке выбросов, сточных вод и рекультивации.

Тем самым проблема утилизации отходов энергетики возникла не сегодня и не вчера и вопрос их вовлечения в хозяйственный оборот (в том числе с получением вторичной продукции) недостаточно регулируется на законодательном уровне [36].

Материалы и методы

Физико-химический состав карбонатного шлака.

Карбонатный шлак образуется при процессе известкования и коагуляции природной воды, в результате образуется отход с типовым химическим составом, содержащим карбонат кальция (CaCO_3), оксид кальция (CaO), карбонат магния (MgCO_3), оксид магния (MgO), гидроксид железа (Fe(OH)_3), диоксид кремния (SiO_2) и др. Процентное соотношение химического состава карбонатного шлака зависит от содержания минеральных примесей в используемой при очистке природной воды [37].

По результатам исследований Исхаковой Р.Я. и Николаевой Л.А. [38], Захаровой С.В. [39], Голубчикова М.А. [40], Коровкина М.О. [41], Кузьминой Т.И. [42] шлак ХВО содержит в себе следующий химический состав (таблица 7) и физико-химические показатели (таблица 8):

Таблица 7

Химический состав карбонатного шлака ХВО

Состав	Химический состав в процентах по массе, %
Кальцит CaCO_3	68,9 - 71,7%
Гидроксид магния	8,8 - 11,0%
Гидроксид кальция Ca(OH)_2	1,7 - 1,9%
Диоксид кремния (кварц) SiO_2	0,68 - 0,8%
Другие вещества, в т.ч. органические	12,0 – 18,0%

Таблица 8

Физико-химические показатели шлака водоподготовки КТЭЦ-1

Показатели	Размер частиц шлака, мм					
	< 0,09	0,09 – 0,5	0,5 – 1,0	1,0 – 1,4	> 1,4	Непросеянный
Гранулометрический состав, %	53,91	12,18	6,37	4,99	21,836	100
Насыпная плотность, г/см ³	0,876	0,833	-	-	0,824	0,85
Удельная поверхность, м ² /г	4,6	3,3	3,0	2,4	1,5	2,8
Адсорбция, мг/г	2,3	1,65	1,5	1,2	0,75	1,41
Зольность, %	82,3	82,1	84,5	86,7	88,1	89,4
Влажность, %	0,71	0,76	0,73	0,65	0,59	0,66
Растворимость в технической воде, %	0,709	0,663	0,688	0,701	0,716	0,734

Результаты

В рамках написания обзорной статьи были проведены исследования карбонатного шлака ХВО Казанской ТЭЦ-1, а именно [43]:

1. Гранулометрического состава с применением лазерного анализатора крупности частиц «Horiba LA-960A2», в соответствии нормативной документации ISO 13320 по протоколу испытаний 199-ТИ-22 от 17.06.2022 (таблица 9):

Таблица 9

Гранулометрический состава шлама водоподготовки КТЭЦ-1

Образец	Размер фракций в мкм, содержание в %											Ср. разм., мкм	Уд. площадь см ² /см ³
	≤1	1-5	5-10	10-40	40-60	60-80	80-100	100-150	150-200	200-300	≥300		
Шлам	н/о	1,48	19,12	65,52	5,04	2,46	1,51	2,10	1,33	1,44	н/о	27,19	4275,6
Шлам + УЗ	н/о	5,39	34,47	54,52	1,87	0,88	0,61	1,00	0,67	0,59	н/о	17,32	5926,2

УЗ – 1 минута ультразвукового воздействия 30 Вт, 40кГц.

н/о – частицы в данной фракции не обнаружены.

2. Элементного состава методом ICP с применением эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Avio 500 по протокол испытаний 199-Х-22 от 28.06.2022 (таблица 10):

Таблица 10

Элементный состава шлама водоподготовки КТЭЦ-1

Определяемый компонент, на абсолютно-сухую навеску, масс. %	масс. %	Нормативная документация
SiO ₂	6,32	НСАМ № 120-Х НСАМ № 487-ХС
MgO	4,25	
CaO	43,88	
Потеря при прокаливании	40,01	НСАМ № 118-Х НСАМ № 120-Х
CO ₂	35,16	НСАМ № 230-Х

3. Рентгенографического анализа для определения фазового состава с применением рентгеновского дифрактометра Rigaku SmartLab по протоколу испытаний 199-Ф-22 от 27.06.2022 (таблица 11):

Таблица 11

Фазовый состав шлама водоподготовки КТЭЦ-1

Фазовый состав	Содержание, % масс.	Нормативная документация
Кальцит	95	И НСОММИ № 29 МС ФГУП «ВИМС» ТПИ 2.29.Ф.1991
Кварц	3	
Барит	1	
Доломит	1	

Учитывая наличие нерастворимых солей кальция и магния, карбонатный шлам нерастворим в воде. Гранулометрический состав и насыпная плотность карбонатного шлама и его параметров, зависит от переменных значений зольности, влаги и применяемой системы водоподготовки на объекте энергетики.

Обсуждение

Перспективы использования отходов химводоподготовки при обработке осадков сточных вод.

Основными направлениями переработки и утилизации осадков сточных вод в мире и в России являются следующие:

- захоронения непосредственно на иловых площадках;
- сушка и биотермическое обеззараживание на иловых площадках;
- реагентные способы обеззараживания;
- анаэробное сбраживание с получением биогаза;
- сжигание;
- термокаталитическое окисление;
- жидкофазное окисление;
- технологии с применением низкотемпературной плазмы;
- пиролиз и др.

Главные недостатки практически всех этих методов – это необходимость применения дорогих реагентов, высокое энергопотребление и образование взрывчатых газов в процессе переработки [44].

Технология складирования осадков на иловых картах не только морально устарела, но и из-за отсутствия в мировой практике универсальных способов утилизации создает ряд социальных, экологических и экономических проблем, что подтверждает необходимость нахождения новых подходов и технологий по обращению с осадками на иловых картах. Все эти готовые технологии обезвоживания, очистки и обеззараживания повлияли на большое количество написаний научных работ и проектов, по комбинированию различных подходов утилизаций осадков и вот некоторые из них:

1. В соответствии с Директивой Совета 86/278/ЕЕС от 12.06.1986 «О защите окружающей среды и в особенности почв при использовании в сельском хозяйстве осадков сточных вод» в странах Европейского союза с 2005 г. иловых осадков сточных вод (ОСВ) были использованы следующим образом: 52 % – в сельском хозяйстве, 38 % – сожжены, 10 % – складированы [45].

2. Китайские специалисты предлагают отказаться от практики сжигания ОСВ в пользу анаэробного брожения с последующим внесением осадка в каменистую почву с высоким содержанием известняка. На ряде объектов имеет место применение реагента с недоказанной эффективностью «ингибитора-стимулятора», призванного обеспечить дезинвазию осадка [38].

3. У австрийских ученых результативным оказался метод анаэробного сбраживания с последующей аэробной стабилизацией ОСВ. Результаты были подтверждены при проведении эксперимента на крупных очистных сооружениях. В результате исследования было показано, что данная технология снижала содержание органического вещества до 16% и при этом распадалось до 98% азотных соединений;

4. В фермерских хозяйствах Евросоюза, Индии, Канады, Австралии действуют установки по сбору биогаза с применением метантенков. Однако, высокую эффективность установок сложно обеспечить из-за неустойчивого процесса брожения осадков;

5. Ряд европейских стран вместо складирования на иловых полях применяют технологию «Geotube», у которой имеется ряд преимуществ по сравнению с «классическим» методом обезвоживания, а именно: ниже себестоимость обезвоживания осадка из-за отсутствия сложных элементов и конструкций; отсутствие попадания атмосферных осадков и оживления кека; возможность оперативного обезвоживания осадка и/или временного складирования в месте его образования.

6. Одним из более реализуемых методов является обработка ОСВ негашеной известью, с добавлением в качестве наполнителя древесные опилки или кору. Негашеная известь (СаО) позволяет поглотить влагу и повысить температуру полученной смеси

При обработке СаО в смеси ОСВ с древесными опилками или корой увеличивает щелочность среды ($pH > 8$), что в свою очередь останавливается процесс кислого брожения, исчезает неприятный запах, гибнут практически все патогенные микроорганизмы, что приводит к снижению показателя КОЕ до нуля. Данный способ обработки осадков сточных вод негашеной известью применяют в Финляндии, Германии, Швеции, США и других странах. В

7. В ряде стран Евросоюза и США минерально-матричные технологии, при которых ОСВ обрабатывают гидролизированными дисперсными алюмосиликатами в виде добавки. В последующем осадок подвергается депонированию на бросовых землях, при рекультивации оврагов, участках, нарушенных при добыче ОПИ и маркшейдерских работ. Такой опыт применялся еще во времена существования СССР.

В зависимости от химического состава, методов обработки и показателей осадки сточных вод могут использоваться в качестве:

- - органических удобрений;
- - органоминеральных удобрений;
- - органо-известковых удобрений;
- - почвогрунтов (растительных грунтов) для биологической рекультивации;
- - рекультивантов (инертного материала) для технической рекультивации;
- - изолирующих материалов на объектах размещения отходов;
- - сырья для производства фосфорных удобрений;
- - сырья для получения биогаза с целью последующего производства тепловой и электрической энергии;
- - сырья для производства цемента.

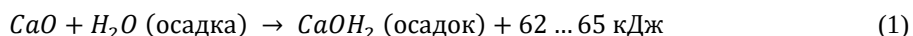
Анализ литературных данных, информации о уже реализованных в России, и за рубежом проектах по обеззараживанию и стабилизации осадков сточных вод показал, что

одним из наиболее экономически целесообразных, технологичных и простых способов снижения их санитарной и экологической опасности является использование в качестве основного реагента негашеную известь (СаО) [46].

Известь издавна использовалась для обработки открытых выгребных ям и мест захоронений домашних животных. До 1970 г. в литературе было очень мало информации о характере действия извести на осадки, обрабатывавшиеся с целью получения стабильного материала. Позднее появилось множество статей, описывающих эффективность применения извести для уменьшения бактерицидного воздействия сточных вод.

В первом сообщении о применении извести при обработке ОСВ очистной станции Аллентон (штат Пенсильвания) указано, что известь кондиционирует сброженный осадок при pH от 10,2 до 11 и после вакуум-фильтрации не имеет запаха и оказывается лишенным патогенных кишечных бактерий [47]. Кампельмахер и Ян [48] опубликовали сходные результаты экспериментов. Эванс [49] отметил, что известь, добавляемая к осадку, обуславливает выделение аммиака, разрушает бактерии колифаги, обеспечиваются удовлетворительные условия стабилизации осадков перед их окончательным удалением, а осадок становится хорошим источником азота и извести для почвы.

Результаты других исследований демонстрируют, что при pH > 10 ОСВ теряют запах, а развитие в них эпидемиологических микроорганизмов (кишечной палочки и энтерококка) подавляется. Однако, создание щелочной среды оказывает существенного влияния и приводит к гибели яиц гельминтов в процессе повышения их температуры. В процессе гашения 1 моля (56 г) окиси кальция, содержащейся в извести, выделяется 62-65 кДж тепла [50]. Процесс гашения протекает по уравнению (1)



При гашении 1 кг СаО выделяется соответственно 1152 кДж тепла, для которого расходуется 320 мл (~0,32 кг) воды. Данный расчет является ориентировочным, т.к. расход извести существенно зависит от влажности и объемов, обрабатываемых ОСВ.

При прохождении реакции происходит образование гидроокиси кальция и выделение тепла. В результате происходит дезинфекция за счет высокотемпературной обработки осадка и частичный переход гидроокисей металлов из коллоидного состояния в нерастворимые оксиды (2).



Таким образом образующийся продукт, исходя из состава входящих в него компонентов, может быть отнесен к органоминеральной добавке для нейтрализации кислых почв.

Таким образом, по данным из таблицы 10 элементный состав шлама водоподготовки КТЭЦ-1 (после потери при прокаливании) в абсолютно-сухой навеске содержит 43,88% оксида кальция (СаО).

Из вышеизложенного следует, что при частичном замещении оксида кальция (СаО) карбонатным шламом ожидается следующие результаты:

1. Экологически безопасная технология обработки осадков сточных вод с применением негашеной извести и карбонатного шлама;
2. Снижение платы за негативное воздействие на окружающую среду в следствии снижения массы размещаемого карбонатного шлама на территории предприятий ТЭК;
3. Снизить затраты на обработку в связи с использованием карбонатного шлама и тем самым, уменьшить количество (массу) используемых компонентов для стабилизации ОСВ без существенного снижения эффективности обработки.

Проанализировав потенциальные методы обработки осадков сточных вод установлено что, учитывая значительные объемы накопленных осадков, предложен способ их рекультивации непосредственно на иловых картах

с использованием негашеной извести и цеолита. Эксперименты показали, что внесение оксида кальция и активированного цеолита в количестве 2,5–5,0 % и 20–30 % массы сырого осадка соответственно останавливает процессы брожения, обеспечивает обеззараживание, обезвоживание и структурирование осадков, способствует иммобилизации тяжелых металлов [7]. В цифровом обозначении максимальные затраты компонентов составят на 1 тонну сырого осадка – 50 кг оксида кальция и 300 кг цеолита.

Заключение

Использование такого типа технологического процесса позволяет снизить количество используемого оксида кальция (CaO) и заместить его оксидом кальция из карбонатного шлама. Использование карбонатного шлама в качестве стабилизатора осадка из-за содержания оксида кальция (CaO) подтверждается лабораторными исследованиями. За счет этих данных обеспечивается утилизация отходов химводоподготовки, достигается меньшее загрязнение объектов окружающей среды.

Факторами, затрудняющими утилизацию, являются физические и химические свойства осадков, наличие условно патогенных и иных опасных живых организмов, что требует поиска экономически и экологически целесообразных технологических решений, обеспечивающих приближению их структуры и свойств к требованиям нормативных документов, определяющих возможность вторичного использования.

Экономическая эффективность данного типа обработки ОСВ складывается из двух основных показателей:

- прибыль за реализации готового продукта (почвогрунта);
- экономия на снижении платы по тарифу за сбор, транспортирование и утилизацию отходов IV класса опасности (ил от коммунальных очистных сооружений).

Литература

1. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Проблемы региональной экологии. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor-nakoplenogo-v-rossiyskoy-federatsii-opyta-vovlecheniya-v-hozyaystvennyy-оборот-zoloshlakovyh-othodov> (дата обращения: 01.08.2022).
2. Заседание Правительства // Правительство Российской Федерации. – URL: <http://government.ru/news/39341/> (дата обращения: 01.08.2022).
3. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года // Минэнерго России. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 01.08.2022).
4. Зверева Э.Р. Утилизация карбонатного шлама систем химводоочистки тепловых электростанций // Вестник КГЭУ. 2011. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-karbonatnogo-shlama-sistem-himvodoochistki-teplovyyh-elektrostantsiy> (дата обращения: 01.08.2022).
5. Каклюгин А.В., Боброва В.В., Валов М.П., Щербакова В.С. Использование шлама химводоочистки теплоэлектростанций в производстве строительных материалов и изделий // Молодой исследователь Дона. 2020. №4 (25). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-shlama-himvodoochistki-teploelektrostantsiy-v-proizvodstve-stroitelnyh-materialov-i-izdeliy> (дата обращения: 01.08.2022).
6. Богданов А.Н., Абдрахманова Л.А., Гордеев А.С. Оценка эффективности карбонатсодержащей добавки в глинистое сырье для создания лицевого керамики // Известия КазГАСУ. 2013. №2 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-karbonatsoderzhashey-dobavki-v-glinistoe-syrie-dlya-sozdaniya-litsevoy-keramiki> (дата обращения: 01.08.2022).
7. Бариева Э.Р., Королев Э.А. Использование шламовых отходов теплоэнергетических предприятий в производстве керамического кирпича // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. №5-6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-shlamovyh-othodov-teploenergeticheskikh-predpriyatiy-v-proizvodstve-keramicheskogo-kirpicha> (дата обращения: 01.08.2022).
8. Медяник Ю. В. Исследование свойств смешанных цементов с наполнителем из шламовых отходов теплоэлектростанций // Известия КазГАСУ. 2015. №2 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svoystv-smeshannyh-tsementov-s-napolnitelem-iz-shlamovyh-othodov-teploelektrostantsiy> (дата обращения: 01.08.2022).
9. Трищенко И. В., Каклюгин А. В., Чижова Я. С. Преимущества производства и применения гипсополистиролбетонных стеновых камней // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. №2 (21). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimushchestva-proizvodstva-i-primeneniya-gipsopolistirolbetonnyh-stenovyh-kamney> (дата обращения: 01.08.2022).
10. Старостина И.В., Ефремов Р.О., Порожнюк Е.В., Старостина Ю.Л., Шайхиев И.Г. Использование кремнеземсодержащих промышленных отходов в технологии

композиционных гипсовых вяжущих // Вестник Казанского технологического университета. 2016. №13. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-kremnezemsoderzhaschih-promyshlennyh-othodov-v-tehnologii-kompozitsionnyh-gipsovyh-vyazhushchih> (дата обращения: 01.08.2022).

11. Макаров Д.В., Мелконян Р.Г., Суворова О.В., Кумарова В.А. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов // ГИАБ. 2016. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-promyshlennyh-othodov-dlya-polucheniya-keramicheskikh-stroitelnyh-materialov> (дата обращения: 01.08.2022).

12. Абдрахманов В.З. Рециклинг отходов топливно-энергетического комплекса в производстве легковесного кирпича на основе глинистых материалов различного минерального состава // Экология промышленного производства. 2020. №1 (109). URL: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=158 &ELEMENT_ID=25117 (дата обращения: 01.08.2022).

13. Медяник Ю.В. Свойства штукатурных растворов с добавкой-наполнителем из шламовых отходов теплоэлектростанций // Известия КазГАСУ. 2016. №4 (38). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-shtukaturnyh-rastvorov-s-dobavkoy-napolnitelem-iz-shlamovyh-othodov-teploelektrostantsiy> (дата обращения: 01.08.2022).

14. Овчинников Р.В. Модифицированные шлаки ТЭС как эффективный компонент смешанных вяжущих // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2013. №2 (171). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modifitsirovannye-shlaki-tes-kak-effektivnyy-komponent-smeshannyh-vyazhushchih> (дата обращения: 08.08.2022).

15. Халиуллин М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р. Бетоны на основе бесклинкерных композиционных гипсовых вяжущих повышенной водостойкости с применением промышленных отходов // Известия КазГАСУ. 2014. №1 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/betony-na-osnove-besklinkernyh-kompozitsionnyh-gipsovyh-vyazhushchih-povyshennoy-vodostoykosti-s-primeneniem-promyshlennyh-othodov> (дата обращения: 01.12.2021).

16. Валеев Р.Ш., Шайхиев И.Г. Способ применения шламовых отходов водоподготовки в строительных материалах с использованием суперпластификатора кМК-ок // Вестник Казанского технологического университета. 2012. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-primeneniya-shlamovyh-othodov-vodopodgotovki-v-stroitelnyh-materialah-s-ispolzovaniem-superplastifikatora-kmk-ok> (дата обращения: 08.08.2022).

17. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В., Хатмуллина З.Ф., Дремичева Е.С. Повышение показателей качества котельного топлива при использовании присадок // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. №1-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-pokazateley-kachestva-kotelnogo-topliva-pri-ispolzovanii-prisadok> (дата обращения: 08.08.2022).

18. Мутугуллина И. А., Зверева Э. Р., Зиннатуллина Р. В., Фатхиева З. Ф. Изучения влияния присадок на эксплуатационные свойства топочных мазутов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. №18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izucheniya-vliyaniya-prisadok-na-ekspluatatsionnye-svoystva-topochnyh-mazutov> (дата обращения: 08.08.2022).

19. Зверева Э.Р., Плотникова В.П., Бурганова Ф.И., Зверев Л.О. Комплексный метод утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций // Вестник КГЭУ. 2019. №2 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-metod-utilizatsii-zoloshlakovyh-othodov-teplovyyh-elektrostantsiy> (дата обращения: 08.08.2022).

20. Науменко А.В., Ковшик И.Г. Влияние известкования на содержание макроэлементов на фоне длительного применения удобрений // Дальневосточный аграрный вестник. 2009. №1 (9). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-izvestkovaniya-na-soderzhanie-makroelementov-na-fone-dlitelnogo-primeneniya-udobreniy> (дата обращения: 08.08.2022).

21. Вялкова Е.И. Исследование природных минералов и отходов производства Тюменской области и Уральского региона с целью очистки воды и грунтов. 05.23.04. Тюмень, 1999. 16 с.

22. Jambhulkar H.P., Shaikh S. M.S., Kumar M.S. Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review // Chemosphere. 2018. Vol. 213. P. 333–344. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.045 83.

23. Basu M., Pande M., Bhadoria P. B. S., Mahapatra S. C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review // Progress in Natural Science. 2009. Vol. 19. P. 1173–1186. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.12.006.

24. Гребенщикова Е.А., Юст Н.А., Пыхтеева М.А. Влияние химической мелиорации путем внесения золошлаковых отходов на физико-химические свойства почвы // Вестник КрасГАУ. 2016. № 6. С. 3–8.

25. Николаева Л. А., Хуснутдинов А. Н. Адсорбционная очистка газовых выбросов от сероводорода гранулированным карбонатным шламом // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2019. № 3 (73). С. 37-47.

26. Хуснутдинова Э.М. Очистка газовых выбросов промышленных предприятий карбонатным шламом // Теплоэнергетика. Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6-ти томах. 2020. С. 51.

27. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В. Снижение выбросов вредных веществ при сжигании мазута на ТЭЦ // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. материалы Международной научно-практической конференции. Альметьевский государственный нефтяной институт. 2018. С. 93-95.

28. Николаева Л.А., Котляр М.Н. Очистка сточных вод гальванических цехов от ионов меди модифицированным карбонатным шламом // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 5. С. 124-132

29. Николаева Л.А., Исхакова Р.Я. Очистка оборотных и сточных вод ТЭС от нефтепродуктов модифицированным шламом водоподготовки // Теплоэнергетика. - 2017. - № 6. - С. 72-78.

30. Николаева Л.А., Айкенова Н.Е. Адсорбционная очистка промышленных сточных вод от фенолов модифицированным карбонатным шламом // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнологии. Сборник докладов Международной научно-технической конференции. 2020. С. 123-126.

31. Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р. Адсорбционная осушка природного газа карбонатным шламом // В сборнике: Актуальные вопросы охраны окружающей среды. Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 34-40.

32. Патент № 2435347 Рос. Федерация, МПК A01B 79/00. Способ рекультивации нарушенных земель / Данич Д.С., Сенатская Е.В. – № 2008140026/05; заявл. 08.10.2008; опубл. 20.04.2010, Бюл. № 34.

33. Патент № 2479721 Рос. Федерация, МПК E 21 C 41/32. Способ рекультивации карьеров с использованием промышленных отходов / Пендюрин Е.А., Старостина И.В., Дрожжин С.П. – № 2011142936/03; заявл. 24.10.2011; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11.

34. Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления «Сведения об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП (отходы) за 2021 год, систематизированные по видам отходов ФККО» URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (дата обращения: 26.08.2022).

35. Порядок проведения собственниками объектов размещения отходов, а также лицами, во владении или в пользовании которых находятся объекты размещения отходов, мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах их воздействия на окружающую среду. [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/573219713> (дата обращения: 26.08.2022).

36. Отчет о результатах мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территории шламоотстойника филиала АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1 за 2018-2021 гг. [Электронный ресурс] URL: <http://www.tatenergo.ru/about/environmental/rezultaty-monitoringa-obektov-razmeshcheniya-otkhodov/>.

37. Николаева Л.А., Бородай Е.Н. // Ресурсосберегающая технология утилизации шлама водоподготовки на ТЭС. Монография. – Казань.: КГЭУ, 2012. 110 с. (дата обращения: 02.12.2021).

38. Исхакова Р.Я. Очистка сточных вод Кармановской ГРЭС с использованием отхода теплоэнергетики // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования. Всероссийская научная конференция. 2019. С. 55-60. URL: https://lib.kgeu.ru/irbis64r_15/scan-new/5098.pdf (дата обращения: 09.09.2022).

39. Николаева Л.А., Голубчиков М.А., Захарова С. В Изучение сорбционных свойств шлама осветлителей при очистке сточных вод ТЭС от нефтепродуктов // Известия вузов.

Проблемы энергетики. 2012. №9-10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-sorbtsionnyh-svoystv-shlama-osvetlitley-pri-ochistke-stochnyh-vod-tes-ot-nefteproduktov> (дата обращения: 07.11.2022).

40. Nikolaeva L.A., Golubchikov M. & Minneyarova, A. R. (2018). Research on the Mechanism and Kinetics of Oil-Product Adsorption from Industrial Wastewater by a Modified Hydrophobic Carbonate Sludge. Chemical and Petroleum Engineering, 53, 806-813 URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Research-on-the-Mechanism-and-Kinetics-of-from-by-a-Nikolaeva-Golubchikov/f8add8827dcd5da3a7cdbbf61e17e5d4b7cbf65b> (дата обращения: 09.09.2022).

41. Коровкин М. О. Исследование возможности использования карбонатного шлама в технологии сухих шпаклевочных смесей / М. О. Коровкин, Н. А. Ерошкина, А. М. Горячев. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2015. № 5 (85). С. 163-165. URL: <https://moluch.ru/archive/85/16021/> (дата обращения: 09.09.2022).

42. Kuzmina T.I. Problems of complex recycling of ash and slag waste // МНИЖ. 2015. №10-1 (41). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problems-of-complex-recycling-of-ash-and-slag-waste> (дата обращения: 09.09.2022).

43. Протокол испытаний 199-ТИ-22 от 17.06.2022, протокол испытаний 199-Х-22 от 28.06.2022, протокол испытаний 199-Ф-22 от 27.06.2022 ЛК «НаноАналитика» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

44. Валиев В. С., Иванов Д. В., Шагидуллин Р. Р. Способы утилизации осадков городских сточных вод (обзор) // Российский журнал прикладной экологии. 2020. №4 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-utilizatsii-osadkov-gorodskih-stochnyh-vod-obzor> (дата обращения: 09.09.2022).

45. Обработка осадка городских сточных вод в крупнейших городах Европы АО "Промэнерго" URL: <https://promenergo.spb.ru/info/obrabotka.php> (дата обращения: 09.09.2022).

46. Валиев В.С., Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р. Анализ мирового опыта утилизации осадка городских сточных вод // Российский журнал прикладной экологии. 2020. №4 (24). [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-mirovogo-opyta-utilizatsii-osadka-gorodskih-stochnyh-vod> (дата обращения: 02.10.2022).

47. Gale R.S. Recent Research on Sludge Dewatering. Filtr.Separ. (September-October), 1971.

48. Corrie K.D. Use of activated carbon in the treatment of heat – treatment plant liquor. Water pollution control (U.K.), 1972.

49. Stack V.T., Jr. Marks. Pressure cooking of activated sludge. Roy F. Weston inc.

50. ИТС 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов» URL:<https://docs.cntd.ru/document/564068889> (дата обращения: 09.12.2021).

51. Шагидуллин Р., Петров А., Иванов Д. Подходы к рекультивации иловых карт биологических очистных сооружений города Казани. Экология и промышленность России. 2021;25(3):18-23. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-3-18-23>.

Авторы публикации

Королев Владислав Игоревич – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», Казанский государственный университет.

References

1. Pichugin EA. Analytical review of the experience accumulated in the Russian Federation of involving ash and slag waste from thermal power plants in economic turnover. *Problems of regional ecology*. 2019. No.4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor-nakoplennoy-v-rossiyskoy-federatsii-opyta-vovlecheniya-v-hozyaystvennyy-oborot-zoloshlakovyh-othodov> (date of appeal: 01.08.2022).

2. Government meeting. *The Government of the Russian Federation*. URL: <http://government.ru/news/39341/> (accessed: 01.08.2022).

3. *On the approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035*. Ministry of Energy of Russia. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (date of reference: 01.08.2022).

4. Zvereva ER. Utilization of carbonate sludge of chemical water treatment systems of thermal power plants. *Vestnik KGEU*. 2011;4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-karbonatnogo-shlama-sistem-himvodoochistki-teplovyyh-elektrostantsiy> (accessed: 01.08.2022).
5. Kaklyugin AV, Bobrova VV, Valov MP, et al. The use of chemical water treatment sludge of thermal power plants in the production of building materials and products. *Young researcher of the Don*. 2020;4(25). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-shlama-himvodoochistki-teploelektrostantsiy-v-proizvodstve-stroitelnykh-materialov-i-izdeliy> (accessed: 01.08.2022).
6. Bogdanov AN, Abdrakhmanova LA, Gordeev AS. Evaluation of the effectiveness of a carbonate-containing additive in clay raw materials for the creation of facial ceramics. *Izvestiya KazGASU*. 2013;2 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-karbonatsoderzhashey-dobavki-v-glinistoe-syrie-dlya-sozdaniya-litsevoy-keramiki> (accessed: 01.08.2022).
7. Barieva ER, Korolev EA. The use of sludge waste from thermal power plants in the production of ceramic bricks. *Izvestiya vuzov. Energy problems*. 2009;5-6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-shlamovykh-othodov-teploenergeticheskikh-predpriyatiy-v-proizvodstve-keramicheskogo-kirpicha> (accessed: 01.08.2022).
8. Medyanik YuV. Investigation of properties of mixed cements with filler from sludge waste of thermal power plant. *Izvestia KazGASU*. 2015. No.2 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svoystv-smeshannykh-tsementov-s-napolnitelem-iz-shlamovykh-othodov-teploelektrostantsiy> (accessed: 01.08.2022).
9. Trishchenko IV, Kaklyugin AV, Chizhova YaS. Advantages of production and application of gypsum polystyrene concrete wall stones. *News of universities. Investment. Construction. Realty*. 2017;2 (21). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimushchestva-proizvodstva-i-primeneniya-gipsopolistirolnykh-stenovykh-kamney> (accessed: 01.08.2022).
10. Starostina IV, Efremov RO, Porozhnyuk EV, et al. The use of silica-containing industrial waste in the technology of composite gypsum binders. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2016. No.13. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-kremnezemsoderzhaschih-promyshlennykh-othodov-v-tehnologii-kompozitsionnykh-gipsovykh-vyazhuschih> (accessed: 01.08.2022).
11. Makarov DV, Melkonyan RG, Suvorova OV., Kumarova V. A. *Prospects of using industrial waste to produce ceramic building materials*. GIAB. 2016. No. 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-promyshlennykh-othodov-dlya-polucheniya-keramicheskikh-stroitelnykh-materialov> (accessed: 01.08.2022).
12. Abdrakhmanov VZ. Recycling of fuel and energy complex waste in the production of lightweight bricks based on clay materials of various mineral composition. *Ecology of industrial production*. 2020;1 (109). URL: http://izdat.ntkompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=158&ELEMENT_ID=25117 (accessed 01.08.2022).
13. Medyanik YuV. Properties of plaster solutions with filler additive from slurry waste of thermal power plants. *Izvestia KazGASU*. 2016;4 (38). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-shtukaturnykh-rastvorov-s-dobavkoy-napolnitelem-iz-shlamovykh-othodov-teploelektrostantsiy> (accessed: 01.08.2022).
14. Ovchinnikov RV. Modified slags of thermal power plants as an effective component of mixed binders. *Izvestiya vuzov. The North Caucasus region*. Series: Technical Sciences. 2013;2 (171). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modifitsirovannye-shlaki-tes-kak-effektivnyy-komponent-smeshannykh-vyazhuschih> (accessed: 08.08.2022).
15. Khaliullin MI, Rakhimov RZ, Gayfullin AR. Concretes based on linkerless composite gypsum binders of increased water resistance with the use of industrial waste. *Izvestiya KazGASU*. 2014;1 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/betony-na-osnove-besklinsknykh-kompozitsionnykh-gipsovykh-vyazhuschih-povyshennoy-vodostoykosti-s-primeneniem-promyshlennykh-othodov> (accessed: 01.12.2021).
16. Valeev RSh, Shaikhiev IG. Method of application of sludge waste of water treatment in building materials using superplasticizer kmk-ok. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012;12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-primeneniya-shlamovykh-othodov-vodopodgotovki-v-stroitelnykh-materialakh-s-ispolzovaniem-superplastifikatora-kmk-ok> (accessed: 08.08.2022).
17. Zvereva ER, Zueva OS, Khabibullina RV, et al. Improving the quality of boiler fuel when using additives. *Izvestiya vuzov. Energy problems*. 2016. No.1-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-pokazateley-kachestva-kotelnogo-topliva-pri-ispolzovanii-prisadok> (accessed: 08.08.2022).
18. Mutugullina IA, Zvereva ER, Zinnatullina RV, et al. Studies of the effect of additives on the operational properties of heating oil. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012.

- No.18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izucheniya-vliyaniya-prisadok-na-ekspluatatsionnye-svoystva-topochnyh-mazutov> (accessed: 08.08.2022).
19. Zvereva ER, Plotnikova VP, Burganova FI, Zverev LO. Complex method of utilization of ash and slag waste of thermal power plants. *Vestnik KSEU*. 2019. No.2 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-metod-utilizatsii-zoloshlakovyh-othodov-teplovyyh-elektrostantsiy> (accessed: 08.08.2022).
20. Naumenko AV, Kovshik IG. The effect of liming on the content of macronutrients against the background of long-term use of fertilizers. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2009;1 (9). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-izvestkovaniya-na-soderzhanie-makroelementov-na-fone-dlitelnogo-primeneniya-udobreniy> (date of reference: 08.08.2022).
21. Vyalkova EI. *Research of natural minerals and waste products of the Tyumen region and the Ural region for the purpose of water and soil purification: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences*: 05.23.04. Tyumen, 1999. 16 p.
22. Jambhulkar HP, Shaikh SMS, Kumar MS. Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review. *Chemosphere*. 2018;213:333–344. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.045 83.
23. Basu M., Pande M., Bhadoria P. B. S., Mahapatra S. C. *Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review*. Progress in Natural Science. 2009;19:1173–1186. doi: 10.1016/j.pnsc.2008.12.006.
24. Grebenshchikova EA, Yust NA, Pykhteeva MA. The effect of chemical reclamation by introducing ash and slag waste on the physico-chemical properties of the soil. *Bulletin of KrasGAU*. 2016;6. :3-8.
25. Nikolaeva LA, Khusnutdinov AN. Adsorption purification of gas emissions from hydrogen sulfide by granular carbonate sludge. *Issues of modern science and practice*. V.I. Vernadsky University. 2019;3 (73):37-47.
26. Khusnutdinova EM. Purification of gas emissions of industrial enterprises with carbonate sludge. *Thermal power engineering*. The fifteenth All-Russian (seventh international) scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists: conference materials. In 6 volumes. 2020. p. 51.
27. Zinurov VE, Dmitriev AV. Reduction of emissions of harmful substances during the combustion of fuel oil at the CHP. *Achievements, problems and prospects of development of the oil and gas industry*. materials of the International Scientific and Practical Conference. Almet'yevsk State Oil Institute. 2018. pp. 93-95.
28. Nikolaeva LA, Kotlyar MN. Wastewater treatment of galvanic workshops from copper ions with modified carbonate sludge. *Water management of Russia: problems, technologies, management*. 2019;5:124-132
29. Nikolaeva LA, Iskhakova RYa. Purification of circulating and waste waters of thermal power plants from petroleum products with modified sludge of water treatment. *Thermal power engineering*. 2017;6:72-78.
30. Nikolaeva LA, Aikenova NE. Adsorption treatment of industrial wastewater from phenols with modified carbonate sludge. *Rational use of natural resources and processing of technogenic raw materials: fundamental problems of science, materials science, chemistry and biotechnology*. Collection of reports of the International Scientific and Technical Conference. 2020. pp. 123-126.
31. Nikolaeva LA, Zainullina ER. *Adsorption drying of natural gas with carbonate sludge*. In the collection: Topical issues of environmental protection. Collection of reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference. 2018. pp. 34-40.
32. Patent No. 2435347 Grew. Federation, IPC A01B 79/00. Method of recultivation of disturbed lands / Danich DS, Senatskaya EV. No. 2008140026/05; application 08.10.2008; publ. 20.04.2010, Bul. No. 34.
33. Patent No. 2479721 Grew. Federation, IPC E 21 With 41/32. *Method of recultivation of quarries using industrial waste* / Pendyurin E.A., Starostina I.V., Drozhzhin S.P. – No. 2011142936/03; application 24.10.2011; publ. 20.04.2013, Bul. No. 11.
34. *Information on the formation, processing, disposal, neutralization, disposal of production and consumption waste «Information on the formation, processing, disposal, neutralization, disposal of production and consumption waste in the form of 2-TP (waste) for 2021, systematized by types of waste FCKO»* URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (accessed: 08/26/2022).
35. *The procedure for the owners of waste disposal facilities, as well as persons in possession or use of which the waste disposal facilities are located, monitoring the state and pollution of the environment on the territories of waste disposal facilities and within their impact on the environment*. [Electronic resource] URL: <https://docs.cntd.ru/document/573219713> (accessed: 08/26/2022).

36. *Report on the results of monitoring the state and pollution of the environment on the territory of the sludge sump of the branch of JSC Tatenergo Kazanskaya CHPP-1 for 2018-2021.* [Electronic resource] URL: <http://www.tatenergo.ru/about/environmental/rezultaty-monitoringa-obektov-razmeshcheniya-otkhodov/>.
37. Nikolaeva LA, Borodai EN. *Resource-saving technology of water treatment sludge utilization at thermal power plants.* Monograph. Kazan.: KSEU, 2012. 110 p. (accessed: 02.12.2021).
38. Iskhakova RYa. Wastewater treatment of Karmanovskaya GRES using waste heat power engineering. *Safety, protection and protection of the environment: fundamental and applied research. All-Russian Scientific Conference.* 2019. pp. 55-60. URL: https://lib.kgeu.ru/irbis64r_15/scan-new/5098.pdf (date of application: 09.09.2022).
39. Nikolaeva LA, Golubchikov MA, Zakharova SV. The study of sorption properties of clarifier sludge during wastewater treatment of thermal power plants from petroleum products. *Izvestiya vuzov. Energy problems.* 2012. No.9-10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-sorbtsionnyh-svoystv-shlama-osvetlителей-pri-ochistke-stochnyh-vod-tes-ot-nefteproduktov> (accessed: 07.11.2022).
40. Nikolaeva LA, Golubchikov M, & Minneyarova AR. (2018). *Research on the Mechanism and Kinetics of Oil-Product Adsorption from Industrial Wastewater by a Modified Hydrophobic Carbonate Sludge.* Chemical and Petroleum Engineering, 53, 806-813 URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Research-on-the-Mechanism-and-Kinetics-of-from-by-a-Nikolaeva-Golubchikov/f8add8827dcd5da3a7cddb61e17e5d4b7cbf65b> (accessed: 09.09.2022).
41. Korovkin M O, Eroshkina NA, Goryachev AM. Investigation of the possibility of using carbonate sludge in the technology of dry putty mixtures. Text : direct. *Young scientist.* 2015;5 (85):163-165. URL: <https://moluch.ru/archive/85/16021/> (accessed: 09.09.2022).
42. Kuzmina TI. *Problems of complex recycling of ash and slag waste.* MNIZH. 2015. No.10-1 (41). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problems-of-complex-recycling-of-ash-and-slag-waste> (accessed: 09.09.2022).
43. Test report 199-TI-22 dated 06/17/2022, test report 199-X-22 dated 06/28/2022, test report 199-F-22 dated 06/27/2022 LC «NanoAnalytics» FGBOU VO «KNITU».
44. Valiev VS, Ivanov DV, Shagidullin RR. Methods of utilization of municipal sewage sludge (review). *Russian Journal of Applied Ecology.* 2020;4 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-utilizatsii-osadkov-gorodskih-stochnyh-vod-obzor> (accessed: 09.09.2022).
45. *Treatment of municipal sewage sludge in the largest cities of Europe of JSC «Promenergo»* URL: <https://promenergo.spb.ru/info/obrabotka.php> (date of reference: 09.09.2022).
46. Valiev VS, Ivanov DV, Shagidullin RR. Analysis of the world experience of urban wastewater sludge utilization. *Russian Journal of Applied Ecology.* 2020;4(24). [Electronic resource] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-mirovogo-opyta-utilizatsii-osadka-gorodskih-stochnyh-vod> (accessed: 02.10.2022).
47. Gale RS. Recent Research on Sludge Dewatering. *Filtr.Separ.* (September-October), 1971.
48. Corrie KD. *Use of activated carbon in the treatment of heat – treatment plant liquor.* Water pollution control (U.K.), 1972.
49. Stack VT., Jr. Marks. *Pressure cooking of activated sludge.* Roy F. Weston inc.
50. ITS 10-2019 *Wastewater treatment using centralized wastewater disposal systems of settlements, urban districts* URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068889> (accessed: 09.12.2021).
51. Shagidullin R, Petrov A, Ivanov D. Approaches to the recultivation of *sludge maps of biological treatment facilities of the city of Kazan.* Ecology and industry of Russia. 2021;25(3):18-23. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-3-18-23>.

Authors of the publication

Vladislav I. Korolev – Kazan State Power Engineering University.

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University.

Получено

21.11.2022г.

Отредактировано

28.11.2022г.

Принято

29.11.2022г.



АКСИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА И СКОРОСТИ ЗВУКА В ТРУБЕ С ЗАКРУЧЕННЫМ ПЛАМЕНЕМ

Малахов А.О., Ларионов В.М., Константинов Н.В.

Казанский федеральный (Приволжский) университет, г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0341-915X>; AlOMalahov@kpfu.ru

Резюме: Ранее было проведено экспериментальное и теоретическое исследование пульсационного горения в трубе с тангенциальной подачей смеси пропан-бутанового топлива с воздухом. Было обнаружено, что результаты расчета частот колебаний газа значительно расходятся с экспериментальными данными. Одной из причин является гипотетический характер аксиального распределения скорости звука в камере сгорания. В данной работе это распределение находится на основании расчетно-экспериментальных данных о температуре газа. **ЦЕЛЬ.** Определение аксиального распределения скорости звука в трубе с тангенциальной подачей смеси пропан-бутанового топлива с воздухом на основании результатов расчета температуры газа на входе трубы и результатов измерений температуры газа на выходе трубы. **МЕТОДЫ.** Использовалось известное соотношение, связывающее скорость звука с температурой газа. Средняя по сечению температура газа на входе трубы находилась по известной полуэмпирической формуле. Вычисляя соответствующую скорость звука, определяем первый коэффициент линейного распределения скорости звука вдоль трубы. Скорость звука на выходе трубы вычислялась после усреднения значения температуры газа, измеренных термопарой вблизи стенки трубы и на её оси. Разница скоростей звука на концах трубы, отнесенная к её длине – это градиент скорости звука, т.е. второй коэффициент искомого распределения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В работе описаны теоретическое и экспериментальное исследование пульсационного горения в трубе с тангенциальной подачей смеси пропан-бутанового топлива с воздухом. Получены зависимости коэффициентов распределения скорости звука от коэффициента избытка воздуха смеси пропан-бутанового топлива с воздухом и амплитуды колебаний давления на входе рассматриваемой экспериментальной камеры сгорания. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработана расчетно-экспериментальная методика определения аксиального распределения скорости звука в трубе при горении в закрученном потоке. Для рассмотренной экспериментальной установки показано, что максимальное значение модуля градиента скорости звука соответствует коэффициенту избытка смеси пропан-бутанового топлива с воздухом, равному единице. Для всех значений коэффициента избытка воздуха градиент скорости звука в режиме пульсационного горения в 1,52 раза больше, чем при горении без колебаний газа. Полученные результаты будут использованы для расчета условий возбуждения и частоты колебаний газа в рассматриваемой экспериментальной камере сгорания.

Ключевые слова: труба; закрученное пламя; колебания газа; температура газа; градиент скорости звука.

Для цитирования: Малахов А.О., Ларионов В.М., Константинов Н.В. Аксиальное распределение температуры газа и скорости звука в трубе с закрученным пламенем. 2022. Т.24. № 6. С. 63-71. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-63-71.

AXIAL DISTRIBUTION OF GAS TEMPERATURE AND SOUND SPEED IN A PIPE WITH A SWIRLED FLAME

AO. Malahov, VM. Larionov, NV. Konstantinov

Kazan Federal University

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0341-915X>; AlOMalahov@kpfu.ru

Abstract: Earlier, an experimental and theoretical study of pulsating combustion in a pipe with a tangential supply of a mixture of propane-butane fuel with air was carried out. It was found that the results of calculating the frequencies of gas oscillations differ significantly from the

experimental data. One of the reasons is the hypothetical nature of the axial distribution of the speed of sound in the combustion chamber. In this work, this distribution is found on the basis of calculated and experimental data on the gas temperature at the ends of the pipe.

Keywords: pipe; swirling flame; gas oscillations; gas temperature; sound-speed gradient.

For citation: Malahov AO, Larionov VM, Konstantinov NV. Axial distribution of gas temperature and sound speed in a pipe with a swirled flame. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):63-71. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-63-71.

Введение

Известно, что в камерах сгорания газотурбинных установок (ГТУ) процесс горения может стать неустойчивым [1]. Возникающие при этом интенсивные колебания газа нарушают стабильность работы установки и должны быть устранены. Поэтому были разработаны методы автоматического контроля устойчивости процесса горения [2, 3]. Однако, эти методы оказались малоэффективными из-за недостатка экспериментальных данных и несовершенства математических моделей процесса возбуждения колебаний газа в камерах сгорания с закрученным пламенем [4]. В настоящее время ведутся исследования влияния акустических колебаний газа на скорость тепловыделения закрученного пламени [4, 5]. Методом возмущений проведен теоретический анализ самовозбуждения колебаний газа в канале с сосредоточенной [6] и распределенной [7] зоной горения. В этих работах изменение средней температуры газа и скорости звука вдоль канала не учитывалась. Однако, в современных ГТУ помимо естественного охлаждения продуктов сгорания вследствие теплопередачи к стенкам камеры сгорания используется охлаждение в результате ввода в поток воды или воздуха с целью снижения выхода окислов азота в атмосферу. В результате появляется аксиальное распределение средней температуры газа. В работе [8] было получено уравнение частот колебаний газа при горении в трубе при условии, что скорость звука в направлении от входа к выходу убывает по линейному закону. Это уравнение было использовано для трубы с тангенциальной подачей смеси пропан-бутанового топлива с воздухом [9, 10]. Была получена полуэмпирическая формула, определяющая скорость звука на входе трубы в зависимости от коэффициента избытка воздуха смеси α . Градиент скорости звука был представлен в виде двух слагаемых, где первое слагаемое градиент скорости звука в отсутствие колебаний. Из-за недостатка экспериментальных данных предполагалось, что охлаждение газа до температуры окружающей среды для всех значений α , от зоны горения до выхода камеры сгорания, происходило за такое же расстояние, как и при стехиометрическом горении $\alpha=1$. Второе слагаемое характеризует влияние амплитуды колебаний газа, обусловленное тем, что колебания газа ускоряют теплопередачу от газа к стенкам трубы. Предполагалось, что второе слагаемое прямо пропорционально амплитуде колебаний давления на входе трубы. Были проведены расчеты, которые показали, что за исключением значений, близких к $\alpha=1$, результаты вычислений частот колебаний не согласуются с экспериментальными данными. Одной из причин такого расхождения может быть то, что предположения, сделанные для определения градиента скорости звука, не соответствуют реальному процессу теплопередачи стенкам камеры сгорания. Цель данной работы – определение аксиального распределения скорости звука в трубе с тангенциальной подачей смеси пропан-бутанового топлива с воздухом на основании измерения температуры газа на концах трубы в отсутствие колебаний газа и в режиме пульсационного горения.

Приоритетным направлением использования технологий колебаний потока газа является энергетическая промышленность. Первая область применения относится к загрязнению теплообменного оборудования, что приводит к серьезным экономическим убыткам. Практическим решением является реализация пульсационного метода очистки. Анализ механики соударения частиц о поверхности теплообменников показал, что пульсационный поток способствует уменьшению пластичных отложений [12]. Второй не менее важной областью применения технологии является утилизация тяжело горючих энергоносителей. Так для слоевого сжигания твердого топлива, в частности твердых техногенных отходов, перспективными считаются коаксиальные системы, позволяющие обеспечить поступление вторичного воздуха в зону горения [13].

Научная новизна работы заключается в ряде полученных результатов и использованных методов. Впервые для исследования пульсационного горения в вихревых камерах сгорания применён «энергетический» метод [14, 15], показана его эффективность

для определения условий возбуждения колебаний газа. Используемая методика расчёта частот автоколебаний газа учитывает влияние амплитуд колебаний давления в камере сгорания на продольные градиенты скорости звука, а также вводит поправочный коэффициент для расчёта средней по сечению камеры сгорания температуры в зоне горения, что ранее при расчёте частот не учитывалось. Результаты данной работы могут быть использованы в разработке универсальной математической модели процессов вихревого горения, а также возникающих в процессе энергетических колебаний потока.

Материалы и методы

Экспериментальная часть исследования проводилась на стенде (рис. 1), который ранее был использован в работах [9, 10]. Камера сгорания – цилиндрическая труба, открытая на входе. На входе имеются четыре патрубка для тангенциальной подачи смеси пропан-бутанового топлива с воздухом, которые равномерно распределены по периметру трубы. Однако, из-за наличия системы подачи в виде патрубков и трубопроводов подвода топливовоздушной смеси, камера проявляет свойства четвертьволнового резонатора. В камере сгорания используется предварительно подготовленная топливовоздушная смесь: пропан-бутан поступает из баллона, смешивается с воздухом из компрессора и распределяется по патрубкам. Расходы топлива и воздуха контролировались цифровым (Mass Flow, рис. 2) и аналоговым ротаметрами (рис. 1 (22)). Температура газа измерялась вольфрам-рениевой термопарой ВР-5/20 (толщина проволоки 0,5 мм), подключенной к цифровому прибору Ф266 (рис. 2). Измерение амплитуды колебаний газа производилось акустическим зондом, связанным с звуковой платой компьютера. Согласно цели работы необходимо определить распределение скорости звука вдоль трубы в линейном приближении. Следовательно, достаточно найти значения температуры газа на входе и выходе трубы, а также учесть, что скорость звука прямо пропорциональна квадратному корню из температуры. Средняя по сечению температура газа на входе трубы находилась по известной полуэмпирической формуле [11]. Вычислялась после усреднения значения температуры газа, измеренных термопарой вблизи стенки трубы и на её оси. Разница скоростей звука на концах трубы, отнесенная к её длине – это градиент скорости звука, т.е. второй коэффициент искомого распределения. Для оценки температур помещения, поступающей на вход камеры сгорания газозвуковой смеси и температуры потока газа (продуктов реакции) на выходе из камеры сгорания был использован блок термопар ТХА (хромель-алюмелевые) с подключаемым мультиметром Richmeters 102 (рис. 2).

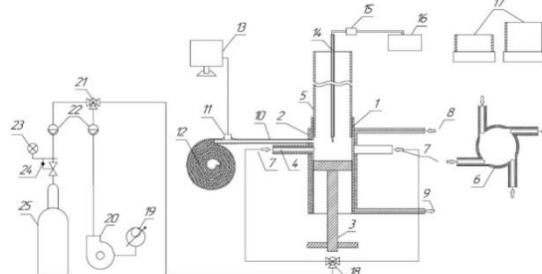


Рис. 1. Схема экспериментального стенда 1 – входная камера, 2 – охлаждающий контур, 3 – винтовой поршень, 4 – патрубок подачи топливовоздушной смеси, 5 – цилиндрическая труба-резонатор, 6 – схема расположения патрубков, 7 – трубопроводы подвода смеси к патрубкам, 8, 9 – вход и выход охлаждающей воды, 10 – акустический зонд, щуп, 11 – микрофон, 12 – спиралевидная звукопоглощающая трубка, 13 – компьютер, 14 – термопара ВР 5/20, 15 – компенсатор холодного спая, 16 – цифровой прибор Ф266, 17 – дополнительные секции трубы-резонатора, 18 – распределитель смеси по трубкам, 19 – лабораторный автотрансформатор, 20 – воздушный компрессор, 21 – смеситель топлива с воздухом, 22 – ротаметры, 23 – автоматический регулирующий клапан, 24 – газовый редуктор, 25 – баллон с сжиженным топливом (пропан-бутан)

Fig. 1. Scheme of the experimental stand
1 – inlet chamber, 2 – cooling circuit, 3 – screw piston, 4 – air-fuel mixture supply pipe, 5 – cylindrical resonator pipe, 6 – piping layout, 7 – pipelines for supplying the mixture to the nozzles, 8, 9 – cooling water inlet and outlet, 10 – acoustic probe, probe, 11 – microphone, 12 – spiral sound-absorbing tube, 13 – computer, 14 – thermocouple VR 5/20, 15 – cold junction compensator, 16 – digital device F266, 17 – additional sections for resonator tube, 18 – pipe mix distributor, 19 – laboratory autotransformer, 20 – air compressor, 21 – air fuel mixer, 22 – rotameters, 23 – automatic control valve, 24 – gas reducer, 25 – liquefied fuel tank (propane-butane)



Рис. 2. Измерительные приборы (слева направо): газовый расходомер Mass Flow, мультиметр Richmeters 102, цифровой прибор Ф266

Fig. 2. Measuring instruments (from left to right): Mass Flow gas flow meter, Richmeters 102 multimeter, F266 digital instrument

Результаты

В данной работе было использовано линейное приближение для распределения скорости звука:

$$c(x) = a - bx, 0 \leq x \leq l_c, \quad (1)$$

где l_c - длина трубы.

На входе в трубу, полагая $x = 0$, имеем $c(0) = a$, на выходе из трубы при $x = l_c$ получим $c(l_c) = c_l$. Тогда модуль градиента скорости звука равен:

$$b = (a - c_l)/l_0 \quad (2)$$

Скорость звука $c(0)$ зависит от средней температуры газа в входном сечении камеры сгорания. Горение смеси происходит в кольце, расположенном вблизи стенки трубы (рис. 3). В этой области температура газа равна температуре горения, которую для смеси пропан-бутанового топлива можно вычислить по известным [12] формулам:

$$T'_c = T_1 + \frac{10^3 \alpha}{0,084 + 0,452\alpha}, \alpha \leq 1; \quad (3)$$

$$T'_c = T_1 + \frac{10^3}{0,084 + 0,452\alpha}, \alpha > 1. \quad (4)$$

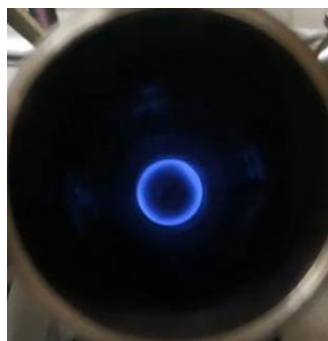


Рис. 3. Закрученное пламя в трубе (вид сверху)

Fig. 3. Swirling flame in a pipe (top view)

Температура газа в центре входного сечения находилась экспериментально с помощью ВР 5/20 термопары. Вычисления и измерения, выполненные для горения смеси с коэффициентом избытка воздуха 0,8; 1,0; 1,2 показали, что среднеарифметическое значение температур газа у стенки и на оси трубы можно находить по формуле:

$$T_c = \theta_c T'_c, \quad (5)$$

В которой эмпирическая константа θ_c равна 0,75.

Тогда из соотношений (1) – (5) получим:

$$a = a(\alpha) = c_1 \sqrt{\frac{T_c(\alpha)}{T_1}} \quad (6)$$

В таблице 1 приведены результаты вычислений, выполненных с использованием выражений (1) – (6). Было принято, что при температуре газа $T_1 = 293K$, скорость звука c_1 равна 343 м/с.

Таблица 1

Определение скорости звука на входе в трубу

α	0,84	0,9	0,93	1,0	1,04	1,08	1,12	1,17	1,22
T'_c, K	2105	2127	2137	2157	2098	2041	1962	1925	1862
T_c, K	1576	1593	1600	1615	1571	1528	1484	1441	1394
$a, м/с$	795	800	802	806	794	783	772	761	748

Входящая в формулу (6) скорость звука c_1 определялась на основании измерений температуры газа на входе трубы. Использовались данные для трубы-камеры сгорания данной $l_c = 0,45 м$ с двухтрубковой подачей смеси с расходом воздуха 25,8 л/мин. Так же, как для входного сечения находилось среднеарифметическое значение температур газа у стенки и на оси трубы. Измерения проводились для двух режимов горения – пульсационного и установившегося (без колебаний газа). Ясно, что температура газа на выходе из трубы постоянной длины, при постоянном расходе воздуха будет зависеть от температуры газа на входе в трубу, а следовательно, от коэффициента избытка воздуха. Средние значения температуры газа на выходе трубы в отсутствие колебаний газа $T_{l,0}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Определение градиента скорости звука при горении без колебаний

α	0.84	0.9	0.93	1.0	1.04	1.08	1.12	1.17	1.22
T_b, K	718	708	671	645	683	664	683	669	648
$c_{l,0}, м/с$	537	533	519	509	524	516	524	518	510
$b_\alpha, с^{-1}$	575	592	628	659	601	593	552	538	529

Полагая $x = l_c$, получим выражение, определяющее скорость звука на выходе камеры сгорания:

$$c_{l,0} = a(\alpha) - b_\alpha l_c.$$

Эту скорость звука можно вычислить по формуле:

$$c_{l,0} = c_1 \sqrt{T_{l,c}(\alpha)/T_1} \quad (7)$$

Тогда соотношение, определяющее модуль градиента скорости звука в трубе при горении без колебаний газа, имеет вид:

$$b_\alpha = b_\alpha(\alpha) = (a(\alpha) - c_{l,0}(\alpha))/l_c \quad (8)$$

Результаты вычислений согласно выражениям (7), (5) даны в таблице 2. Аппроксимация полученных данных показала, что модуль градиента скорости звука можно представить в виде двух функций:

$$b_\alpha = 134 + 525\alpha, \text{ если } \alpha \leq 1, \quad (9)$$

$$b_\alpha = 4972 - 7367,6 \cdot \alpha + 3054,5 \cdot \alpha^2, \text{ если } \alpha > 1. \quad (10)$$

Результаты аппроксимации (рис. 4) говорят о том, что при $\alpha = 1$ модуль градиента скорости звука в отсутствии колебаний имеет максимум.

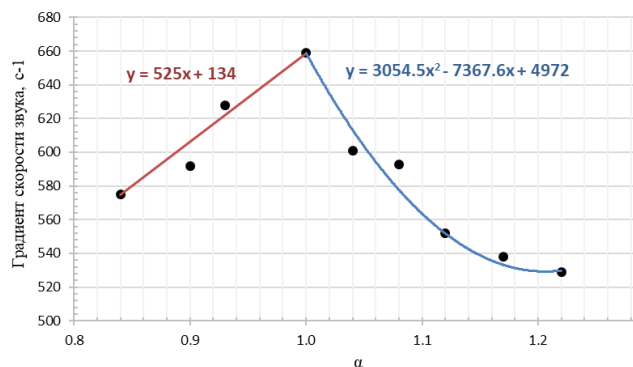


Рис. 4. Зависимость модуля градиента скорости звука в отсутствие колебаний от коэффициента избытка воздуха

Fig. 4. Dependence of the sound velocity gradient module in the absence of oscillations on the coefficient of excess air

В таблице 3 приведены результаты измерений температуры газа T_l на выходе трубы в режиме пульсационного горения. Сравнение с данными таблицы 2 показывает, что для одинаковых значений α температура газа T_l значительно меньше температуры $T_{l,0}$. Это ожидаемый результат, т.к. колебаний газа ускоряют теплопередачу от газа к стенке трубы, что приводит к значительному уменьшению температуры газа на выходе камеры сгорания.

Скорость звука на выходе находилась по формуле, аналогичной (7):

$$c_l = c_1 \sqrt{T_l(\alpha)/T_1}$$

Модуль градиента скорости звука вычисляется по формуле, аналогичной (8):

$$b_\alpha = (a(\alpha) - c_l(\alpha)) / l_c$$

Значения этих двух величин даны в таблице 3, где также приведены соответствующие экспериментальные данные по частоте и амплитуде колебаний газа p_c на входе в камеру сгорания. Интервал изменения частоты колебаний – небольшой, поэтому ее влияние на распределение скорости звука не рассматривалось. Чтобы описать влияние амплитуды колебаний газа на модуль градиента скорости звука, представим его в следующем виде:

$$b = b(\alpha, p_c) = \beta_p(p_c) \cdot b_\alpha(\alpha) \quad (11)$$

где функция усиления β_p показывает во сколько раз колебаний газа с амплитудой p_c увеличивают абсолютное значение модуля градиента скорости звука по сравнению с его величиной в отсутствии колебаний. Значения функции усиления с учетом выражения (11) рассчитываются по формуле:

$$\beta_p = b(\alpha, p_c) / b_\alpha(\alpha) \quad (12)$$

Таблица 3

Определение градиента скорости звука при наличии колебаний

α	0.84	0.9	0.93	1.0	1.04	1.08	1.12	1.17	1.22
T_l , К	378	370	360	350	368	366	355	369	375
c_l , м/с	390	385	380	375	384	383	378	385	388
b , с ⁻¹	902	920	934	958	911	888	876	834	800
P_c , Па	51	90	240	1563	142	113	51	38	31
β_p	1.57	1.55	1.49	1.45	1.51	1.50	1.59	1.55	1.51
f , Гц	275	268	264	257	264	269	272	274	273

Усредняя результаты вычислений, получим, что в режиме пульсационного горения с амплитудой колебаний давления выше 31 Па модуль градиента скорости звука в 1,52 раза больше по сравнению с режимом горения без колебаний газа.

Эксперимент показал, что переход от устойчивого к пульсационному горению происходит в узком интервале изменения коэффициента избытка воздуха $\Delta\alpha \approx 0,02$. В этом интервале амплитуда колебаний газа нестабильна, поэтому в таблице 3 отсутствуют данные для $p_c < 31$ Па. Было решено использовать простейшую линейную аппроксимацию, соответствующую условиям: $\beta_p = 1$, если $p_c = 0$; $\beta_p = 1,52$, если $p_c = 31$ Па. Этим условиям соответствует функция:

$$\beta_p = 1 + 0,017 p_c \quad (13)$$

В результате, с учетом выражений (11) - (13) градиент скорости звука в режиме пульсационного горения определяется следующим образом:

$$b = (1 + 0,017 p_c) b_\alpha, \text{ если } 0 \leq p_c \leq 31 \text{ Па,}$$

$$b = 1,52 b_\alpha, \text{ если } p_c \geq 31 \text{ Па,}$$

где b_α находится из ранее полученных выражений (9), (10).

Заключение

Разработана расчетно-экспериментальная методика определения аксиального распределения скорости звука в трубе при горении в закрученном потоке. Для рассмотренной экспериментальной установки показано, что максимальное значение модуля градиента скорости звука соответствует коэффициенту избытка смеси пропан-бутанового топлива с воздухом, равному единице. Для всех значений коэффициента избытка воздуха модуль градиента скорости звука в режиме пульсационного горения в 1,52 раза больше, чем при горении без колебаний газа. Полученные результаты будут использованы для расчета условий возбуждения и частоты колебаний газа в рассматриваемой экспериментальной камере сгорания.

Литература

1. T. Lieuwen, B.T. Zinn, Theoretical investigation of combustion instability mechanisms in lean, premixed gas turbines, AIAA Paper (1998) 98-0641.
2. A.S. Morgans, S.R. Stow, Model-based control of combustion instabilities in annular combustors, Combustion and Flame 150 (2007) 380-399.
3. D. Durox, J.P. Moeck, J.F. Bourgoignie, T. et al. Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control, Combust. Flame 160 (2013) 1729-1742.
4. Wu G. et al. Characterizing nonlinear interaction between a premixed swirling flame and acoustics: Heat-driven acoustic mode switching and triggering // Energy. – 2018. – Т. 158. – С. 546-554.
5. A.M. Steinberg, I. Boxx, M. Störh, et al. Flow-flame interactions causing acoustically coupled heat release fluctuations in a thermo-acoustically unstable gas turbine model combustor, Combust. Flame 157 (2010) 2250-2266.
6. Bloom F., Terlyga O., Patterson T. Perturbation analysis of self-sustained oscillations in a pulse combustion model // Nonlinear Analysis: Real World Applications. – 2010. – Т. 11. – №. 4. – С. 2314-2334.
7. S. Kato T., Fujimori A.P. Dowling, et al. Effects of heat release distribution on combustion oscillation, Proceedings of the combustion institute 30 (2005) 1799-1806.
8. Iovleva O.V., Larionov V.M., Semenova E.V. Frequencies of gas oscillations in a pipe with a concentrated heat source // Journal of Physics: Conference Series 669 (2016) 012023 doi:10.1088/1742-6596/669/1/012023.
9. Malakhov A. O. et al. Analysis of the effect of combustion chamber length on the gas oscillations characteristics // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1923. – №. 1. – С. 012023.
10. Malakhov A. O. et al. Acoustic oscillations of the gas with axial distribution of average temperature in the vortex combustion chamber // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. Т. 1923. – №. 1. – С. 012022.
11. Malakhov A. O. et al. Pulsating combustion of propane-butane fuel mixture with air in a vortex combustion chamber // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. Т. 1588. №. 1. С. 012026.
12. Хайбуллина А. И., Зиннатуллин Н. Х., Ильин В. К. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2021. – Т. 23. – №. 1. – С. 59-67.
13. Семенова Е. В. и др. Частоты колебаний газа при горении твердого топлива в коаксиальных трубах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2017. – Т. 19. – №. 1-2. – С. 164-169.
14. Ларионов В. М., Заринов Р. Г. Автоколебания газа в установках с горением // Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2003.
15. Семенова Е. В., Ларионов В. М., Ваньков Ю. В. Термодинамический и акустический анализ пульсационного горения твердого топлива в устройстве типа резонатора Гельмгольца // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2018. – Т. 20. – №. 5-6. – С. 141-147.

Авторы публикации

Малахов Алексей Олегович – младший научный сотрудник НИЛ «Реологические и термохимические исследования», ФГАОУ ВО КФУ.

Ларионов Виктор Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Техническая физика и энергетика», ФГАОУ ВО КФУ.

Константинов Никита Вячеславович – аспирант кафедры «Техническая физика и энергетика», ФГАОУ ВО КФУ.

References

1. T. Lieuwen, B.T. Zinn. *Theoretical investigation of combustion instability mechanisms in lean, premixed gas turbines*. AIAA Paper (1998):98-0641.
2. A.S. Morgans, S.R. Stow. *Model-based control of combustion instabilities in annular combustors*. *Combustion and Flame* 150 (2007):380-399.
3. D. Durox, J.P. Moeck, J.F. Bourguin, et al. *Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control*, *Combust. Flame* 160 (2013):1729-1742.
4. Wu G. et al. Characterizing nonlinear interaction between a premixed swirling flame and acoustics: Heat-driven acoustic mode switching and triggering. *Energy*. 2018;158:546-554.
5. A.M. Steinberg, I. Boxx, M. Störh, et al. *Carter, Flow-flame interactions causing acoustically coupled heat release fluctuations in a thermo-acoustically unstable gas turbine model combustor*, *Combust. Flame* 157 (2010):2250-2266.
6. Bloom F, Terlyga O, Patterson T. Perturbation analysis of self-sustained oscillations in a pulse combustion model. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. 2010;11(4):2314-2334.
7. S. Kato, T. Fujimori, A.P. Dowling, et al. *Effects of heat release distribution on combustion oscillation*. *Proceedings of the combustion institute* 30 (2005):1799-1806.
8. Semenova EV, Larionov VM, Semenova EV. Frequencies of gas oscillations in a pipe with a concentrated heat source. *Journal of Physics: Conference Series* 669 (2016) 012023 doi:10.1088/1742-6596/669/1/012023.
9. Malakhov A. O. et al. Analysis of the effect of combustion chamber length on the gas oscillations characteristics. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021;1923(1):012023.
10. Malakhov AO. et al. Acoustic oscillations of the gas with axial distribution of average temperature in the vortex combustion chamber. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021;1923(1):012022.
11. Malahov AO. et al. Pulsating combustion of propane-butane fuel mixture with air in a vortex combustion chamber. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020;1588(1):012026.
12. Hajbullina AI, Zinnatullin NH, Il'in VK. Povyshenie effektivnosti raboty teploobmennogo oborudovaniya ispol'zovaniem pul'sacionnyh metodov ochistki. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2021;23(1):59-67.
13. Semenova EV, et al. CHastoty kolebaniy gaza pri gorenii tverdogo topliva v koaksial'nyh trubah. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2017;19(1-2):164-169.
14. Larionov VM, Zaripov RG. *Avtokolebaniya gaza v ustanovkah s goreniiem*. Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tekhnich. un-ta, 2003. 237 p.
15. Semenova EV, Larionov VM, Van'kov YUV. Termodinamicheskij i akusticheskij analiz pul'sacionnogo goreniya tverdogo topliva v ustrojstve tipa rezonatora Gel'mgol'ca. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2018;20(5-6):141-147.

Authors of the publication

Aleksey O. Malakhov – Kazan Federal University, Russia.

Victor M. Larionov – Kazan Federal University, Russia.

© Малахов А.О., Ларионов В.М., Константинов Н.В.

Nikita V. Konstantinov – Kazan Federal University, Russia.

Получено

18.10.2022г.

Отредактировано

25.11.2022г.

Принято

01.12.2022г.



МЕТОДЫ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТВЕРДООКСИДНОМ ТОПЛИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: 0000-0001-8520-5432, vlasovaay@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Определение эффективных методов улавливания и утилизации углекислого газа, поиск перспективных решений и апробирование методов улавливания двуокиси углерода на лабораторной установке. Наиболее популярны абсорбционные методы улавливания CO₂, где газ реагирует с жидким абсорбентом. МЕТОДЫ. Лабораторная установка включает сам источник CO₂ (газовый баллон), компрессор, абсорбер и колбу с раствором гидроксида натрия для анализа эффективности поглощения. Эффективность оценивается титриметрическим способом, где в качестве титранта используют раствор соляной кислоты, в качестве индикаторов выступает фенолфталеин и метиловый оранжевый. РЕЗУЛЬТАТЫ. Для анализа были выбраны доступные абсорбенты, которые есть на большинстве тепловых электрических станциях. В результате лабораторного эксперимента было обнаружено, что наибольшей сорбционной способностью обладает раствор гидроксида натрия 6%. На основе полученных данных разработана технологическая установка по улавливанию и утилизации двуокиси углерода. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Декарбонизация промышленного энергетического сектора является сложным процессом, который требует глобальных перемен в топливной политике, а именно переход на безуглеродные энергетические ресурсы. Альтернативным энергетическим ресурсом является водородная энергетика, но даже тут присутствуют выбросы двуокиси углерода. Улавливание и утилизация помогут декарбонизировать основные источники загрязнения. Промышленное улавливание двуокиси углерода обладает большим потенциалом, который кроется в разнообразии использования сорбционных материалов.

Ключевые слова: углекислый газ; твердооксидный топливный элемент; тепловые электрические станции.

Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки «Изучение процессов и гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина» шифр проекта FZSW-2022-0001

Для цитирования: Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф. Методы декарбонизации процесса получения электроэнергии в твердооксидном топливном элементе / 2022. Т.24. № 6. С. 72-82. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-72-82.

GENERATING ELECTRICITY IN A SOLID OXIDE FUEL CELL DECARBONIZATION METHODS

AA. Filimonova, AY. Vlasova, RF. Kamaliev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: 0000-0001-8520-5432, vlasovaay@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Determination of effective methods of carbon dioxide capture and utilization, search for promising solutions and testing of carbon dioxide capture methods at a laboratory facility. The most popular absorption methods of CO₂ capture, in which the gas reacts with a liquid absorbent. METHODS The laboratory setup includes the CO₂ source itself (gas cylinder), an absorber, and a flask with sodium hydroxide solution to analyze absorption efficiency. Efficiency is evaluated by the titrimetric method, where a solution of hydrochloric acid is used as a titrant, phenolphthalein and methyl orange act as indicators. RESULTS. For

the analysis, available absorbents were selected, which are available at most thermal power plants. As a result of a laboratory experiment, it was found that a quicklime suspension of 6% has the highest sorption capacity. **CONCLUSION.** The decarbonization of the industrial energy sector is a complex process that requires global changes in fuel policy, namely the transition to carbon-free energy resources. An alternative energy resource is hydrogen energy, but even here carbon dioxide emissions are present. Capture and disposal will help decarbonize the main sources of pollution. Industrial carbon dioxide capture has great potential, which lies in the variety of uses of sorption materials.

Keywords: carbon dioxide; solid oxide fuel cell; thermal power plants.

Results obtained with the financial support of the Ministry of Education «Study of processes and hybrid power plant fuel cell - gas turbine» cipher project FZSW-2022-0001

For citation: Filimonova AA, Vlasova AY, Kamaliev RF. Generating electricity in a solid oxide fuel cell decarbonization methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):72-82. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-72-82.

Введение

Быстрый экономический рост стал толчком к резкому увеличению спроса на различные энергетические ресурсы. Следствием этого послужило увеличение добычи и использования традиционных видов топлива (природный газ, продукты нефтепереработки, каменный уголь). Однако, широкое использование ископаемых видов топлива неблагоприятно воздействует на окружающую среду.

На сегодняшний день мы наблюдаем, как все больше промышленно развитых стран стремятся к полному запрещению вредных газовых выбросов. В смеси газовых выбросов преобладают окиси углерода, серы, азота, большая часть приходится на содержание углекислого газа. Поэтому современное общество стремится к снижению выбросов во всех направлениях развития. Объем выбросов углекислого газа распределяется следующим образом (рисунок 1) [1-2].



Рис. 1. Выбросы углекислого газа по секторам

Fig. 1. Carbon dioxide emissions by sector

Экологические проблемы, связанные с выбросами парниковых газов, а вследствие и с резким повышением температуры, стали проблемами мирового масштаба. Доля парниковых газов значительно возросла со времен промышленной революции, а глобальная концентрация углекислого газа выросла на 37%. Исследования показали, что повышенный уровень парниковых газов в атмосфере вызывает глобальное потепление, а без внедрения политики снижения парниковых газов их выбросы к 2030 году могут увеличиться до 25 – 90% по сравнению с 2000 годом [1].

Углекислый газ, метан, закись азота и фторированные газы являются парниковыми газами, среди которых углекислый газ составляет значительную долю по отношению к его количеству, присутствующему в атмосфере. Согласно прогнозу Межправительственной группы экспертов по изменению климата, к 2100 году в атмосфере может содержаться до 570 частей на миллион CO_2 , что приводит к повышению средней глобальной температуры примерно на 2°C . Поэтому сокращение выбросов парниковых газов является постоянно растущей проблемой для производственных подразделений и тепловых электрических станций, работающих на

органическом топливе. Решение данной проблемы ориентировано на применение альтернативных технологий декарбонизации. Декарбонизация производственных процессов приведет к фундаментальным изменениям, которые потребуют специальных индивидуальных решений.

На сегодняшний день, многие страны применяют различные подходы по сокращению выбросов углекислого газа в атмосферу, включающие в себя использование низкоуглеродистого топлива (ядерное топливо, водород и др.), использование возобновляемых видов энергии (энергия ветра, солнечная энергия, геотермальная энергия, низкопотенциальное тепло и др.), повышение энергоэффективности, внедрение геоинженерных подходов и подходов по энергосбережению, а также технологии по улавливанию и дальнейшей утилизации углекислого газа [2].

Тематика данной работы актуальна, так как большинство промышленных комплексов работает на органическом виде топлива и как следствие есть большие масштабы выброса углекислого газа в атмосферу.

Литературный обзор

В России политика декарбонизации представляет собой переход на водородную энергетику. Использование водородных топливных элементов признано лидирующим направлением в достижении политики декарбонизации и повышении эффективности энергетического производства. С помощью твердооксидного топливного элемента можно получать как электрическую так и тепловую энергию, однако, при работе такого топливного элемента, все равно происходит выделение углекислого газа, которую необходимо улавливать и утилизировать (рисунок 2).

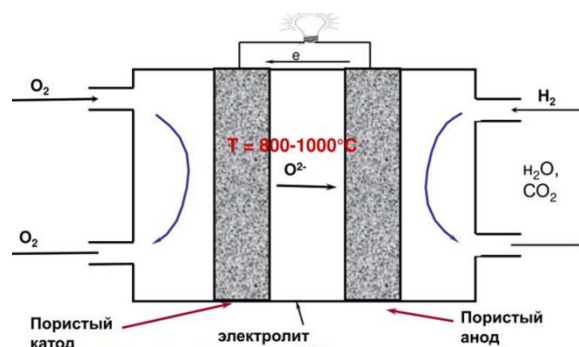


Рис 2. Твердооксидный топливный элемент

Fig. 2. Solid Fuel Cell

Работа твердооксидного элемента базируется на реакции между водородсодержащим топливом и кислородом, при высокой температуре происходит реакция, продуктами которой является углекислый газ и пары воды. Данную смесь необходимо уловить.

Улавливание углекислого газа из дымовых газов тепловых электрических станций и нефтехимических технологических потоков было признано одной из важнейших стратегий, необходимых для снижения выбросов парниковых газов в атмосферу. Чтобы поддерживать парниковые газы на приемлемом уровне, требуется значительное сокращение выбросов углекислого газа за счет его разделения и дальнейшей утилизации. В странах зарубежья существуют региональные кластеры, которые представляют собой сообщества промышленные предприятия прямо или косвенно связанных между собой. Деятельность кластеров нацелена на извлечении всеобщей выгоды от выработки качественной продукции по более низкой цене за счет использования общих ресурсов. Подобная политика распространяется и на другие отрасли, такие как: технологические потоки, транспортная инфраструктура, профессиональный опыт. Кластер предназначен для объединения нескольких промышленных предприятий и электростанций общей инфраструктурой улавливания, транспортировки и утилизации углекислого газа. [2]

Первым этапом в политике декарбонизации является технология улавливания CO_2 . Углекислый газ может быть уловлен несколькими способами:

- выделение CO_2 в химическом технологическом процессе, когда весь газовый поток направляется в общую сеть;
- при наличии в газовой смеси достаточного количества кислорода, согласно стехиометрическим коэффициентам, сгорание газа является возможным способом при

организации процесса с отводом тепла от внешнего источника. В качестве источников внешнего тепла выделяют бойлеры, теплоэлектростанции, промышленные печи для обжига и цементные заводы. При смежных отраслях промышленности возможно более рациональное использование;

- использование современных технологий по улавливанию, которые базируются на использовании жидких, твердых или иных форм поглощающих материалов, которые могут селективно сорбировать углекислый газ.

На сегодняшний день применение специальных материалов для улавливания углекислого газа является рациональным и быстрым решением в данной проблеме. Данный метод практически не имеет ограничений и носит масштабный характер. Также этот метод может быть использован дополнительно на линии доочистки газа. такая линия может совместно использоваться различными источниками промышленных выбросов. Пути улавливания CO₂ представлены на рисунке 3. [2]



Рис. 3. Технологии улавливания CO₂.

Fig. 3. CO₂ capture technologies

Авторы Лемпорт П.С. и Бобрикова А.А. делают акцент на улавливание углекислого газа абсорбционным способом. Их изобретение основывается на контакте газа с абсорбентом, который представляет собой смесь соли щелочного металла либо гидроксид щелочного металла, полиамин, алконоламин. Среди алканололаминов чаще всего используется моноэтаноламин (МЭА), диэтаноламин (ДЭА), триэтаноламин (ТЭА), метилдиэтаноламин (МДЭА). Из большого многообразия видов полиаминов основное внимание авторов завоевал пиперазин. Пиперазин имеет большое число производных, которые обладают различными свойствами и отличной эффективностью. Среди производных выделили следующие виды: N-(2-гидроксиэтил) пиперазин, N,N'-бис-(2-гидроксиэтил)-пиперазин, N-(2-аминоэтил)пиперазин и другие соединения данного класса, а также некоторые производные этилен-1,2-диамина. Данные реагенты могут быть применимы для улучшения поташной очистки газовых потоков. [3,4, 11]

В патенте 2244586 представлен способ улавливания углекислого газа за счет адсорбции, где в качестве адсорбента используется оксид алюминия с нанесением из карбоната калия. [5]

В патенте 2252063 описан способ стадийной очистки с применением различных аминов. Так на первой стадии применяется первичный амин, как наиболее эффективный, на второй стадии очистки (доочистки) применяется комбинированный состав из вторичных и третичных аминов. [6]

В зарубежных странах улавливание углекислого газа осуществляется с применением водных смесей алканололаминов, с добавлением солей щелочных металлов. Данный метод хорошо описан в следующих патентах: US 4971718, US 4336233 [7-11.]

Помимо абсорбционных методов существуют адсорбционные способы улавливания. Так авторами Кустовым Л.М. и Гусейновым Ф.И. был предложен адсорбент на основе мезопористой металлоорганической каркасной структуры, выбранной из структур IRMOF3, MOF177, HKUST1 (MOF199), ZIF8, MIL100, MOF200, MOF210, MIL101 или MIL53. Для эффективного использования, основу необходимо подготовить, для этого использовали раствор соли цинка. После обработки водным раствором производят нагревание в атмосфере инертным газом. В результате образуется оксид цинка, который используется в качестве модифицирующей добавки [11-13].

Авторы Елисеев А.А. и Петухов Д.И. предложили мембранный метод разделения

газовой смеси. Устройство мембранного контактора представляет собой Мембранный модуль, подключенный входами и выходами к линиям подачи и сброса газовой и жидкой фаз, содержащий один или несколько размещенных в горизонтальной плоскости и соединенных параллельно контакторных элементов. Мембрана используется нанопористая. Среди зарубежных разработок тоже есть аналоговые, которые изложены в патенте US 5753009. Данный патент опирается на разделение газовых смесей с применением контактора. Контактёр представляет собой мембранное устройство, где в качестве мембран используются полые волокна с двухслойным мембранным материалом. Мембрана состоит из пористого и непористого слоя. Непористый слой предназначен для селективной очистки и является селективно-проницаемым для отделяемого газа [8].

Выделение углекислого газа в различных технологических процессах сопровождается отличными объемами выделяющегося газа. Поэтому создание единой системы транспортировки CO_2 приведет к преодолению технических и экономических барьеров, связанных с созданием транспортной инфраструктуры и использования реальной экономии за счет роста производства [2].

После улавливания и концентрирования углекислого газа возможно либо утилизировать, либо захоронить на длительный срок. Для осуществления подземного хранения необходимо специально разработанное пространство, но данный способ зарекомендовал себя как безрисковое техническое решение. Углекислый газ возможно использовать в качестве сырья для химической промышленности или в качестве жидкости для повышения нефтеотдачи пласта. Перспективным направлением по утилизации CO_2 является превращение в ценные химические продукты и материалы. Например, превращение CO_2 под действием катализатора в продукты с высокой добавленной стоимостью. Но каждый процесс является весьма дорогостоящим с технической стороны. На сегодняшний день возможны к реализации в промышленном масштабе получение мочевины, салициловой кислоты, этиленкарбоната и метанола (рисунок 4).[2]

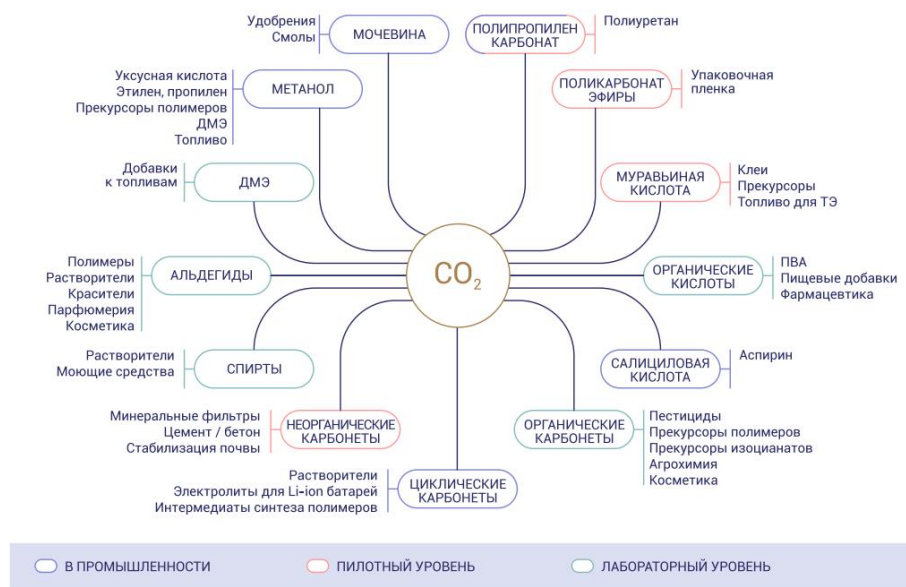


Рис. 4. Возможное получение продукции из CO_2

Fig. 4. Possible CO_2 products

Основываясь на литературных данных и на представленных способах улавливания углекислого газа необходимо апробирование их в лабораторных условиях и определение эффективности использования данных способов. Актуальность данной работы состоит в том, что после проведения лабораторных экспериментов были определены сорбирующие вещества, обладающие наибольшей эффективностью. На основании данных экспериментов была предложена технологическая установка с возможностью регенерации абсорбента и многократное его использование на установке.

Материалы и методы

Абсорбционные методы улавливания CO_2 весьма распространены на промышленных предприятиях. Поэтому провели ряд экспериментов в лабораторных

условиях на поглощение углекислого газа абсорбентами. Для проведения эксперимента была собрана лабораторная установка (рисунок 5).

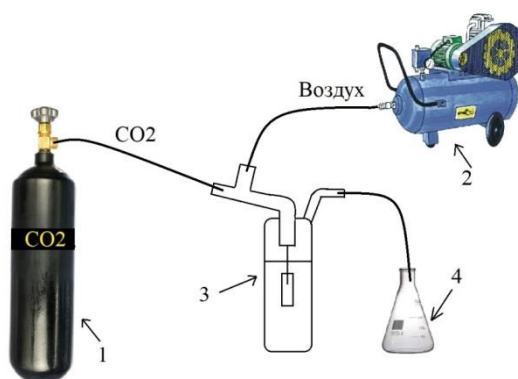


Рис.5 Лабораторная установка с использованием абсорбера
1- газовый баллон с CO₂, 2-компрессор, 3-абсорбер, 4- коническая колба с щелочным раствором.

Fig. 5 Laboratory installation with absorber
1-CO₂ gas cylinder, 2-compressor, 3-absorber, 4- cone with alkaline solution.

В качестве источника углекислого газа использовали баллон CO₂ 1 с редуктором. На редукторе установили расход газа 0,1 л/мин. Подачу углекислого газа осуществляли совместно с подачей воздуха в соотношении 1:3 соответственно (расход воздуха 0,3 л/мин). Воздух подавали с помощью воздушного компрессора 2.

Смесь газов подается в абсорбер 3 через трубку, на конце трубки установлен воздушный камень для разбивания пузырьков газа на более мелкие. Контакт газовой фазы и абсорбента при такой разбивке максимальный. Продувка газовой смесью осуществляется в течение 4 мин. Из абсорбера, после поглощения, газ переходит в колбу 4 с щелочным раствором гидроксида натрия. Концентрация раствора гидроксида натрия составляет 0,01 Н. Реальное изображение установки изображено на рисунке 6.



Рис. 6. Реальная лабораторная установка с использованием абсорбера

Fig. 6. Actual laboratory installation using absorber

Выбор именно такой методики определения основывается на том, что оставшаяся углекислого газа после абсорбера реагирует с раствором гидроксида натрия 0,01 Н, при этом углекислый газ переходит в гидрокарбонаты. Дальнейшее определение гидрокарбонатов определяли с помощью титрования.

Титрование проводили согласно ГОСТ 31957-2012 «Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов».[12] Данная методика позволяет определить общую щелочность и массовые концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. В качестве титранта используют раствор HCl 0,1 Н. Титрование проводили с применением индикаторов фенолфталеин и метиловый оранжевый.

Экспериментальные исследования

Цель экспериментальной части заключалась в определении «рабочих» раствором абсорбентов, которые эффективно улавливают углекислый газ. В качестве абсорбентов были использованы: проточная вода (холостая проба), раствор гидроксида

натрия 10%, раствор водного аммиака 10%, хеламин 1%, раствор гидроксида кальция, суспензия гидроксида кальция 6%, раствор карбоната натрия 25%, суспензия негашеной извести 6%, раствор хлорида кальция 6%, раствор шлама предварительной очистки ВПУ 6%. Выбор данных абсорбентов обоснован их доступностью и небольшой стоимостью. Так как метод улавливания углекислого газа актуален для энергетических предприятий, то все имеющиеся реактивы есть в наличии на станциях и используются в других блоках.

Хеламин – это реагент на основе аминов и полиаминов, чаще всего используется для корректировки водно-химического режима котлов. Состав хеламина незначительно меняется и возможно наличие поликарбоксилатов, а также наличие летучих аминов таких как аммиак.

Шлам предварительной очистки ВПУ – это природная устойчивая смесь элементов, содержание которых зависит от химического состава поступающей на водоподготовительные установки сырой воды. Более 80% шлама составляет карбонат кальция, оставшиеся 20% делят между собой сульфаты, гидроксиды силикаты. Шлам обладает довольно высокой механической прочностью, о чем свидетельствуют однородный гранулометрический состав измельченного образца. Шлам является инертным материалом и имеет 5 класс опасности.[4, 13-17] Шлам возможно использовать для очистки дымовых газов от двуокиси углерода. Существует определенная технология подготовки шлама, а именно приготовление гранулированного шлама со связыванием с жидким натриевым стеклом в объемном соотношении 2:1 соответственно.[16-20]

Результаты лабораторных экспериментов приведены в таблице 1

Таблица 1

Результаты лабораторного эксперимента по абсорбции двуокиси углерода

Сорбент	Тем-ра, °C	В воде присутствуют ионы	Щелочность, мг экв/л		
			гидратная	карбонатная	бикарбонатная
Вода	25	HCO_3^-	-	-	95
Раствор NaOH 10%	25	$\text{OH}^-, \text{CO}_3^{2-}$	75	-	-
Раствор аммиака 10%	25	$\text{OH}^-, \text{CO}_3^{2-}$	159	-	-
Хеламин 1%	25	$\text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-$	-	36	52
Раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$	25	HCO_3^-	-	-	96
Раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 6%	25	HCO_3^-	-	-	85
Раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 6%	95	$\text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-$	-	50	38
Раствор Na_2CO_3 25%	25	HCO_3^-	-	-	84
Раствор Na_2CO_3 25%	95	HCO_3^-	-	-	78
Раствор CaO 6%	25	$\text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-$	-	76	9
Раствор CaO 6%	95	$\text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-$	-	56	35
Раствор CaCl_2 6%	25	$\text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-$	-	22	74
Шлам предочистки 6%	25	HCO_3^-	-	-	92

По результатам экспериментов видно, что лучшие результаты по улавливанию углекислого газа проявили растворы гидроксида натрия 6% и негашеной извести 6%.

Для определения погрешности экспериментов в качестве контрольного образца был использован аттестованный раствор. Анализ погрешности проводился на основе сравнения результатов отдельно взятой контрольной процедуры с нормативом контроля. Абсолютная погрешность составляет $P=0,95$.

Технологическая установка по улавливанию и утилизации двуокиси углерода

На основе полученных экспериментальных лабораторных исследований была разработана технологическая схема по улавливанию и утилизации углекислого газа.

(рисунок 7).

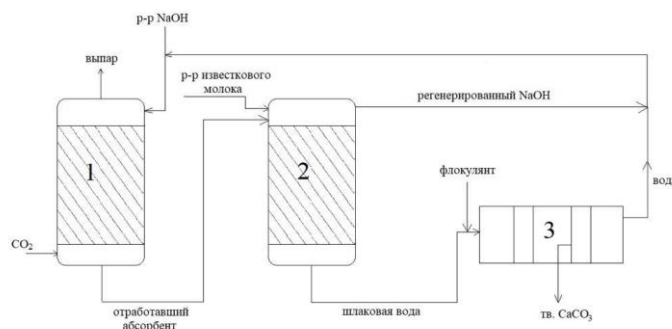


Рис. 7. Технологическая установка по улавливанию и утилизации углекислого газа.

Fig. 7. Carbon capture and recovery technology.

1- absorber, 2- contact container, 3- filter press.

1- абсорбер, 2- контактная емкость, 3- фильтр пресс.

Углекислый газ поступает в абсорбер 1, где взаимодействует с раствором гидроксида натрия 6%, который поступает через распределительное устройство сверху аппарата. Распределительное устройство необходимо для разбивания на мелкие капли, при таком разбрызгивании контакт между газовой и жидкой фазой протекает более полно. Отработавший абсорбент для регенерации поступает в контактную емкость 2, где происходит смешивание с раствором известкового молока. В результате реакции образуется твердая фаза в виде карбоната кальция, который выпадает и удаляется с нижней части аппарата в виде шламовой воды. В шламовую воду перед фильтром-прессом 3 дозируется флокулянт на основе полиакриламида для улучшения отделения твердой фазы от водной среды и сокращения времени обезвоживания шлама. Регенерированный раствор гидроксида натрия после контактной емкости 2 смешивается с оставшейся водой после обезвоживания шлама и поступает заново в абсорбер 1. Таким образом, цикл получается замкнутый. Такая технология позволяет улавливать и утилизировать углекислого газа. Оставшийся обезвоженный шлам может использоваться в строительной сфере.

Выводы

Развитие водородной энергетики играет важную роль в отказе от использования углеводородных видов топлива. Поэтому рациональное использование водородного топлива масштабная задача для всего общества. На сегодняшний день разработанные технологии с использованием твердооксидного топливного элемента имеют выбросы углекислого газа. Поэтому CO_2 необходимо улавливать и утилизировать. Наиболее перспективны в улавливании газа сорбционные установки. Чаще всего предпочтение отдается абсорбционным методам, где улавливание производится с применением жидкого абсорбента. Существует абсорбенты, которые могут быть эффективны в улавливании углекислого газа, но есть ряд ограничений по санкциям и ценовой политики. Поэтому были рассмотрены и апробированы доступные абсорбенты, которые есть почти на каждой тепловой электрической станции.

Экспериментальная часть заключалась в сборе установки для осуществления процесса абсорбции и определения эффективности выбранных абсорбентов. По экспериментальным результатам выявили, что наибольшей эффективностью обладает раствор гидроксида натрия и негашеной извести 6%. Определение эффективности улавливания проводилось по методике титрования.

На основе полученных данных была разработана технологическая схема улавливания и утилизации углекислого газа, где газ абсорбируется раствором гидроксида натрия. Отработавший абсорбент регенерируется раствором известкового молока и заново возвращается в цикл. В результате реакции регенерации образуется твердый отход в виде шлама, который обезвоживается на фильтре-пресс и дальше утилизируется.

Данная технология позволяет улавливать и утилизировать углекислого газа согласно направлению политики декарбонизации энергетики.

Литература

1. Kelemen Peter, Benson Sally M., Pilorgé Hélène, Psarras Peter, Wilcox Jennifer. An

Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations, *Frontiers in Climate Vol 1* (2019) DOI:10.3389/fclim.2019.00009.

2. Gonzalez-Diaz A., Jiang L., Roskilly AP., Smallbone A. J. The potential of decarbonising rice and wheat by incorporating carbon capture, utilisation and storage into fertiliser production. Issue 3, *Green Chemistry*, The Royal Society of Chemistry (2020) <http://dx.doi.org/10.1039/C9GC03746B>.

3. Praveen Bains, Peter Psarras, Jennifer Wilcox, CO₂ capture from the industry sector, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 63, 2017, Pages 146-172, ISSN 0360-1285, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.07.001>.

4. Лемпорт П.С., Бобрикова А.А., Дахнави Э.М. Способ очистки газовых потоков от диоксида углерода, патент № 2589166, 2014.

5. Шаронов В.Е., Окунев А.Г., Губарь А.В., Поглотитель диоксида углерода и способ удаления диоксида углерода из газовых смесей, патент № 2244586.

6. Бадал Г.П., Бадалян Г.П., Гридин И.Д. Способ очистки газовых смесей от диоксида углерода (варианты) и устройство для очистки газовых смесей от диоксида углерода (варианты), патент №2252063, 2004.

7. John G. McCullough, Joseph A. Faucher, Daniel J. Kubek, Alkanolamine gas treating composition and process, US4971718A.

8. Max Appl, Ulrich Wagner, Hans J. Henrici, Removal of CO₂ and/or H₂S and/or CO_s from gases containing these constituents, US4336233A.

9. Елисеев А.А., Петухов Д.И., Поярков А.А. Мембранный контактор для очистки природных и технологических газов от кислых компонентов, патент № 2672452, 2018.

10. Патент JP5753009B2, Imaging device, wireless system, 2011.

11. Кустов Л.М., Гусейнов Ф.И., Исаева В.И., Адсорбент для улавливания, концентрирования и хранения диоксида углерода, патент № 2576634, 2014.

12. ГОСТ 31957-2012, Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов.

13. Николаева Л.А., Хуснутдинов А.Н., Очистка газовых выбросов в химической технологии и энергетике карбонатным шламом // Казанский государственный энергетический университет, 2021, С.104.

14. Балабеков, О. С. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты // Москва: Химия, 1991. С. 256.

15. Николаева Л.А., Хуснутдинова Э.М., Комбинированный адсорбер для очистки газовых выбросов от диоксида серы, патент № 206221, 2021.

16. Хуснутдинов А. Н. Очистка газовых выбросов предприятий химической промышленности карбонатным шламом //XXI Аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный «Дню энергетика» : материалы докладов. Казань : КГЭУ, 2017, С. 102.

17. Николаева Л.А. Адсорбционная очистка промышленных сточных вод модифицированным карбонатным шламом: специальность 03.02.08 Экология (по отраслям) : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук //Казанский государственный энергетический университет. – Казань, 2016. С. 267.

18 Акбалина З.Ф, Минигазимов Н.С., Белан Л.Н. Состояние проблемы обращения с промышленными отходами на предприятиях Республики Башкортостан // Уральский экологический вестник, 2015, № 1, С. 41–44.

19. Сучков, В. П. Способ утилизации шлама химводоподготовки ТЭЦ и отхода аккумуляторной кислоты // Известия высших учебных заведений. Строительство, 2008, № 9 (597), С. 30–32.

20. Романовский В.И., Федоренчик А. А., Гуринович А. Д., Проблемы утилизации отходов водоподготовки и очистки сточных вод в Беларуси // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2011. № 2 (68). С. 66–69.

Авторы публикации

Филимонова Антонина Андреевна – д-р. техн. наук, доцент кафедры «Химия и водородная энергетика», Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Власова Алена Юрьевна – кан. тех. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» (АТЭС), Казанский государственный энергетический

университет (КГЭУ).

Камалиева Рузина Фарсировна – студентка, бакалавриат 3 курс, кафедра «Атомные и тепловые электрические станции» Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

References

1. Kelemen Peter, Benson Sally M., Pilorgé Hélène, Psarras Peter, Wilcox Jennifer. An Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations, *Frontiers in Climate* Vol 1 (2019) doi:10.3389/fclim.2019.00009.
2. Gonzalez-Diaz A, Jiang L, Roskilly AP, et al. *The potential of decarbonising rice and wheat by incorporating carbon capture, utilisation and storage into fertiliser production*. Issue 3, Green Chemistry, The Royal Society of Chemistry (2020) <http://dx.doi.org/10.1039/C9GC03746B>.
3. Praveen Bains, Peter Psarras, Jennifer Wilcox, CO₂ capture from the industry sector, *Progress in Energy and Combustion Science*. 2017;63:146-172, ISSN 0360-1285, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.07.001>.
4. Lempert PS, Bobrikova AA, Dakhnavi EM. *Method for cleaning gas streams from carbon dioxide*. Patent No. 2589166, 2014.
5. Sharonov VE, Okunev AG, Gubar AV. *Carbon dioxide absorber and method for removing carbon dioxide from gas mixtures*. Patent No. 2244586.
6. Badal GP, Badalyan GP, Gridin ID. *A method for cleaning gas mixtures from carbon dioxide (variants) and a device for cleaning gas mixtures from carbon dioxide (variants)*. Patent No. 2252063, 2004.
7. John G. McCullough Joseph A. Faucher Daniel J. Kubek. *Alkanolamine gas treating composition and process*, US4971718A.
8. Max Appl Ulrich Wagner Hans J. Henrici, *Removal of CO₂ and/or H₂S and/or COS from gases containing these constituents*, US4336233A.
9. Eliseev AA, Petukhov DI, Poyarkov AA, *Membrane contactor for purification of natural and technological gases from acidic components*. Patent No. 2672452, 2018.
10. Patent JP5753009B2, *Imaging device, wireless system*, 2011.
11. Kustov LM, Huseynov FI, Isaeva VI. *Adsorbent for trapping, concentration and storage of carbon dioxide*. Patent No. 2576634, 2014.
12. GOST 31957-2012, *Methods for determining the alkalinity and mass concentration of carbonates and hydrocarbonates*.
13. Nikolaeva LA, Khusnutdinov AN. Purification of gas emissions in chemical technology and power engineering with carbonate sludge. *Kazan State Power Engineering University*, 2021, p.104.
14. Balabekov OS. Purification of gases in the chemical industry. *Processes and apparatuses*. Moscow: Khimiya, 1991. p. 256.
15. Nikolaeva LA, Khusnutdinova EM. *Combined adsorber for cleaning gas emissions from sulfur dioxide*. Patent No. 206221, 2021.
16. Khusnutdinov AN. *Purification of gas emissions of chemical industry enterprises with carbonate sludge*. XXI Postgraduate-master's scientific seminar dedicated to the Day of the power engineer : materials of reports. Kazan : KSEU, 2017, p. 102.
17. Nikolaeva LA. *Adsorption treatment of industrial wastewater with modified carbonate sludge*: specialty 03.02.08 Ecology (by industry) : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. *Kazan State Power Engineering University*. Kazan, 2016. p. 267.
18. Akbalina ZF, Minigazimov NS, Belan LN. *The state of the problem of industrial waste management at enterprises of the Republic of Bashkortostan*. *Ural Ecological Bulletin*, 2015;1:41-44.
19. Suchkov VP. Method of disposal of sludge of chemical water treatment of CHP and waste of battery acid. *News of higher educational institutions. Construction*, 2008;9 (597):30-32.
20. Romanovsky VI, Fedorenchik AA, Gurinovich A.D., Problems of waste disposal of water treatment and wastewater treatment in Belarus. *Bulletin of the Brest State Technical University. Water management construction, thermal power engineering and geocology*. 2011;2(68):66-69.

Authors of the publication

Antonina A. Filimonova – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Hydrogen Energy of Kazan State Energy University (KGEU).

Alyona Yu. Vlasova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Nuclear and Thermal Power Plants" (APEC) of Kazan State Energy University (KGEU).

Ruzina F. Kamaliev – student, bachelor 3rd year, Department of Nuclear and Thermal Power Plants, Kazan State Energy University (KGEU).

Получено **21.11.2022г.**

Отредактировано **28.11.2022г.**

Принято **01.12.2022г.**

ТОКСИЧНОСТЬ КАНЦЕРОГЕННЫХ ПАУ В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ КОТЛОВ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТЬЮ ДО 1 МВт

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: *ЦЕЛЬ.* В соответствии с новыми требованиями отечественного природоохранного законодательства введены технологические принципы государственного регулирования негативного влияния энергетических предприятий на окружающую среду. Установленные принципы природоохранной деятельности предусматривают технологическое нормирование выбросов на основе внедрения наилучших доступных технологий, а также дифференцирование мер государственного регулирования для обеспечения экологической безопасности объектов теплоэнергетики. В рамках действующего природоохранного законодательства показана необходимость определения нормативов выбросов высокотоксичных веществ, которые обладают канцерогенными свойствами. Рассмотрены основные представители канцерогенных ПАУ, обнаруженные в дымовых газах котлов малой мощности до 1 МВт. *МЕТОДЫ.* Методы исследования включали обобщение экспериментальных данных и расчетную оценку содержания канцерогенных выбросов, включая бенз(а)пирен в дымовых газах котлов с использованием статистических методов обработки данных. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Определена необходимость учета вклада вредности канцерогенных ПАУ в системе производственного экологического контроля на теплоэнергетических объектах при работе котлов малой мощности. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Результаты исследования могут найти применение на энергетических предприятиях для реализации требований нового природоохранного законодательства в части технологического нормирования канцерогенных выбросов, в том числе для разработки мероприятий по улучшению показателей экологической эффективности.

Ключевые слова: экологическая безопасность ТЭС; канцерогенные ПАУ; бенз(а)пирен комплексное экологическое разрешение.

Для цитирования: Иваницкий М.С. Токсичность канцерогенных ПАУ в дымовых газах котлов тепловой мощностью до 1 МВт // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 83-91. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-83-91.

TOXICITY OF CARCINOGENIC PAHS IN BOILER FLUE GASES THERMAL CAPACITY UP TO 1 MW

MS. Ivanitskiy

Volzhsky Branch of the National Research University
Moscow Power Engineering Institute, Russia

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

Abstract: *THE PURPOSE.* In accordance with the new requirements of domestic environmental legislation, technological principles of state regulation of the negative impact of energy enterprises on the environment have been introduced. The established principles of environmental protection activities provide for technological regulation of emissions based on the introduction of the best available technologies, as well as differentiation of state regulatory measures to ensure the environmental safety of thermal power facilities. Within the framework of the current environmental legislation, it is shown that it is necessary to determine emission standards for highly toxic substances that have carcinogenic properties. The main representatives of carcinogenic PAHs found in the flue gases of boilers of low power up to 1 MW are considered. *METHODS.* The research methods included the generalization of experimental data and the

calculated assessment of the content of carcinogenic emissions, including benz(a)pyrene in the flue gases of boilers using statistical data processing methods. RESULTS. The necessity of taking into account the contribution of the harmfulness of carcinogenic PAHs in the system of industrial environmental control at thermal power facilities during the operation of low-power boilers is determined. CONCLUSION. The results of the study can be used at energy enterprises to implement the requirements of the new environmental legislation in terms of technological regulation of carcinogenic emissions, including for the development of measures to improve environmental performance indicators.

Keywords: *environmental safety of thermal power plants; carcinogenic PAHs; benz(a)pyrene; integrated environmental resolution.*

For citation: Ivanitskiy MS. Toxicity of carcinogenic pahs in boiler flue gases thermal capacity up to 1 MW. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):83-91. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-83-91.

Введение

Сжигание топлива в промышленных теплоэнергетических и водогрейных котлах на тепловых электрических станциях (ТЭС) приводит к образованию оксидов азота (NO_2), диоксида серы (SO_2), оксида углерода (CO), золы твердого топлива, пентаоксида ванадия (V_2O_5), и при определенных режимных условиях, канцерогенные и неканцерогенные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), к которым также относится бенз(а)пирен (БП). Проведение инструментального анализа ПАУ в продуктах сгорания котлов из-за сложностей методического контроля выполняется только некоторыми специализированными лабораториями [1, 2].

Согласно требования Федерального закона № 219-ФЗ с 01.01.2019 года и приказа Минприроды от 18.04.2018 года № 154 предприятия I категории до 31.12.2024 года обязаны получить комплексное экологическое разрешение (КЭР). В связи с этим, необходимо отметить, что в направлении решения данной задачи энергетическим предприятиям для высокотоксичных веществ I и II классов опасности необходимо определить нормативы допустимых выбросов. Среди выделенных 300 объектов I категории находится 44 газовые и пылеугольные ТЭС. В направлении реализации современного природоохранного законодательства энергетические объекты I категории должны внедрять на производстве наилучшие доступные технологии (НДТ) для повышения экологической эффективности процессов сжигания органического топлива и производства тепловой и электрической энергии [1 – 3].

В работах [1, 3] представлены современные требования к обеспечению технологического нормирования вредных выбросов в окружающую среду от теплоэнергетических объектов, сложности внедрения на действующем производстве НДТ и введение норм общего действия. Рассматриваются технические и экономические проблемы внедрения НДТ на отечественных ТЭС, а также риски, связанные с реализацией государственной природоохранной деятельности. Важным при этом является выполнение требований по обеспечению достоверного непрерывного инструментального контроля выбросов загрязняющих веществ ТЭС в атмосферу.

Необходимо отметить, что наличие в продуктах сгорания органического топлива золы твердого топлива в конверсионных процессах, происходящих в газоходах котельных установок, способствует конденсации на их поверхности ПАУ, в том числе бенз(а)пирена, тем самым оказывает влияние на величину массовых выбросов канцерогенных ПАУ в атмосферу. Степень очистки газовых выбросов от золы твердого топлива в значительной мере определяется параметрами работы и геометрией золоулавливающих устройств, размерами и скоростью движения частиц, массовыми расходами продуктов сгорания. Разработка эффективных технологий задержки вредных веществ в газоочистных аппаратах с различными фильтрующими нагрузками позволит снизить негативное влияние объектов теплоэнергетики на окружающую среду. При этом новые технологические решения должны соответствовать принципам наилучших доступных технологий [3].

В работах [4-6] рассмотрены методические подходы к расчету показателей суммарной и частной вредности продуктов сгорания при сжигании различных

энергетических топлив. Следует отметить, что разработанные методические подходы не учитывают вклад представителей ПАУ, характеризующихся мутагенными и канцерогенными свойствами, к которым в значительной степени, относится БП. В ходе анализа режимных факторов выявлено, что условия сжигания топлива в котлах малой тепловой мощности наиболее благоприятны для образования ПАУ вследствие более низкой температуры топочного процесса по сравнению с энергетическими котлами средней и большой тепловой мощности. В этой связи, актуальность исследований заключается в определении доли БП в массовых выбросах ПАУ для установления нормативов допустимых выбросов высокотоксичных веществ, характеризующихся канцерогенными и мутагенными свойствами для энергетических предприятий, эксплуатирующих котельные установки со значительным негативным воздействием вредных (загрязняющих) выбросов на атмосферный воздух.

Таким образом, на основе обобщенных экспериментальных результатов по инструментальным измерениям выбросов ПАУ выполнено расчетное исследование определения вклада частных показателей вредности (токсичности) ПАУ и БП в суммарный показатель токсичности дымовых газов для обоснования технических решений на стадии подготовки исходных данных в процессе получения КЭР и определения нормативов выбросов высокотоксичных веществ на энергетических предприятиях.

Теоретическая значимость исследований заключается в том, что выполнены расчетные оценки удельного вклада БП в суммарную токсичность дымовых газов, определена доля БП в массовых выбросах ПАУ для формирования исходной информации разработки нормативов выбросов высокотоксичных веществ при сжигании органического топлива в котлах малой тепловой мощности.

Практическая значимость заключается в применении полученных результатов на теплоэнергетических объектах на стадии подготовки заявки и получения комплексного экологического разрешения, а также при установлении нормативов допустимых выбросов высокотоксичных компонентов при сжигании органического топлива, и разработке программы повышения экологической эффективности энергетических предприятий, в том числе для обоснования и создания расчетной методики определения концентрации канцерогенного БП в продуктах сгорания органического топлива для котлов малой тепловой мощности.

Материалы и методы

Инструментальное определение концентрации бенз(а)пирена и других представителей ПАУ в дымовых газах котлов связано со значительными сложностями при отборе и детектировании компонентов газовой пробы. Производственный контроль содержания представителей ПАУ в уходящих газах источников выбросов на энергетических предприятиях осуществляется, как правило, специализированными аналитическими лабораториями. Наиболее приемлемым методом индикации ПАУ при этом является высокоэффективная жидкостная хроматография. Следует отметить, что конверсия продуктов сгорания в газоходах котельных установок в значительной степени влияет на достоверность выполняемых инструментальных измерений ПАУ при сжигании органического топлива. Дополнительные сложности аналитического определения представителей ПАУ в уходящих газах связаны с необходимостью термостатирования газовой пробы при температуре 200 °С. Нарушение методики отбора и хранения пробы на данном этапе приводит к конденсации паров, и как следствие, значительно снижает представительность газовой пробы. Погрешность определения ПАУ в продуктах сгорания составляет порядка 25%. Поэтому на практике широкое применение находят расчетные методы определения бенз(а)пирена в продуктах сгорания органического топлива, учитывающие конструктивные и режимно-технологические особенности котельных установок и теплотехнические характеристики топлива [5].

В работе в качестве объекта исследования рассмотрен стальной водогрейный котел НРС-18-73 со слоевым сжиганием топлива тепловой мощностью 0,73 Гкал/ч. Основные марки топлива, рассмотренные в работе, с теплотехническими характеристиками, приведенными к рабочей массе, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Теплотехнические характеристики топлива

Марка и состав топлива	W ^r , %	A ^d , %	S ^d , %	N ^{daf} , %	Q ^r , МДж/кг
Черемховский	15	34	1,2	1,6	16,4
Тугуйский	7,5	23	0,5	1,1	21,0
Мугунский	22	0	1,2	1,5	17,3

В качестве проектного рассмотрен уголь черемховского месторождения. Массовый расчетный расход угля при номинальной нагрузке котла составляет 277 кг/ч. Тепловая производительность котла принимала значения от $0,5 \leq Q_{\phi} / Q_n \leq 1$, коэффициент избытка воздуха изменялся в пределах $\alpha = 1,3 \div 1,8$, установленных режимной картой работы котла, расчетный расход уходящих газов в зависимости от условий составил $0,71 \div 1,42 \text{ м}^3/\text{с}$. Объемное теплонапряжение топки котла равно $q_V = 668 \text{ кВт/м}^3$ [7 – 9].

Для решения поставленной задачи исследования в работе рассчитывается суммарный показатель вредности $\sum \Pi$ дымовых газов котла, который определен с учетом частных показателей вредности загрязняющих выбросов $\sum \Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i$ в соответствии с рекомендациями [4, 5].

Частный показатель вредности Π_i представляет собой количество граммов вредной примеси m_i , образовавшейся при сжигании 1 г топлива, отнесенной к относительной теплоте сгорания топлива и к относительной токсичности вредной примеси и рассчитывается по соотношению [5]:

$$\Pi_i = \frac{m_i(1-\eta)}{\frac{Q_i^r}{(Q_i^r)_{\text{у.т.}}} \frac{\text{ПДК}_{\text{м.р.}i}}{(\text{ПДК}_{\text{м.р.}})_{\text{зола}}}}, \quad (1)$$

где $Q_i^r, (Q_i^r)_{\text{у.т.}}$ – теплота сгорания соответственно рассматриваемого и условного топлива, МДж/кг (МДж/м³); $\text{ПДК}_{\text{м.р.}i}, (\text{ПДК}_{\text{м.р.}})_{\text{зола}}$ – максимально разовые ПДК соответственно i – ой примеси и золы, мг/м³; η – степень очистки уходящих газов от i – ой примеси перед выбросом в атмосферу.

В процессе определения показателей вредности загрязняющих веществ учитывались следующие режимные параметры и условия работы котла: коэффициент избытка воздуха α , тепловая нагрузка, теплотехнические характеристики топлива.

Обсуждение результатов

Высокая канцерогенная активность БП, несмотря на его низкое содержание в продуктах сгорания, в значительной степени может влиять на суммарную вредность дымовых газов котлов, что особенно проявляется в условиях сжигания углей при малых избытках воздуха и недостаточном уровне объемного и поверхностного теплонапряжения топочной камеры котельной установки. Поэтому обеспечение качественного окисления топлива способствует более полному выгоранию топлива, и как следствие, снижению массового выхода всей группы ПАУ. Следует отметить, что кроме канцерогенного БП в продуктах сгорания углей могут содержаться такие полициклические ароматические углеводороды как хризен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, антрацен, бенз(а)антрацен, бенз(г, h, i)перилен, фенантрен, индено (1, 2, 3 -с, d)пирен. Приведенные особенности необходимо учитывать при создании и внедрении систем мониторинга и контроля выбросов вредных загрязняющих веществ на энергетических предприятиях в соответствии с нормативными требованиями охраны окружающей среды [7 – 9].

На рисунке 1 представлены результаты расчета суммарного и частных показателей вредности группы ПАУ, БП, NO₂, SO₂, V₂O₅, золы твердого топлива и СО в зависимости от режимных условий работы котла НРс-18-73 в случае сжигания угля черемховского месторождения.

Необходимо отметить, что расчетная концентрация БП для приведенного варианта твердого топлива при $\alpha = 1,3$ равна 2,39 мкг/м³, что соответствует достаточно значительному вкладу БП в $\sum \Pi$ дымовых газов на уровне 36,9 % по сравнению с долями токсичности NO₂, SO₂, V₂O₅, золы твердого топлива и оксида углерода.

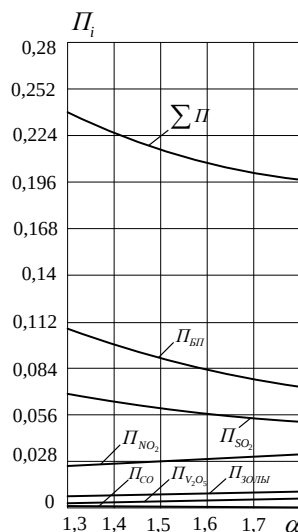


Рис. 1. Суммарный и частные показатели вредности группы ПАУ, БП, NO₂, SO₂, V₂O₅, золы твердого топлива и СО в продуктах сгорания угля черемховского месторождения в зависимости от режимных условий работы котла НРс-18-73

Fig. 1. Total and partial indicators of the harmfulness of PAH, BP, NO₂, SO₂, V₂O₅, solid fuel ash and CO in coal combustion products of the cheremkhovsky deposit, depending on the operating conditions of the boiler NRs-18-73

Таким образом, по результатам полученных значений показатель суммарной вредности загрязняющих выбросов в рассмотренных пределах изменения режимных параметров сжигания угля уменьшается на 17,5 %, что подтверждает необходимость обеспечения более полного выгорания топлива, связанного с интенсификацией процессов его окисления. Вклад вредности золы твердого топлива в зависимость от режимных условий в суммарную токсичность дымовых газов составляет 3,1 – 4,6 %, при этом доля вредности равна NO₂ = 10,9 – 15,3 %, вклад SO₂ = 26,4 – 27,7%, а доля СО незначительна и находится на уровне 0,08 %.

Результаты оценки суммарного и частных показателей вредности ПАУ, БП, NO₂, SO₂, V₂O₅, золы твердого топлива и СО в дымовых газах котла НРс-18-73 при сжигании тугнуйского угля с учетом влияния режимных факторов представлены на рис. 2.

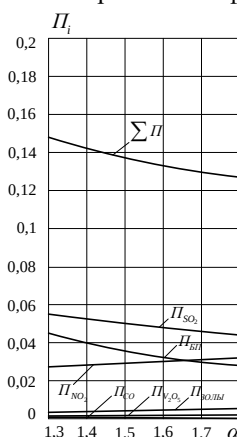


Рис. 2. Суммарные и частные показатели вредности группы ПАУ, БП, NO₂, SO₂, V₂O₅, золы твердого топлива и СО в зависимости от режимных факторов при сжигании угля тугнуйского месторождения в котле НРс-18-73

Fig. 2. Total and partial indicators of the harmfulness of the group of PAHs, BP, NO₂, SO₂, V₂O₅, solid fuel ash and CO, depending on the regime factors when burning coal from the tugnuisky deposit in the boiler NRs -18-73

В ходе расчетов установлено, что БП оказывает значительное влияние на формирование $\sum P$ продуктов сгорания. При этом доля частной вредности БП по отношению к суммарному показателю токсичности дымовых газов при $\alpha = 1,3$ составляет 31,9 %, а для $\alpha = 1,8$ равна 22,4 %. Доля вредности, вносимая золой твердого топлива, составляет от 2,4 до 3,4 %, при этом доля токсичности SO_2 в рассмотренных режимных условиях сжигания топлива равна 34,6 – 37,3%, вклад токсичности V_2O_5 оценочно составляет от 0,95 до 1,34%. Следует отметить, что массовая доля пентаоксида ванадия в топливе в среднем не превышала 0,09%, при этом массовая концентрация V_2O_5 равна не более 30 мг/м³.

Зависимость вклада показателя частной вредности ПАУ, NO_2 , SO_2 , V_2O_5 , золы твердого топлива и СО в суммарный показатель токсичности дымовых газов котла НРС-18-73 с учетом теплотехнических характеристик топлива и режимных условий представлена на рис. 3.

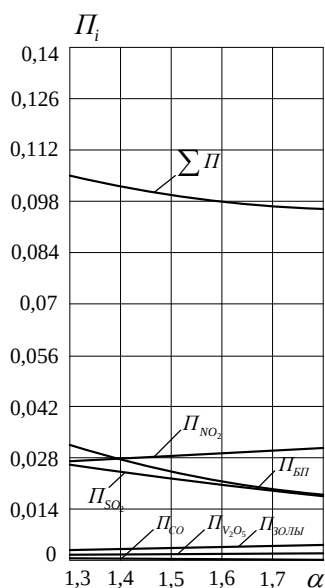


Рис. 3. Суммарный и частные показатели вредности группы ПАУ, БП, NO_2 , SO_2 , V_2O_5 , золы твердого топлива и СО в зависимости от режимных условий сжигания угля мугунского месторождения в котле НРС-18-73

Fig. 3. Total and partial indicators of the harmfulness of the group of PAHs, BP, NO_2 , SO_2 , V_2O_5 , solid fuel ash and CO, depending on the operating conditions of coal combustion of the mugunsky field in the boiler NRs -18-73

Анализ полученных расчетных значений, представленных на рис.3., показывает, что доля БП в $\sum P$ дымовых газов при сжигании мугунского угля, оценочно составляет 22,91 %, доля остальных ПАУ – 12,2%. Необходимо отметить, что вклад вредности, вносимый золой твердого топлива составляет от 4,2 до 5,9 % (при КПД золоулавливания – $\eta_{\text{з}}=0,85$), при этом доля SO_2 в условиях сжигания угля мугунского месторождения равна 22,5 – 26,6%, вклад V_2O_5 достигает уровня от 1,68 до 2,33%. Показано, что вклад вредности БП в формирование суммарного показателя вредности дымовых газов при $\alpha=1,3$ составляет 29,73 %, для $\alpha=1,8$ равен 19,79%, что необходимо учитывать при оценке негативного воздействия вредных (загрязняющих) выбросов, обладающих канцерогенными и мутагенными свойствами, на окружающую среду и подготовке исходных данных при разработке программы улучшения экологических показателей производственной деятельности энергетического предприятия, в том числе при проведении производственного экологического контроля [10 – 15].

Результаты расчетной оценки позволяют сделать вывод о том, что вклад вредности всей группы ПАУ в $\sum P$ дымовых газов при сжигании угля мугунского месторождения при $\alpha=1,3$ составляет 46,61 %, для варианта $\alpha=1,8$ равен 35,11 %.

На рис. 4 представлены результаты, характеризующие изменение относительного вклада БП во вредность всей группы ПАУ с учетом теплотехнических характеристик топлива и режимных факторов сжигания углей рассмотренных марок.

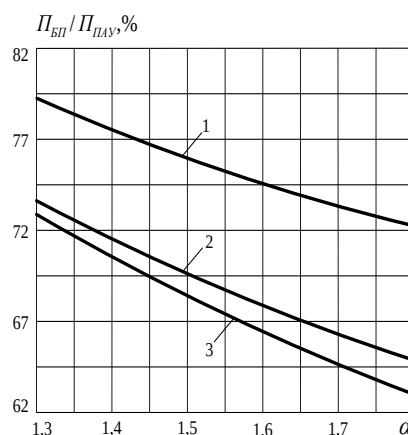


Рис. 4. Зависимость изменения относительного вклада БП во вредность всей группы ПАУ от режимных условий: 1 – Черемховский; 2– Тугнуйский; 3 – Мугунский

Fig. 4. Dependence of the change in the relative contribution of BP to the harmfulness of the entire PAH group on the regime conditions: 1 – Cheremkhovsky; 2– Tugnuysky; 3 – Mugunsky

На рисунке 4 показано, что доля вредности БП по отношению к суммарной токсичности всей группы ПАУ в условиях сжигания угля черемховского месторождения при $\alpha=1,3$ составляет 79,36 %, для случая $\alpha=1,8$ равна 72,32 %, а при использовании тугнуйского угля при $\alpha=1,3$ составляет 73,77 %, для варианта $\alpha=1,8$ соответствует 65,21 %, причем в случае применения мугунского угля в аналогичных режимных условиях вклад БП составляет 72,83 % и 62,96 %, соответственно, что подтверждает значительный вклад вредности БП и отдельных канцерогенных ПАУ в общий показатель токсичности уходящих газов котлов. Таким образом, повышение коэффициента избытка воздуха в диапазоне, указанном на рисунке 4, позволяет в зависимости от условий и марки угля снизить суммарную токсичность продуктов сгорания на 7,04 – 9,96 %. Численные значения концентрации БП в сухих продуктах сгорания котла НРС-18-73, рассчитанные в ходе выполнения исследования, подтверждаются удовлетворительной сходимостью с результатами экспериментальных исследований в работах [4 – 6].

Отметим, что при работе котла НРС-18-73 на углях черемховского, тугнуйского и мугунского месторождений, доля, вносимая БП в $\Pi_{ПАУ}$ дымовых газов, в зависимости от режимных условий горения твердого топлива составляет от 19,79 до 36,95 %, что необходимо учитывать при реализации новых принципов регулирования природоохранной деятельности и обеспечения производственных экологических требований на энергетических предприятиях. При этом исследование токсичности отдельных ПАУ и их влияние на общий показатель вредности дымовых газов котлов представляет особый интерес в части обеспечения требований производственного экологического контроля.

Выводы

Выполнены расчетные оценки удельного вклада БП в суммарную токсичность дымовых газов, определена доля БП в массовых выбросах ПАУ для формирования исходной информации разработки нормативов выбросов высокотоксичных веществ при сжигании органического топлива в котлах малой тепловой мощности.

Результаты показали, что вклад ПАУ, включая БП, в суммарный показатель вредности дымовых газов котла НРС-18-73 при сжигании углей черемховского месторождения составил от 51,11 до 56,56 %, тугнуйского – от 35,11 до 40,27 %, мугунского – от 36,11 до 43,86 %, при этом доля БП в суммарной токсичности всей группы ПАУ в зависимости от теплотехнических характеристик углей находится в диапазоне от 62,96 до 79,36 %, что объясняется режимными условиями сжигания топлива в угольных котлах малой тепловой мощности (до 1 МВт), связанных с интенсивным подводом окислителя на начальной стадии горения топлива, характеризующейся высоким массовым выходом всей группы ПАУ. Повышение избытка воздуха на стадии выгорания топлива способствует более полной конверсии ПАУ в топке и по всей длине газохода котельной установки, тем самым приводит к уменьшению частных показателей токсичности выбросов отдельных ПАУ и суммарной вредности продуктов сгорания.

Полученные результаты могут быть применены на теплоэнергетических объектах на стадии подготовки заявки и получения комплексного экологического разрешения, а также при разработке программы повышения экологической эффективности энергетических предприятий, в том числе для обоснования и создания расчетной методики определения концентрации канцерогенного БП в продуктах сгорания органического топлива для котлов малой тепловой мощности. Таким образом, выполненные оценки

значений суммарных и частных показателей токсичности дымовых газов котлов малой тепловой мощности рекомендуется применять на стадии сбора исходной информации при установлении годовых валовых выбросов и инвентаризации выбросов канцерогенных веществ I и II классов опасности на энергетических предприятиях.

Литература

1. Росляков П. В., Кондратьева О. Е., Альмгрен А. Р., Сивцева С. А., Бурченко В. Д. Технические и экономические проблемы и риски внедрения наилучших доступных технологий на российских ТЭС // Новое в российской электроэнергетике. 2021. № 1. С. 15-20.
2. Алехнович А.Н. Бенз(а)пирен как вредный выброс ТЭС. Уровень выбросов и проблемы // Энергетик. 2020. № 10. С. 6-10.
3. 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.
4. Кропп Л.И., Залогин Н.Г., Яновский Л.П. Показатель суммарной вредности продуктов сгорания энергетических топлив // Теплоэнергетика. 1978. №10. С. 47-49.
5. Росляков П.В., Закиров И.А., Ионкин И.Л., и др. Оценка суммарной вредности уходящих газов котельной установки // Теплоэнергетика. 2005. № 9. С. 30-34.
6. Филиппов С.П., Павлов П.П., Кейко А.В., и др. Экспериментальное определение выбросов сажи и ПАУ котельными и домовыми печами // Известия РАН. Энергетика. 2000. № 3. С. 107-117.
7. Куролап С.А., Петросян В.С., Клепиков О.В., и др. Оценка влияния метеорологических параметров на техногенное загрязнение канцерогеноопасными химическими веществами воздушного бассейна города Воронежа // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 2. С. 60 -65.
8. Кондратьева О. Е., Росляков П. В., Недре А. Ю., и др. Внедрение систем непрерывного контроля выбросов как часть цифровой трансформации энергетических предприятий // Энергетик. 2020. № 10. С. 3-5.
9. Иваницкий М.С. Токсичность уходящих газов твердотопливного котла КЕ - 25 - 14С // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020.Т. 22. № 1. С. 77-84.
10. Rigamonti L.,Grosso M., Biganzoli L.Environmental assessment of refuse-derived fuel co-combustion in a coal-fired power plant // Journal of Industrial Ecology. 2012. №16(5). pp. 748–760.
11. Yan D.,Wu S., Zhou S. ,Tong G.,Li F., Wang Y., et al. Characteristics, sources and health risk assessment of airborne particulate PAHs in Chinese cities: A review // Environmental Pollution.2019. №248. pp.804 – 814.
12. Kim K.H., Jahan S.A., Kabir E., et al. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects // Environment International. 2013. №60. pp. 71-80.
13. Hsu W.T., Liu M.C., Hung P.C., et al. PAH emissions from coal combustion and waste incineration // Journal of Hazardous Materials. 2016. №318. pp. 32 – 40.
14. Pei B., Wang X., Zhang Y., et al. Emissions and source profiles of PM_{2.5} for coal-fired boilers in the Shanghai megacity, China // Atmospheric Pollution Research. 2016. V.7. Issue 4. pp. 577-584.
15. 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. Т 23. № 1. С. 33-45.

Автор публикации

Иваницкий Максим Сергеевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры Энергетики филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: mseiv@yandex.ru.

References

1. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Al'mgren AR, et al. Tekhnicheskie i ekonomicheskie problemy i riski vnedreniya nailuchshikh dostupnykh tekhnologii na rossiiskikh TES. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*.2021;1:15-20.

2. Alekhovich AN. Benz(a)piren kak vrednyi vybros TES. Uroven' vybrosov i problem. *Energetik*.2020;10:6-10.
3. Roslyakov PV, Cherkasskii EV, Guseva TV, et al. Tekhnologicheskoe normirovanie ob"ektov teploelektroenergetiki: nailuchshie dostupnye tekhnologii i normy obshchego deistviya. *Teploenergetika*. 2021;10:1-13.
4. Kropp LI, Zalogin NG, Yanovskii LP. Pokazatel' summarnoi vrednosti produktov sgoraniya energeticheskikh topliv. *Teploenergetika*.1978;10:47-49.
5. Roslyakov PV, Zakirov IA, Ionkin IL, et al. Otsenka summarnoi vrednosti ukhodyashchikh gazov kotel'noi ustanovki. *Teploenergetika*.2005;9:30-34.
6. Filippov SP, Pavlov PP, Keiko AV, et al. Eksperimental'noe opredelenie vybrosov sazhi i PAU kotel'nymi i domovymi pechami. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2000;3:107-117.
7. Kurolap SA, Petrosyan VS, Klepikov OV, et al. Otsenka vliyaniya meteorologicheskikh parametrov na tekhnogennoe zagryaznenie kantserogenoopasnymi khimicheskimi veshchestvami vozdušnogo basseina goroda Voronezha. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*.2021;25(2):60-65.
8. Kondrat'eva OE, Roslyakov PV, Nedre AYU, et al. Vnedrenie sistem nepreryvnogo kontrolya vybrosov kak chast' tsifrovoi transformatsii energeticheskikh predpriyatii. *Energetik*. 2020;10:3-5.
9. Ivanitskii M.S. Toksichnost' ukhodyashchikh gazov tverdotoplivnogo kotla KE - 25 - 14S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;22(1):77-84.
10. Rigamonti L, Grosso M, Biganzoli L.Environmental assessment of refuse-derived fuel co-combustion in a coal-fired power plant. *Journal of Industrial Ecology*. 2012;16(5):748-760.
11. Yan D, Wu S, Zhou S, et al. Characteristics, sources and health risk assessment of airborne particulate PAHs in Chinese cities: A review. *Environmental Pollution*.2019;248:804-814.
12. Kim KH, Jahan S.A, Kabir E,Brown R.J.C.A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environment International*. 2013;60:71-80.
13. Hsu WT, Liu MC, Hung PC., et al. PAH emissions from coal combustion and waste incineration // *Journal of Hazardous Materials*. 2016;318:32-40.
14. Pei B, Wang X, Zhang Y, Hu M, et al. Emissions and source profiles of PM_{2.5} for coal-fired boilers in the Shanghai megacity, China. *Atmospheric Pollution Research*. 2016;7(4):577 – 584.
15. Kudryashov AN, Koval' TV, Izhgannits M.I. Opyt szhiganiya kompozitsionnogo topliva na osnove ugol'nogo shlama na TETs Irkutskoi oblasti. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021;23(1):33-45.

Author of the publication

Maxim S. Ivanitskiy – Doc. Sci. (Techn.), Prof. of the department of Energy, Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI).

Получено

26.10.2022г.

Отредактировано

15.11.2022г.

Принято

22.11.2022г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-92-101

ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Васильев¹ Д.А., Пантелеева¹ Л.А., Грачева² Е.И.

¹Ижевская государственная сельскохозяйственная академия,
г. Ижевск, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
<https://orcid.org/0000-0003-0914-4097>, 79128747827@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Представленная работа ставит перед собой цель оптимизации режима работы асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором. Для реализации энергоэффективных режимов работы АД, работающих в системах автоматизированного электропривода, необходимо определить числовые значения параметров схемы замещения АД, токов протекающих по элементам схемы. При этом нет возможности непосредственного определения токов короткозамкнутого ротора, в соответствии с этим возникает необходимость идентификации токов короткозамкнутого ротора, которая должна решаться одновременно определением параметров схемы замещения АД. МЕТОДЫ. Для анализа работы АД в технической и учебной литературе используют схемы замещения, которые представляют собой цепи с последовательным и параллельным соединением активных и индуктивных сопротивлений. Выполнено преобразование схемы замещения АД состоящей из последовательного и параллельного соединения активных и индуктивных сопротивлений, в схему состоящую из проводимостей. При преобразовании схемы замещения АД не вводились дополнительные зависимости и коэффициенты, и все допущения, которые принимаются для схем замещения АД, относятся к рассматриваемой схеме. РЕЗУЛЬТАТЫ. Для исследования режимов работы АД, в работе предложена схем замещения, состоящая из проводимостей, что позволяет непосредственно определять активные и реактивные составляющие тока статора и ротора, соответствующие им мощности. Оценка эффективности работы двигателя, для предложенной схеме замещения, определяется отношением произведения активных проводимостей цепи ротора и суммарной активной проводимости фазы к квадрату полной проводимости фазы АД, что соответствует минимальным активным потерям в обмотках двигателя. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В результате решения задачи оптимизации потерь в АД, по предложенному отношению проводимостей, получена зависимость частоты питающей сети, на базе двигателя АИР100S4, от скольжения, по условию минимума потерь в обмотках статора и ротора. Исследуемый АД АИР100S4 будет работать с минимальными потерями, если изменять амплитуду питающего напряжения питания так, чтобы скольжение АД было равно расчетному значению $s_{\xi}=0,061$ при частоте 50 Гц. Предложенный в работе способ позволяет уменьшить потери активной мощности на 3-5% в обмотках двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель; проводимость цепи; составляющие тока; схема замещения; ток статора; ток ротора; электропривод.

Для цитирования: Васильев Д.А., Пантелеева Л.А., Грачева Е.И. Оптимизации режима работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Проблемы энергетики. 2022.Т.24. № 6. С. 92-101. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-92-101.

OPTIMIZATION OF THE OPERATING MODE OF A SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR

Vasiliev¹ D.A., Panteleeva¹ L.A., Gracheva² E.I.

¹Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia

Abstract: *THE PURPOSE.* The presented work aims to optimize the operating mode of an asynchronous motor (AM) with a short-circuited rotor. To implement energy-efficient modes of operation of AM, operating in the resources of a rational electric drive, it is necessary to determine the numerical values of the parameters of the AM equivalent circuit, the currents flowing through the circuit element. There is no significance to this important definition of squirrel-cage currents, in accordance with the identification of the allocation of squirrel-cage rotor currents, which requires a solution along with the determination of the parameters of the IM equivalent circuit. *METHODS.* To analyze the work of AM in technical and educational formulations, equivalent circuits are presented, which turn into circuits with serial and analytical connections of active and inductive connections. For the established and transient operating modes of AM, it is important to determine the stator and rotor currents, their active and reactive components. In this regard, it is proposed to present the IM equivalent circuit in the form of conductivities connected in parallel, which will allow determining the components of IM currents without complex mathematical models. The replacement circuit of AM consisting of a series and parallel connection of active and inductive resistances has been converted into a circuit consisting of conductances. When converting the AM equivalent circuit, no additional dependencies and coefficients were introduced, and all assumptions that are accepted for IM equivalent circuits refer to the circuit under consideration. *RESULTS.* It was decided to use the equivalent circuit of one phase of AM, expressed in terms of the conductivities of the stator and rotor. According to the found dependences of conductivities, for the proposed equivalent circuit, the corresponding currents and powers of the AM phase are determined. Formulate the basic principle of optimal frequency control of AM, according to the criterion of energy saving. As an indicator of the efficiency of AM operation in steady-state operating modes, the minimum value of the total losses of the engine, the value of which is determined by the ratio of the product of the active conductivity of the rotor circuit q_{2s} and the active conductivity of the phase q to the square of total conductivity y . *CONCLUSION.* Based on the results of the analysis of the characteristics of an asynchronous motor, the following conclusion was drawn: the motor will operate with minimal losses if the amplitude of the supply voltage is changed so that the slip of the asynchronous motor is equal to the critical value s_{ξ} for a given frequency. For the investigated engine AIR100S4, the critical value is $s_{\xi}=0.0613$ at a network frequency of 50 Hz. The method proposed in the work allows to reduce the loss of active power by 3-5% in the motor windings.

Key words: asynchronous motor; circuit conductivity; current components; equivalent circuit; stator current; rotor current; electric drive.

For citation: Optimization of the operating mode of a squirrel-cage induction motor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):92-101. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-92-101.

Введение

Для оценки энергетической эффективности работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода используются энергетические показатели, которые можно разделить на две группы. К первой группе относятся показатели, которые характеризуют работу асинхронного двигателя (АД), как потребителя электрической энергии, к ним можно отнести полную, активную и реактивную мощности. Ко второй группе относятся показатели, которые характеризуют работу двигателя, как преобразователя энергии, к ним следует отнести: коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, мощность потерь. Рассматривая перечисленные показатели, как функции регулирования выходных параметров (амплитуды и частоты), можно говорить о существовании точек минимума или максимума этих функции, которые являются показателем качества работы АД. Из списка перечисленных показателей качества работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода можно выделить необходимые целевые функции, а также при необходимости вводить новые показатели для решения поставленных задач оптимизации. Цель работы: сформулировать основной принцип оптимального частотно-токового управления АД, по критерию энергосбережения. Для достижения поставленной цели необходимо определить способ управления АД, применение которого позволит оптимизировать режим работы двигателя по критерию минимума потерь. Полученные в ходе исследования зависимости активных и реактивных составляющих токов фазы АД, в функции скольжения, могут быть использованы проектными организациями для выбора закона частотного управления при проектировании асинхронного электропривода.

Литературный обзор

В работах Костенко М.П. был сформулирован основной закон частотного управления, который положили начало частотному управлению. Последующие работы А.А. Булгакова, И.Я. Браславского, А.Б. Виноградова, Ю.А. Сабина, А.С. Сандлера, Р.С. Сарбатова, В. Н. Полякова и других исследователей в области частотного управления, на основе все более полного учета свойств АД, основные результаты которых изложены и обобщены в монографиях [1-6], расширили область знаний в области частотного управления электроприводом. На принципах полученных в этих исследованиях, широкое распространение получили системы управления, основанные на непосредственной реализации законов регулирования напряжения в функции момента нагрузки $U_1 = U(f_1, M)$ или частоты $U_1 = U(f_1)$.

Оценка энергетической эффективности законов частотного управления АД может быть выполнена при решении задач, критерием оптимизации может быть принято минимальное значение потребляемой мощности или минимальное значение токов двигателя [2,7,8,9]. При этом нет возможности непосредственного определения токов короткозамкнутого ротора, в соответствии с этим возникает необходимость идентификации токов короткозамкнутого ротора, которая должна решаться одновременно с задачей определению параметров эквивалентной схемы замещения АД [10,11].

Для оценки режимов работы АД и составления баланса мощности в качестве формализованного описания АД используется его схема замещения. Рассмотрим эквивалентные схемы замещения АД, приводимые в технической и учебной литературе.

В [Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. 1981. 576 с., стр. 75] рассматривается упрощенная или Г-образная схема замещения АД, приведенная на рисунке 1.

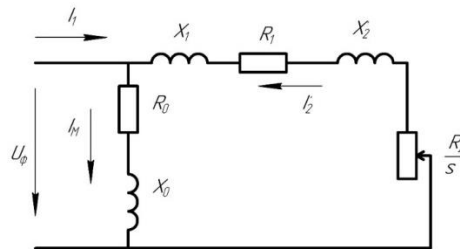


Рис. 1. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 1. Simplified equivalent circuit of an asynchronous motor

В соответствии с приведенной схемой замещения рисунок 1, можно получить уравнения баланса напряжения и ЭДС в цепях:

статора

$$\dot{U}_\phi = (-\dot{E}_s) + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1;$$

ротора

$$0 = \dot{E}_r - j \frac{R_2'}{s} \dot{I}_2 + jX_2' \dot{I}_2;$$

контура намагничивания

$$\dot{U}_\phi = R_0 \dot{I}_M + jX_0 \dot{I}_M.$$

Схема замещения, приводимая в [12, стр. 139], имеет ряд отличий и показана на рисунке 2.

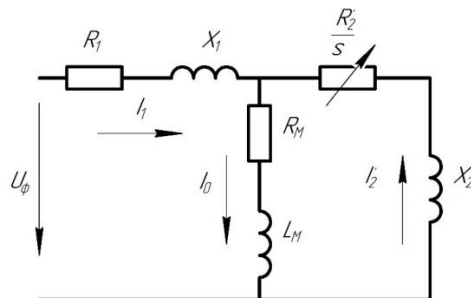


Рис. 2. Детализированная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 2. Detailed equivalent circuit of an asynchronous motor, in the diagram

В [Радин, В.И. Электрические машины: Асинхронные машины: 1988. 328 с., стр. 55] приведена Т - образная схема замещения асинхронного двигателя при вращающемся

роторе, рисунок 3.

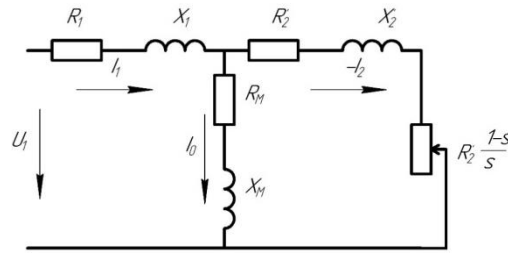


Рис. 3. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Fig. 3. T-shaped equivalent circuit of an induction motor

При анализе частотного регулирования скорости электродвигателей, в [1, стр. 15] используется схема замещения одной фазы асинхронного двигателя, приведенная на рисунке 4:

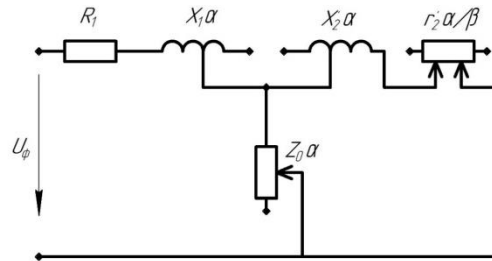


Рис. 4. Модель асинхронного двигателя с учётом частоты питания

Fig. 4. Model of an asynchronous motor, taking into account the power frequency

Параметры схемы замещения на рисунке 4 определяются при номинальных значениях напряжения и частоты сети. При отклонениях параметров сети от номинальных выполняется пересчет сопротивлений, где $\alpha = f_1/f_{1ном}$ – относительная частота статора.

Решение задач оптимизации режимов работы АД с короткозамкнутым ротором выполняется на различных схемах замещения, важную роль при этом имеет состав переменных, зависимость между которыми определяется законом управления. Из литературного обзора, можно сделать вывод, что для анализа работы АД в литературе используют схемы замещения, которые представляют собой цепи с последовательным и параллельным соединением активных и индуктивных сопротивлений.

Материалы и методы

Для решения задачи по оптимизации режимов работы АД, предложен подход, в котором АД представляется схемой замещения в виде параллельно соединённых проводимостей, что позволит без сложных математических моделей определять составляющие токов АД [13].

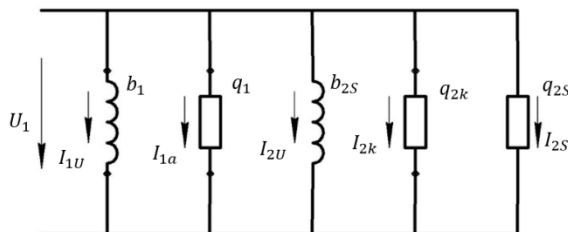


Рис. 5. Схема замещения асинхронного двигателя выраженная через проводимости статора и ротора

Fig. 5. Equivalent circuit of one phase of an asynchronous motor, expressed through the conductance of the stator and rotor

Из проведенных ранее исследований [14-16], можно сделать выводы, что схемы замещения фазы АД, выраженной через проводимости, рисунок 5, и упрощённая схема замещения асинхронного двигателя, рисунок 1, идентичны, что позволяет считать предложенную схему адекватной.

Для исследований выбран АД общего назначения АИР100S4, мощность номинальная 3 кВт, ток номинальный 7,3 А, частота вращения номинальная 1410 мин-1.

Параметры схемы замещения сведены в таблицу 1 [16].

Таблица 1.

Параметры схемы замещения электродвигателя АИР100S4

R_1	L_1	X_1	R_2'	L_2'	X_2'	R_μ	L_μ	X_μ
Ом	Гн	Ом	Ом	Гн	Ом	Ом	Гн	Ом
2,55	0,00926	2,91	1,86	0,00926	2,91	4,76	0,229	71,92

На рисунке 6 показаны зависимости составляющих тока фазы АД АИР100S4 от скольжения, позволяющие количественно оценить значения составляющих тока фазы АД.

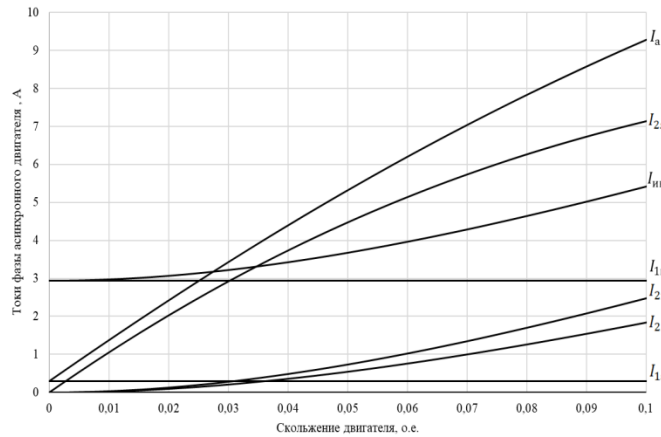


Рис. 6. Зависимости токов фазы двигателя АИР100S4 от скольжения

Fig. 6. Dependences of the phase currents of the AC100S4 asynchronous motor on slip

Анализ кривых составляющих токов фаз АД, рисунок 6, показал, что активная проводимость и соответствующий ей ток, кривая I_a , и индуктивная проводимость и ток, соответствующий этой проводимости, кривая I_{2s} , имеет разную степень зависимости от скольжения. В работах [13-16] доказано, что в АД можно изменять соотношение активной и индуктивной составляющей тока, посредством изменения соотношения между амплитудой и частотой питающего напряжения, что в свою очередь позволит скорректировать показатели энергетической эффективности работы АД.

Для решения задачи по оптимизации режимов частотно-регулируемого асинхронного электропривода, необходимо определить: целевую функцию, множество допустимых решений, критерий оптимизации. Асинхронный электропривод содержит в своем составе преобразователь частоты и асинхронный двигатель, в связи с этим, оптимизация может быть выполнена как по отношению двигателю, частотному преобразователю и электроприводу в целом.

КПД электропривода определяется отношением полезной механической мощности на валу P_{2s} к мощности, потребляемой из сети частотным преобразователем электропривода $P_{ЭП}$:

$$\eta_{ЭП} = \frac{P_{2s}}{P_{ЭП}} \cdot \#$$

КПД электропривода, содержащего в своем составе преобразователь частоты и АД, можно выразить как произведение двух составляющих: КПД преобразователя частоты $\eta_{ПЧ}$ и КПД асинхронного двигателя $\eta_{АД}$.

$$\eta_{ЭП} = \eta_{ПЧ} \eta_{АД} \cdot \#$$

Одним из путей решения задачи снижения потребления электроэнергии асинхронным электроприводом является уменьшение потерь мощности в самом асинхронном электродвигателе. Так как в данной работе производится оценка эффективности работы АД, КПД частотного преобразователя принимается неизменным и в дальнейшем не анализируется.

$$\eta_{ЭП} = \eta_{АД} \cdot \#$$

С учетом вышесказанного, можно принять активную мощность которая потребляется электроприводом:

$$P_{ЭП} = \Delta P_{АД} + P_{2s}, \#$$

где $\Delta P_{АД}$ – суммарные потери двигателя.

При $\cos\varphi$, для создания активной мощности на валу асинхронного двигателя, P_{2s} кВт, к активному току, будет добавляться реактивный ток, полный ток при этом:

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_a^2}, I = \frac{I_a}{\cos\varphi} \quad (1)$$

Реактивная составляющая тока:

$$I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2} = \sqrt{\left(\frac{I_a}{\cos\varphi}\right)^2 - I_a^2} = I_a \sqrt{\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1}. \quad (2)$$

Оценим затраты активной мощности, в трехфазном асинхронном двигателе от протекания активной и реактивной составляющих тока:

$$P = 3I^2 R = 3(I_a^2 + I_p^2) R = 3(P_a + P_p), \quad (3)$$

где R – общее активное сопротивление фазы асинхронного двигателя, Ом.

Потери мощности на активном сопротивлении при протекании по нему реактивной составляющей тока, с учетом выражений (1-3), можно определить по выражению:

$$P_p = I_p^2 R = \left(I_a \sqrt{\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1} \right)^2 R = P_a \left(\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1 \right) \quad (3)$$

Тогда суммарные затраты активной мощности асинхронного двигателя:

$$P = P_a + P_p = P_a + P_a \left(\left(\frac{1}{\cos\varphi}\right)^2 - 1 \right) = \frac{P_a}{\cos^2\varphi} = \frac{qU_\phi^2}{\cos^2\varphi}, \quad (4)$$

где q – суммарное значение активной проводимости фазы АД (q , 1/Ом).

КПД двигателя, для предложенной схемы замещения, определяется отношением активной проводимости цепи ротора (q_{2s} , 1/Ом), к суммарному значению активной проводимости одной фазы асинхронного двигателя (q , 1/Ом):

$$\eta = \frac{q_{2s}}{q}, \quad (5)$$

Суммарная активная мощность от протекания активной и реактивной составляющих тока составит, с учетом выражений (4) и (5):

$$P = \frac{q_{2s}U_\phi^2}{\cos^2\varphi\eta} = \frac{P_{2s}}{\cos^2\varphi\eta}.$$

Таким образом, целевая функцию оптимизации:

$$\xi = \cos^2\varphi \cdot \eta \Rightarrow \max. \quad (6)$$

В качестве показателя эффективности работы асинхронного электропривода предложено использовать минимальное значение активных потерь двигателя, значение которого определяется отношением произведения активной проводимости цепи ротора q_{2s} и полной активной проводимости фазы q к квадрату полной проводимости y , выражение (6).

Результаты и обсуждение

На основании схемы замещения фазы АД, рисунка 5, коэффициент мощности можно определить как отношение соответствующих проводимости:

$$\cos\varphi = \frac{q}{y} = \frac{q_1 + q_{2k} + q_{2s}}{\sqrt{(q_1 + q_{2k} + q_{2s})^2 + (b_1 + b_{2s})^2}} \quad (7)$$

Тогда с учетом формул (5-7) энергетический КПД АД можно записать в виде:

$$\xi = \frac{q_{2s}(q_1 + q_{2k} + q_{2s})}{(q_1 + q_{2k} + q_{2s})^2 + (b_1 + b_{2s})^2} \quad (8)$$

Запишем формулу (8), подставив значения проводимостей АД:

$$\xi = \frac{\frac{R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} \left(\frac{R_0}{R_1^2 + X_0^2} + \frac{R_1 + R_2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} + \frac{R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} \right)}{\left(\frac{R_0}{R_1^2 + X_0^2} + \frac{R_1 + R_2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} + \frac{R_2 \cdot \frac{(1-s)}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} \right)^2 + \left(\frac{X_0}{R_1^2 + X_0^2} + \frac{X_{2k}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2k}^2} \right)^2}. \quad (9)$$

Далее рассмотрим задачу оптимизации целевой функции (9). Нахождение оптимальных условий работы для АД заключается в определении частоты сети и скольжения обеспечивающих экстремальное (максимальное) значение целевой функции $\xi = f(f_i, s_i)$. Определим значение скольжения ротора в экстремальных точках пользуясь аналитическим методом исследования функции, приравняв первую производную выражения (9) нулю:

$$\frac{d(\xi)}{ds} = 0. \#$$

Авторами определена зависимость критического скольжения энергетического КПД АД от частоты питающей сети и параметров схемы замещения:

$$s_{\xi} = \frac{R_2(-R_0 X_{2k} + R_1 X_0 + \sqrt{R_0^2 X_{2k}^2 + R_1^2 X_{2k} X_0 + X_0^3 X_{2k} + X_0^2 X_{2k}^2})}{2R_0 R_1 X_{2k} + (X_0 X_{2k} - R_1^2)(X_0 + X_{2k})}. \quad (10)$$

В результате решения задачи оптимизации потерь в АД получена зависимость частоты питающей сети на базе двигателя АИР100S4 от скольжения, при условии минимума потерь в обмотках статора и ротора, приведена на рисунке 7.

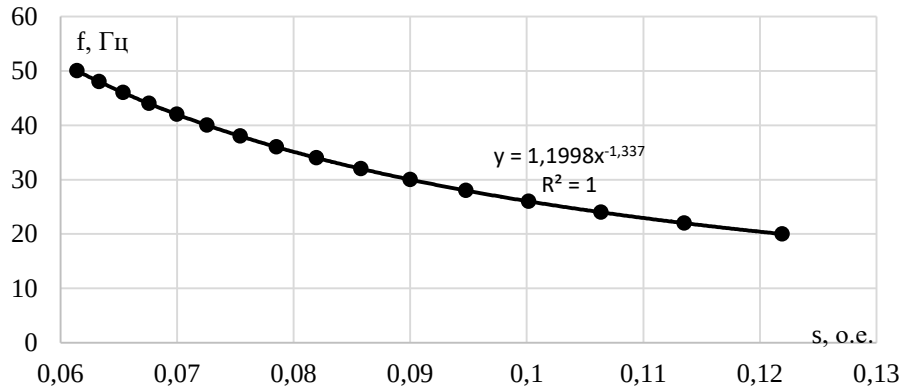


Рис.7.Зависимость частоты от скольжения для АД АИР100S4 при оптимизации режима по минимуму потерь

Fig. 7. Dependence of frequency on slip for AC100S4 when optimizing the mode by minimizing losses

Оптимизация режима работы АД с короткозамкнутым ротором по минимуму полных потерь, путем обеспечения экстремума функции энергетического КПД. К особенности рассмотренного способа оптимизации режимов работы АД следует отнести зависимость $\xi(f_i, s_i)$, к изменению параметров асинхронного двигателя и, прежде всего, к изменениям соотношения активного и реактивного тока, что непосредственно определяет изменения энергетических показатели асинхронного электропривода. Полученные в ходе исследования зависимости активных и реактивных составляющих токов фазы АД, в функции скольжения, могут быть использованы проектными организациями для выбора закона частотного управления при проектировании асинхронного электропривода.

Приведенная зависимость, рисунок 7, иллюстрирует следующий физический смысл: наилучшее значения показателя энергетической эффективности АД с короткозамкнутым ротором, наблюдается при оптимальном скольжении для расчетной частоты питания. Для АД АИР100S4 расчетное значение оптимального скольжения $s_{\xi} =$

0,061 при частоте 50Гц при оптимизации режима по минимуму потерь.

Выводы

1. Для решения задачи по оптимизации режимов работы АД с короткозамкнутым ротором определена целесообразность определения активных и реактивных составляющих тока фазы. В качестве решения, предложено использовать схему замещения фазы АД, выраженную через проводимости, что позволит идентифицировать активные и реактивные составляющие тока статора и ротора АД.

2. Оценка эффективности работы двигателя, для предложенной схеме замещения, определяется отношением произведения активных проводимостей цепи ротора и суммарной активной проводимости фазы к квадрату полной проводимости фазы АД, что соответствует минимальным активным потерям в обмотках двигателя.

3. Наилучшее значения показателя энергетической эффективности АД с короткозамкнутым ротором, наблюдается при оптимальном скольжении, найденному по выражению (10), для расчетной частоты питания. Для двигателя АИР100S4 расчетное значение скольжения $s_{\xi} = 0,061$ при частоте 50Гц, из условия обеспечения максимального значения энергетического КПД АД. Предложенный в работе способ позволяет уменьшить потери активной мощности на 3-5% в обмотках двигателя.

Литература

1. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
2. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. 256 с.
3. Сабинин Ю.А., Грузов В.Л. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 126 с.
4. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974. 328 с.
5. Сандлер А.С. Частотное управление асинхронными двигателями / А. С Сандлер, Р. С. Сарбатов. М.: Энергия, 1966. 144 с.
6. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Экстремальное управление электрическими двигателями. Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 2006. 420 с.
7. Макаров В. Г. Оптимальное управление токами трехфазного асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2011. – № 3-4. – С. 91-98.
8. Бурков А.Ф., Юрин В.Н., Аветисян В.Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. No 9-10. С. 92-100.
9. Kosmodamianskii A. S., Vorobev V. I., Pugachev A. A. Induction motor drives with minimal power losses // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83. – No 12. – pp. 667-671.
10. Макаров В. Г., Яковлев Ю. А. Оценивание параметров трехфазного асинхронного двигателя // Вестник Казанского технологического университета. 2010. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenivanie-parametrov-trehfaznogo-asinhronnogo-dvigatelya> (дата обращения: 22.06.2022).
11. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Яковлев Ю.А., Ханнанова В.Н. Адаптивная система идентификации параметров трехфазного асинхронного двигателя. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016;(1-2). С. 90-99.
12. Бойко Е.П., Ковалев Ю.М. и др. Асинхронные двигатели общего назначения / Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
13. Васильев Д.А., Дресвянникова Е.В., Пантелеева Л.А., Носков В.А. Разработка математической модели асинхронной машины по М-образной схеме замещения в пакете Simulink // Вестник НГИЭИ. 2018. № 4 (83). С. 38-54.
14. Vasiliev D. A., Panteleeva L. A., Lekomcev P. L. [et al.]Improving the efficiency of a variable frequency asynchronous electric drive // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : The proceedings of the conference AgroCON-2019, Kurgan, 18–19 апреля 2019 года. – Kurgan: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 012120. – DOI 10.1088/1755-1315/341/1/012120.
15. Vasilyev D. A., Gavrilov R. I., Panteleeva L. A. Energy-efficient variable frequency asynchronous electric drive // Journal of Physics: Conference Series : International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021), Novorossiysk, 15–16 июня 2021 года / IOP Publishing. – Novorossiysk: IOP PUBLISHING LTD, TEMPLE CIRCUS, TEMPLE WAY, BRISTOL, ENGLAND, BS1 6BE, 2021. – P. 012053. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012053.
16. Васильев Д.А., Пантелеева Л.А. Энергосберегающий режим работы

асинхронного электропривода с частотным управлением // Сельский механизатор. – 2021. – № 7. – С. 19-21.

17. Васильев Д.А., Васильев Л.А., Пантелеева В.А., и др. Исследование частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в лабораторных условиях // В сборнике: Научно обоснованные технологии интенсификации сельскохозяйственного производства. Материалы Международной научно-практической конференции в 3-ех томах. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ижевская государственная сельскохозяйственная академия". 2017. - С. 235-237.

Авторы публикации

Васильев Даниил Александрович - старший преподаватель кафедры «Электротехники, электрооборудования и электроснабжения» Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

Пантелеева Лариса Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехники, электрооборудования и электроснабжения» Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Bulgakov AA. *Frequency control of asynchronous motors*. M.: Energoizdat, 1982. 216 p.
2. Braslavsky IYa, Ishmatov ZSh, Polyakov VN. *Energy-saving asynchronous electric drive*. M.: Academy, 2004. 256 p.
3. SabininYuA, Gruzov VL. *Frequency-controlled asynchronous electric drives*. Leningrad: Energoatomizdat, 1985. 126 p.
4. Sandler AS, Sarbatov RS. *Automatic frequency control of asynchronous motors*. M.: Energy, 1974. 328 p.
5. Sandler AS, Sarbatov RS. *Frequency control of asynchronous motors*. M.: Energy, 1966. 144 p.
6. Polyakov VN, Shreiner RT. *Extreme control of electric motors*. Ekaterinburg: USTU - UPI, 2006. 420 p.
7. Makarov V.G. *Optimal current control of a three-phase asynchronous motor*. *Energy problems*. 2011(3-4):91-98.
8. Burkov AF, Yurin VN, Avetisyan VR. Investigation of the possibilities of increasing the energy efficiency of asynchronous motors. *Izvestiya of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2018;20(9-10):92-100.
9. Kosmodamianskii AS, Vorobev VI, Pugachev AA. Induction motor drives with minimal power losses. *Russian Electrical Engineering*. 2012;83(12):667-671.
10. Makarov VG, Yakovlev Yu. A. Estimation of the parameters of a three-phase asynchronous motor. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2010. No. 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenivanie-parametrov-trehfaznogo-asinhronnogo-dvigatelya> (date of access: 06/22/2022).
11. AfanasievAYu, Makarov VG, Yakovlev YuA. Adaptive system for identification of parameters of a three-phase asynchronous motor. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2016;(1-2):90-99.
12. Boyko EP, KovalevYuM. et al. *General purpose asynchronous motors* / Ed. V.M. Petrov and A.E. Kravchik. M.: Energy, 1980. 488 p.
13. Vasil'ev DA, Dresvyannikova EV, Panteleeva LA, et al. Development of a mathematical model of an asynchronous machine according to the M-shaped equivalent circuit in the Simulink package. *Vestnik NGIEI*. 2018;4 (83):38-54.
14. Vasiliev DA, Panteleeva LA, Lekomcev PL, et al. *Improving the efficiency of a variable frequency asynchronous electric drive*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: The proceedings of the conference AgroCON-2019, Kurgan, April 18–19, 2019. Kurgan: IOP Publishing Ltd, 2019. P. 012120. - doi 10.1088/1755-1315/341/1/012120.
15. Vasilyev DA, Gavrillov RI, Panteleeva LA. Energy-efficient variable frequency asynchro-nous electric drive. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021)*, Novorossiysk, June 15–16, 2021 / IOP Publishing. Novorossiysk: IOP PUBLISHING LTD, TEMPLE CIRCUS, TEMPLE WAY,

BRISTOL, ENGLAND, BS1 6BE, 2021. P. 012053. doi 10.1088/1742-6596/2061/1/012053.

16. Vasiliev DA, Panteleeva LA. Energy-saving mode of operation of an asynchronous electric drive with frequency control. *Rural mechanic*. 2021;7:19-21.

17. Vasiliev DA, Vasiliev LA, Panteleeva VA. Noskov Study of frequency-controlled asynchronous electric drives in laboratory conditions. *In the collection: Science-based technologies for the intensification of agricultural production*. Materials of the International scientific-practical conference in 3 volumes. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Izhevsk State Agricultural Academy». 2017. pp. 235-237.

Authors of the publication

Daniil A. Vasilyev – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

Larisa A. Panteleeva – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

14.11.2022г.

Отредактировано

21.11.2022г.

Принято

28.11.2022г.



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АКТИВНО-АДАПТИВНОЙ СЕТИ

Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
novokreshchenov.vv@kgeu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Провести анализ влияния устройств продольной компенсации на режимы работы линий электропередачи. Выявить проблемы функционирования комплексов релейной защиты и автоматики при применении их на линиях электропередачи с устройством продольной компенсации. МЕТОДЫ. Проводится анализ литературных данных и данных международного информационного обмена. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены основные элементы электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью; раскрыто текущее состояние дел по применению элементов активно-адаптивной сети в Единой энергетической системе России, а также перспективы дальнейшего внедрения этих элементов в Единую энергетическую систему Российской Федерации. Показана область применения устройств продольной компенсации индуктивного сопротивления для их размещения на линиях электропередачи, и оптимальные расстояния между устройствами продольной компенсации, а также оптимальные параметры ёмкостного сопротивления относительно сопротивления сети. Раскрыты проблемы функционирования разных видов релейной защиты и автоматики на линиях электропередачи с устройством продольной компенсации. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование на линии устройства для продольной компенсации реактивного сопротивления создаёт проблемы функционирования для всех видов устройств релейной защиты и автоматики, а именно: токовой, дистанционной, дифференциальной и автоматики повторного включения. В настоящий момент для перечисленных типов и видов защит имеются научные наработки по решению указанных проблем с присущими им достоинствами и недостатками. Наиболее остро эти недостатки обозначены у дифференциальной релейной защиты.

Ключевые слова: активно-адаптивные сети; FACTS; УПК; ЛЭП; релейная защита.

Для цитирования: Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. Современное состояние проблем функционирования комплексов релейной защиты и автоматики, применяемых в активно-адаптивной сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 102-123. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123.

CURRENT STATE OF THE PROBLEMS OF FUNCTIONING OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION COMPLEXES USED IN AN ACTIVE ADAPTIVE NETWORK

IYu. Ivanov, VV. Novokreshchenov, VR. Ivanova

Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia
novokreshchenov.vv@kgeu.ru

Abstract: THE PURPOSE. To analyze the influence of series compensation devices on the operating modes of power transmission lines. To identify problems of functioning of relay protection and automation complexes when they are used on power transmission lines with a series compensation device. METHODS. The analysis of literature data and data of international information exchange is carried out. RESULTS. The study describes the relevance of the topic, considers the main elements of an electric power system with an active adaptive network; reveals the current state of affairs on the use of elements of an active adaptive network in the Unified Energy System of Russia, as well as prospects for further implementation of these elements in the

Unified Energy System of the Russian Federation. The study shows the scope of application of series compensation devices with the inductive resistance for their placement on power transmission lines, and the optimal distance between series compensation devices, as well as the optimal parameters of the capacitive resistance relative to the resistance of the network. The study discloses problems of functioning of various types of relay protection and automation on power transmission lines with a series compensation device. CONCLUSION. The use of a reactance series compensation device on the line causes problems of functioning for all types of relay protection and automation devices, namely: current, remote, differential and reclosing automation. At the moment, for the listed types and kinds of protection, there are scientific developments to solve these problems with their inherent advantages and disadvantages. The study indicates the most acute disadvantages of the differential relay protection.

Key words: active adaptive network; FACTS; series compensation devices; power transmission lines; relay protection

For citation: Ivanov IYu., Novokreshchenov VV., Ivanova VR. Current state of the problems of functioning of relay protection and automation complexes used in an active adaptive network. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):102-123. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123.

Введение

В конце 20-го века в связи с развитием силовой электроники за рубежом стали появляться отдельные технические решения, направленные на решения задач по повышению «гибкости» электроэнергетических систем. Предпосылками для этого послужил ряд нерешённых проблем в электроэнергетике, существующих на тот момент, например, повышение динамической устойчивости ЭЭС, повышение пропускной способности ЛЭП, оптимальное управление потокораспределением передаваемой электрической мощности и т.д. По мере увеличения качества и количества этих технических решений это направление получило единый вектор под названием FACTS, что в дословном переводе означает «гибкие системы передачи переменного тока». В нашей стране для обозначения этих систем был введён термин «активно-адаптивные сети».

По мере реализации активно-адаптивных сетей на практике, а так же на стадии проектирования стали выявляться проблемы с устойчивостью функционирования устройств релейной защиты и автоматики в этих сетях. В основном эти проблемы обусловлены изменчивостью параметров активно-адаптивной сети. Но, как известно, во всех правилах есть исключения. В качестве такового примера могут послужить устройства регулирования параметров сети, подключаемые в сети последовательно, – продольные компенсаторы, которые даже в статическом режиме работы вносят погрешности в правильную работу РЗА. При этом их динамическое изменение не вносит дополнительной погрешности в работу некоторых защит, в частности дифференциальной защиты линии.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в настоящее время проработка алгоритмов функционирования устройств релейной защиты и автоматики в условиях внедрения в электроэнергетической системе элементов активно-адаптивной сети представляется недостаточной, отсутствует теоретическая база для принятия обоснованных решений в части релейной защиты и автоматики для полноценной интеграции элементов активно-адаптивной сети в состав электроэнергетической системы [1].

Целью настоящей работы является теоретическое обобщение научной проблемы, связанной с функционированием комплексов релейной защиты и автоматики, применяемых в активно-адаптивной сети.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Рассмотрение основных элементов электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью и определение наиболее востребованной для Российской Федерации FACTS-технологии.
2. Анализ проблем функционирования комплексов релейной защиты и автоматики при применении их на линиях электропередачи с устройством продольной компенсации.
3. Определение перспективных направлений совершенствования алгоритмов функционирования устройств релейной защиты продольно-компенсированных линий электропередачи.

Литературный обзор

Элементы активно-адаптивной сети можно разделить на следующие группы [2]:

- 1) Устройства регулирования (компенсации) реактивной мощности и напряжения, подключаемые к сетям параллельно, – поперечные компенсаторы.
- 2) Устройства регулирования параметров сети (сопротивление сети), подключаемые в сети последовательно, – продольные компенсаторы.
- 3) Устройства, сочетающие функции первых двух групп, – устройства продольно-поперечного включения или комбинированные компенсаторы.
- 4) Устройства ограничения токов КЗ.
- 5) Накопители электрической энергии.
- 6) Преобразователи рода тока.

Первые три группы устройств относятся к технологии управляемых систем электропередачи переменного тока – *FACTS*. Отдельные типы устройств и технологии *FACTS* используются также в группах устройств 4, 5 и 6 [3]. *FACTS* — это аббревиатура от *Flexible AC Transmission System*, используемая *Electric Power Research Institute (USA, California)* (далее *EPRI*) в своей научно-технической литературе, начиная с 1987 года. В основе технологии регуляторов *FACTS* используются силовые полупроводники, которые обеспечивают более быструю реакцию по сравнению с системами, использующими электромеханическую базу.

До появления систем *FACTS* альтернатива силовой электронике была ограничена системами *SVC* (аббревиатура от английских слов *Static Var Compensator*), которые в основном использовались для контроля напряжения на промышленных объектах [4]. Нефтяные эмбарго 1974 и 1979 годов резко изменили ситуацию, потому что высокая стоимость нефти повлияла на стоимость электроэнергии в районах, которые получали питание от электростанций, использующих в качестве топлива нефтепродукты. Гораздо более высокая стоимость энергии также привела к тому, что стоимость стали, произведенной с помощью старых, энергонеэффективных сталелитейных технологий, используемых в США, стала неконкурентоспособной по сравнению с более энергоэффективными сталелитейными заводами в других странах. В результате производство стали в США было остановлено. Наряду с нефтяными электростанциями, себестоимость электроэнергии на которых стала существенно дороже, в США на среднем западе на тот момент так же эксплуатировались и угольные электростанции, в избыточном количестве производившие по себестоимости более дешёвую электроэнергию. Отсюда была выдвинута идея организовать передачу электроэнергии по существующим электрическим связям таким образом, чтобы более дешёвая электроэнергия от угольных станций поставлялась в районы, где электрическая энергия значительно подорожала. Это потребовало бы огромного количества оборудования для компенсации реактивной мощности, а также добавления систем, которые можно было бы использовать для увеличения потоков мощности в цепях высокого напряжения. Также потребовались бы средства для обработки сбоев или нарушений в системе, если какая-либо линия высокой мощности будет отключена, чтобы системные аварийные ситуации не могли привести к коллапсу энергосистемы. Это привело к разработке амбициозного плана *EPRI* по разработке технологий, которые можно использовать для управления потоками активной мощности в системе переменного тока, а также для управления реактивной мощностью, генерируемой потоками высокой мощности на существующих линиях переменного тока. Идея заключалась в том, чтобы по максимуму использовать имеющуюся термическую пропускную способность существующих линий электропередачи для перетока мощности из регионов с избыточной мощностью в регионы со спросом на более дешёвую электроэнергию. Так возник проект *EPRI* по разработке гибкой системы передачи переменного тока (*FACTS*) куда так же вошли уже существующие системы *SVC*.

Как уже упоминалось выше, первыми устройствами *FACTS* стали статические компенсаторы реактивной мощности (*SVC*), которые были разработаны в 1970-х годах для решения проблем динамического поддержания уровня напряжения в узлах электрической сети на строго заданном уровне. Первым экспериментальным применением системы *SVC* был совместный проект *EPRI, Minnesota Power & Light (USA, Minnesota)* и *Westinghouse (USA, Pennsylvania)*, введенный в эксплуатацию в 1978 году. Система, установленная *MP&L* на подстанции *Shannon (USA, Minnesota)*, позволила увеличить мощность, передаваемую от Манитобы до Миннесоты на 80 МВт (с 320 до 400 МВт). На тот момент системы *SVC* представляли собой 3 разновидности: реактор с тиристорным переключением, реактор с тиристорным управлением и конденсатор с тиристорным переключением (см. рис. 1), общей чертой которых являлось использование тиристоров как управляющих элементов, посредством которых осуществлялось подключение реакторов или конденсаторов к сети (несмотря на то, что впоследствии появились и другие статические устройства компенсации

реактивной мощности, использующие элементы силовой электроники, исторически так сложилось, что за термином SVC так и остались только три этих устройства).

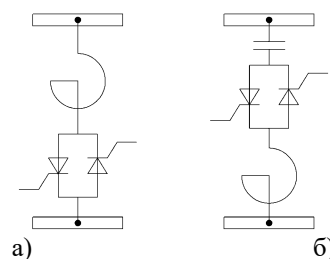


Рис. 1. Статические компенсаторы реактивной мощности: а – реактор с тиристорным переключением (или управлением); б – конденсатор с тиристорным переключением. Однолинейная принципиальная электрическая схема

Fig.1. Static Var Compensator (SVC): а – Thyristor-Switched (-Controlled) Reactor; б – Thyristor-Switched Capacitor

Реакторы с тиристорным переключением (или управлением) применялись и применяются для регулируемого поглощения реактивной мощности. Они представляют собой реактор, подключённый к шинам подстанции параллельно потребителю через управляемые полупроводниковые элементы – тиристоры [5, 6]. Отличие реактора с тиристорным переключением от реактора с тиристорным управлением заключается в способе управления полупроводниками: у реактора с тиристорным переключением регулирование осуществляется дискретно, путём открытия тириستоров при угле напряжения 90° (полностью включено) или 180° (полностью выключено) [7]; у реактора с тиристорным управлением регулирование осуществляется путём изменения угла открытия тиристоров [8, 9].

Для компенсации дефицита реактивной мощности применяется конденсатор с тиристорным переключением (см. рис. 1 б) который представляет собой электрическую ёмкость, подключённую к сети параллельно через тиристорный ключ. Коммутация конденсатора осуществляется дискретно — либо полностью включено, либо полностью отключено. Для ограничения токов коммутации в схеме дополнительно используется токоограничивающий реактор [10, 11].

По мере совершенствования силовой электронной базы стало возможным появление такой разновидности поперечных компенсаторов как STATCOM — статического компенсатора. Первые промышленные заделы на этом поприще использовали GTO (от англ. *Gate Turn-Off* – тиристор с запираемым затвором) и IGCT-тиристоры (от англ. *Integrated Gate-Commutated Thyristor* – тиристор с коммутируемым затвором). Однако с конца 1990-х годов биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) начали достигать технического совершенства современного уровня, что послужило причиной замены элементной базы статических компенсаторов с тиристорной на транзисторную [12]. Таким образом, современный статический компенсатор представляет собой статическое высоковольтное электронное устройство осуществляющее компенсацию реактивной мощности, путём циркуляции переменного тока с регулируемым опережающим или отстающим углом за счёт высокоскоростного переключения транзисторов методом широтно-импульсной модуляции (см. рис. 2).

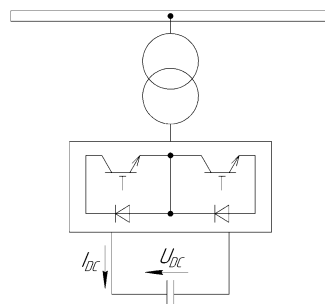


Рис. 2. Статический синхронный компенсатор. Схема электрическая принципиальная однолинейная

Fig.2. Static Synchronous Compensator (STATCOM)

Примерно в то же время, а именно в 1999 году, в современном виде появилась на свет ещё одна разновидность поперечных компенсаторов – магнитоуправляемый шунтирующий реактор (МШР). Он представляет собой мощное трехфазное продолжение магнитного усилителя с встречно-параллельным соединением обмоток управления, как показано на рис. 3. Шунтирующий реактор с магнитным управлением имеет стальной магнитопровод и две обмотки. Одна из обмоток, а именно силовая обмотка, подключена к электрической сети высокого напряжения ($U_{ВН}$), а вторая обмотка, обмотка управления, подключена к источнику постоянного напряжения регулируемой величины (U_y). Силовая и управляющая обмотки соединены встречно-параллельно, и два сердечника не имеют прямой электромагнитной связи [13].

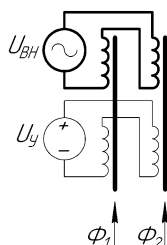


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема одной фазы шунтирующего реактора с магнитным управлением

Fig.3. Magnetically controlled electrical reactor phase

Обмотка управления питается от выпрямителя, управляемого силовой электроникой, обеспечивающего регулируемый постоянный ток намагничивания. Принцип работы реактора основан на создании управляющей обмоткой постоянного подмагничивающего потока управляемой величины, который смещает переменный поток в область насыщения кривой намагничивания, что приводит к изменению индуктивности устройства.

Управляемые шунтирующие реакторы, будучи российской разработкой, доказали свою эффективность в повышении надежности сети Единой энергетической системы (ЕЭС) России благодаря их способности нормализовать условия работы линий электропередачи и генераторов. Внедрение МШР началось в 1997 году, когда был изготовлен его опытный образец в варианте РТУ-25000/110-У1. В 1998 году он прошел комплексные испытания и, впоследствии, поступил в опытную эксплуатацию на полигоне ВЭИ НТЦ в Тольятти. После этого реактор был отправлен в Северные электрические сети, Пермэнерго (Российская Федерация) и установлен на ПС 110 кВ «Кудымкар». В сентябре 1999 года он был введен в эксплуатацию вместе с существующими статическими шунтирующими конденсаторами емкостью 52 МВАр. Это был первый успешный опыт промышленной эксплуатации МШР.

МШР (110 кВ 25 000 кВА), установленный на подстанции «Кудымкар» Пермэнерго, эксплуатируется уже более 22 лет (Брянцев и др., 2006). Фактически был реализован управляемый источник реактивной мощности с параллельным включением МШР и конденсаторной батареи для обеспечения плавного регулирования реактивной мощности как в режиме поглощения (в пределах номинальной мощности реактора), так и в режим генерации (в пределах номинальной мощности конденсаторов).

К настоящему времени в России и некоторых других странах (Казахстане, Белоруссии, Литве, Анголе) введено в эксплуатацию большое количество управляемых шунтирующих реакторов общей мощностью более 8000 МВАр. Большинство МШР общей мощностью более 6200 МВАр установлено в России.

Ограничения возможности передачи электроэнергии в системе переменного тока могут быть также устранены путем включения конденсаторов последовательно с воздушной линией передачи. Одним из первых крупных применений емкостной последовательной компенсации была система передачи 400 кВ, построенная в конце 1940-х годов для передачи мощности от гидроэлектростанций в Северной Швеции к центрам нагрузки в средней и южной частях страны [14]. В начале 1950-х годов, в нашей стране в связи с сооружением гигантских гидроэлектростанций на Волге — Куйбышевской ГЭС и Сталинградской ГЭС для передачи их мощности в Москву были построены две двухцепные линии электропередачи, проектной мощностью по 1 000...1 200 тыс. кВт каждая. Для обеспечения столь высокой пропускной способности каждая цепь каждой линии была снабжена 4-мя равномерно распределёнными по длине линии устройствами продольной компенсации (далее УПК).

В 1960-х годах коммутируемая схема последовательной компенсации была применена в системе 500 кВ *Pacific AC Intertie (USA)* для решения аварийных ситуаций, таких как отключение одной из двух параллельных линий переменного тока, используемых для соединения энергосистем между гидроэлектростанциями вдоль реки Колумбия на северо-западе страны и электроэнергетическими системами на севере и юге Калифорнии. Данная инновация позволяла восполнить пропускную способность в этой межсистемной связи, когда отключалась одна из линий. Эта система также использовалась для увеличения потоков мощности по линиям переменного тока в случае отключения линии постоянного тока высокого напряжения, проходящей параллельно.

В марте 1970 года на смену УПК работающим на ЛЭП Куйбышев – Москва, которые были демонтированы вместе с линией из-за пуска в европейской части страны атомных электростанций, пришло новое нерегулируемое устройство продольной компенсации мощностью 576 МВАр. Оно было использовано для увеличения пропускной способности существующей линии электропередач 500 кВ Братск-Иркутск, что позволило отказаться от строительства второй цепи этой линии.

Как и любое техническое решение, врезка в линию устройств продольной компенсации помимо достоинств обладает также и недостатками. Одним из этих недостатков является возможность появления подсинхронного электромеханического резонанса турбогенераторов, приводящего к поломке валов их роторов. Данное явление впервые проявило себя в начале 1970-х годов на генераторах *Mohave Power Station (USA, Nevada)* [15]. Данный факт в последующем воспрепятствовал широкому применению последовательных конденсаторов в регионах с крупными паротурбинными электростанциями. Однако можно предотвратить возникновение подсинхронных колебаний, если ввести достаточное демпфирование колебательных мод в подсинхронной области частот. Эта проблема также поспособствовала появлению управляемых устройств продольной компенсации.

На сегодняшний день существует четыре разновидности управляемых УПК: последовательный конденсатор с тиристорным переключением, последовательный конденсатор с управлением на запираемом тиристоре, последовательный конденсатор с тиристорным управлением и статический синхронный продольный компенсатор. Последовательный продольный компенсатор представляет собой конденсатор неизменной емкости, шунтированный тиристорным переключателем, который включаясь, шунтирует ёмкость C , таким образом, исключая её влияние на сеть (см. рис. 4) [16].

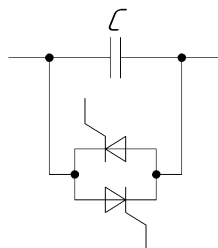


Рис. 4. Последовательный конденсатор с тиристорным переключением (односекционный)

Fig.4. Thyristor-Switched Series Capacitor (TSSC)

Для ступенчатого регулирования такие конденсаторы включаются в последовательную цепочку (см. рис. 5).

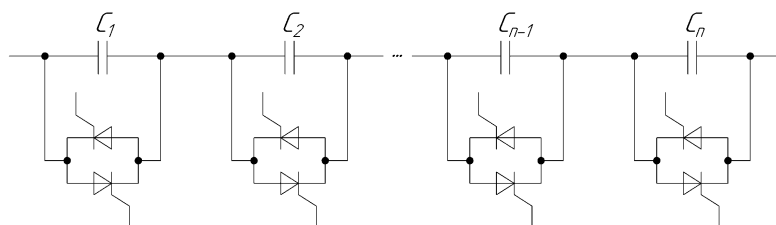


Рис. 5. Последовательный конденсатор с тиристорным переключением (многосекционный)

Fig.5. Multisection TSSC

Последовательный конденсатор с управлением на запираемом тиристоре состоит из тех же элементов, что и последовательный (продольный) конденсатор (добавочная ёмкость) с тиристорным переключением, изображённый на рисунке 4 с тем лишь отличием, что позволяет плавно регулировать подключаемую ёмкость за счёт угла открытия тиристора

[17, 18], что позволяет его использовать так же и для демпфирования колебаний в энергосистеме, в том числе для подавления подсинхронного резонанса.

Последовательный (продольный) конденсатор (добавочная емкость) с тиристорным управлением представляет собой устройство для плавного (бесступенчатого) регулирования сопротивления сети (см. рис. 6) [19].

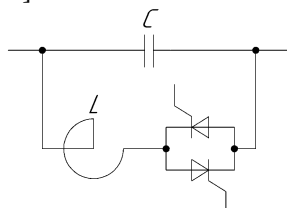


Рис. 6. Последовательный конденсатор с тиристорным управлением

Fig.6. Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC)

Помимо этого, за счёт имеющейся индуктивности L , он позволяет регулировать сопротивление линии электропередачи как в меньшую так и в большую сторону. Это может быть востребовано для управления потоками активной мощности в энергосистеме. Однако, его применение ограничено существенным недостатком – невозможностью плавного перехода между емкостным и индуктивным режимами работы. Этому недостатка лишён статический синхронный продольный компенсатор (см. рис. 7). При подключении внешнего накопителя он также способен подпитывать линию активной мощностью [20, 21].

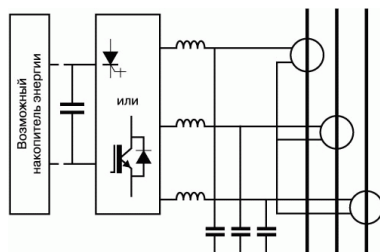


Рис. 7. Статический синхронный продольный компенсатор. Схема электрическая принципиальная

Fig.7. Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

Достижение поперечным и продольным статическими синхронными компенсаторами технической зрелости позволило объединить эти два устройства в одно, тем самым объединив их достоинства и частично нивелируя недостатки. Так появилось устройство под названием унифицированный регулятор потокораспределения мощности. Как уже было проанонсировано выше, оно состоит из двух статических синхронных компенсаторов – поперечного и продольного, соединённых между собой посредством звена постоянного тока (см. рис. 8) [22, 23]. Такой симбиоз обеспечивает комплексный подход к увеличению пропускной способности линии электропередачи [24, 25].

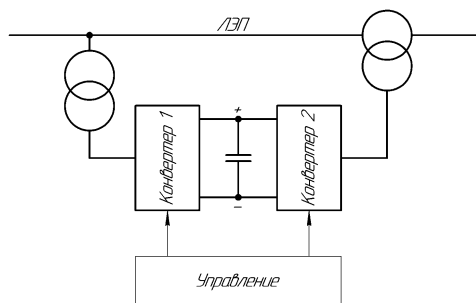


Рис. 8. Унифицированный регулятор потокораспределения мощности

Fig.8. Unified Power Flow Controller (UPFC)

Возможно для некоторых применений более дешёвым аналогом может оказаться устройство под названием Межлинейный регулятор потокораспределения мощности. Он предназначен для распределения активной и реактивной мощности между параллельными

линиями [26, 27]. Представляет собой несколько SSSC-устройств (статических синхронных продольных компенсаторов) объединённых через звено постоянного тока (см. рис. 9) [28, 29].

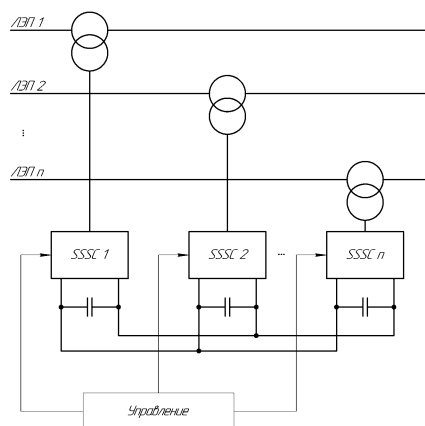


Рис. 9. Межлинейный регулятор
потокораспределения мощности

Fig.9. Interline Power Flow Controller (IPFC)

Отметим, что использование нерегулируемых устройств продольной компенсации приводит к увеличению токов короткого замыкания, что является серьезной проблемой для подавляющего большинства силового оборудования. Как было сказано в начале этого раздела, отдельные типы устройств и технологии FACTS, так же используются для задач ограничения токов КЗ. Перечислим наиболее популярные из них.

Для ограничения токов короткого замыкания используются следующие методы:

- метод оптимизации структуры и параметров сети (схемные решения);
- метод оптимизации режима заземления нейтралей элементов электрических сетей;
- стационарного или автоматического деления сети;
- использования токоограничивающих устройств;
- изменения схем электрических соединений обмоток трансформаторов и автотрансформаторов.

В качестве средства ограничения токов короткого замыкания, соответственно, используются или могут быть использованы:

- устройства автоматического деления сети;
- токоограничивающие реакторы;
- трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения;
- трансформаторы с повышенным напряжением КЗ;
- безынерционные токоограничивающие устройства различного типа (резонансные, реакторно-вентильные, со сверхпроводящими элементами и т.п.);
- токоограничивающие коммутационные аппараты;
- токоограничивающие резисторы;
- автотрансформаторы, нормально выполненные без третичной обмотки, соединенной в треугольник;
- разземление нейтралей части трансформаторов;
- заземление нейтралей части трансформаторов и автотрансформаторов через реакторы, резисторы или иные токоограничивающие устройства;
- замена на связях распределительных устройств различного напряжения автотрансформаторов на трансформаторы;
- автоматическое размыкание в аварийных режимах третичных обмоток автотрансформаторов;
- специальные схемы соединения обмоток трансформаторов блоков;
- вставки постоянного тока;
- вставки переменного тока не промышленной частоты.

Из выше перечисленных средств отношение к гибким линиям электропередачи имеют следующие устройства: резонансные безынерционные токоограничивающие устройства, токоограничивающие устройства трансформаторного типа, токоограничивающие устройства реакторно-вентильного типа, вставки постоянного тока.

Работа резонансных токоограничивающих устройств основана на расстройке резонанса при наступлении аварийного режима из-за чего происходит повышение сопротивления цепи и, соответственно, снижение токов короткого замыкания [30]. В настоящее время известно более ста вариантов реализации схемы этих устройств. В схемах с применением FACTS-технологии расстройка резонанса осуществляется за счёт использования силовых полупроводниковых элементов – тиристоров (см. рис. 10).

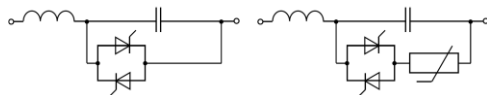


Рис. 10. Схемы резонансных токоограничивающих устройств с использованием FACTS-технологии

Fig.10. Schemes of resonant current-limiting devices using FACTS technology

Основным элементом токоограничивающих устройств трансформаторного типа является трансформатор, первичная обмотка которого включена последовательно, а вторичная замкнута накоротко через тиристоры (см. рис. 11). В случае возникновения короткого замыкания вторичная обмотка размыкается и в первичной цепи возникает эффект токоограничения. Для снижения потерь напряжения в первичной обмотке, во вторичную включают конденсатор (см. рис. 12). Тиристорный ключ в этом случае служит для регулировки сопротивления первичной обмотки, а для ограничения ударных токов служит размыкатель ОТ.

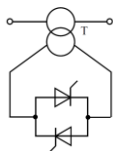


Рис. 11. Токоограничивающее устройство трансформаторного типа (без емкостной компенсации)

Fig.11. Current-limiting device of transformer type (without capacitive compensation)

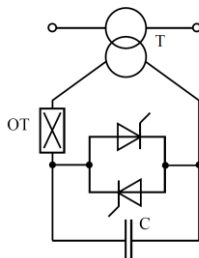


Рис. 12. Токоограничивающее устройство трансформаторного типа (с емкостной компенсацией)

Fig.12. Current-limiting device of transformer type (with capacitive compensation)

Основным элементов токоограничивающих устройств реакторно-вентильного типа является сдвоенный реактор с высоким коэффициентом магнитной связи между половинками ректора. Возможны два основных исполнения этого устройства. На рисунке 13,б изображена схема в которой тиристорный ключ включён только в одну из ветвей реактора. Такое схемное решение позволяет использовать тиристоры с меньшим номиналом по току. При наступлении аварийного режима (короткое замыкание) тиристорный ключ размыкается. При этом во второй ветви возникает значительное токоограничение. Далее короткое замыкание отключается внешним электромеханическим выключателем. В схеме, изображённой на рисунке 13,а тиристорные ключи включаются в обе ветви. Один из них способствует значительному токоограничению во второй ветви, а другой размыкает цепь, когда ток проходит через ноль.

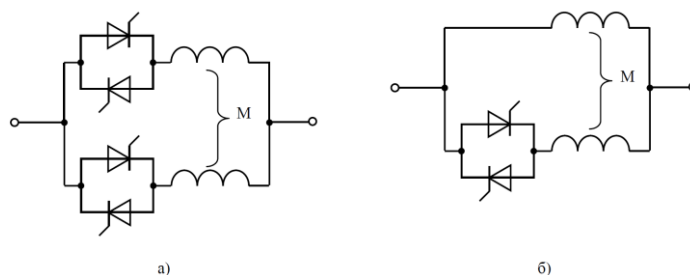


Рис. 13. Схемы токоограничивающих устройств реакторно-вентильного типа

Fig.13. Schemes of current-limiting devices of the reactor-valve type

Для ограничения токов КЗ так же могут использоваться вставки постоянного тока. Они состоят как правило, из следующих элементов (см. рис. 14): выпрямителя В и инвертора И, связанных между собой коротким отрезком линии электропередач W ; для обеспечения гальванической развязки между системами применяются два трансформатора – T_1 (со стороны выпрямителя) и T_2 (со стороны инвертора) [31, 32, 33].

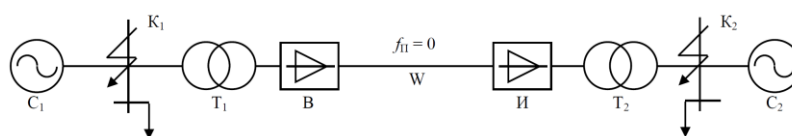


Рис. 14. Пример вставки постоянного тока

Fig.14. High-Voltage Direct-Current Transmission (HVDC)

Подобная система на основе преобразователей тока мощностью 1420 МВт была реализована в 1980-х годах для экспорта электроэнергии из России в Финляндию на подстанции 330/400 кВ Выборгская. Для создания несинхронной связи энергосистем Сибири и Востока, в настоящее время работающих раздельно ООО «НПЦ Энерком-Сервис» разрабатывает оборудование вставки постоянного тока мощностью 200 МВт, которая позволит объединить энергосистему России в единое целое.

Вставки постоянного тока так же позволяют решать задачу увеличения пропускной способности линии электропередачи. В этом случае она представляет собой систему с распределёнными параметрами, т.е. вместо короткого отрезка используется длинная линия электропередачи. В настоящее время известно несколько топологий этого технического решения, а именно существует три типа HVDC-вставок (от англ. *High-Voltage Direct-Current transmission*) [34, 35, 36]:

- однополярная (однополюсная) вставка (рисунок 15);
- двухполярная (двухполюсная) вставка (рисунок 16);
- униполярная вставка (рисунок 17).

Однополярная вставка состоит из одного проводника имеющего, как правило, отрицательную полярность. В качестве обратного проводника может использоваться земля или металлический провод.



Рис. 15. Однополярная вставка HVDC

Fig.15. Monopolar HVDC link

Двухполярная вставка состоит из двух каналов разной полярностью с независимым управлением. При отказе одного из звеньев (выпрямитель или инвертор) данный элемент шунтируется обходными коммутационными аппаратами. Так же в этом случае в качестве обратного проводника может использоваться заземление.

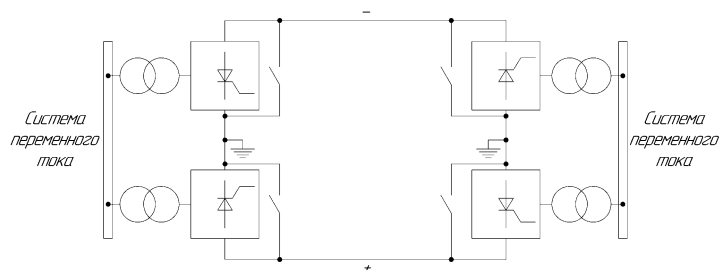


Рис. 16. Двухполярная вставка HVDC

Fig.16. Bipolar HVDC link

Униполярная вставка имеет два или более проводников отрицательной полярности. В качестве обратного провода используется заземление. В случае выхода из строя одного из элементов (выпрямитель, инвертор, провод) их нагрузку берёт на себя другой канал способный передавать мощность выше номинальной [37].

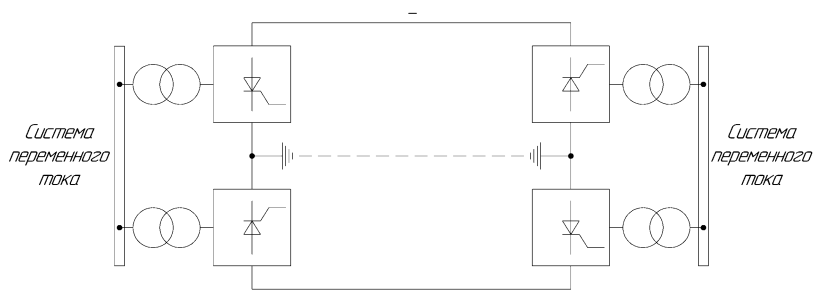


Рис. 17. Униполярная вставка HVDC

Fig.17. Monopolar HVDC link

Доказано, что FACTS-системы работают эффективней, если в их составе используются накопители электрической энергии (например, см. рис. 7). Такими накопителями могут быть:

- аккумуляторные батареи большой энергоемкости (АББЭ);
- накопители энергии на основе молекулярных конденсаторов;
- накопители энергии на основе низкотемпературных (охлаждение жидким гелием) сверхпроводников;
- накопители энергии на основе топливных элементов [38];
- синхронные машины с преобразователями частоты в первичной цепи с маховиками на валу;
- асинхронизированные машины с маховиками на валу.

Наиболее перспективными считаются электростатические накопители (первые четыре пункта) так как они потенциально могут запасать большее количество энергии при меньших затратах (при соответствующем развитии технологии). Кроме того, они лишены вращающихся и трущихся частей, а эксплуатационные издержки по сравнению с электромашинными накопителями (последние два пункта) в перспективе будут стремиться к нулю. К сожалению в России в качестве задела по этому направлению имеется только лишь эскизный проект маховикового накопителя на основе асинхронизированной машины вертикального исполнения мощностью 200 МВт.

Материалы и методы

Методы исследования основаны на положениях системного анализа, теоретической электротехники, теоретических основ релейной защиты. По данным открытой печати и обсуждений проводится анализ влияния устройств продольной компенсации на режимы работы линий электропередачи. При исследовании проблем функционирования комплексов релейной защиты и автоматики компенсированной ЛЭП рассматривается теоретическая модель продольно-компенсированной электрической сети.

Схема модели продольно-компенсированной электрической сети (рис. 18) включает в себя:

- 1) идеальные источники трёхфазного синусоидального напряжения;
- 2) идеальные конденсаторы C ;
- 3) секции воздушной ЛЭП;

4) точки КЗ в различных участках продольно-компенсированной электрической сети.

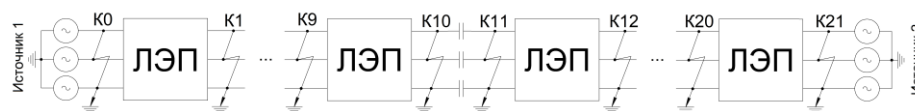


Рис. 18. Схема модели продольно-компенсированной электрической сети

Fig.18. Scheme of the series-compensated electrical network model

Согласно теоретическим основам электротехники, 100% компенсация продольного индуктивного сопротивления контура достигается тогда, когда последовательно включённые индуктивное и ёмкостное сопротивление равны (по модулю) между собой, т.е. когда:

$$|X_L| = |X_C| \quad (1)$$

$$|j\omega L| = \left| \frac{1}{j\omega C} \right|, \quad (2)$$

где X_L – индуктивное сопротивление, X_C – ёмкостное сопротивление, j – мнимая единица, ω – угловая частота, L – индуктивность, C – ёмкость.

Так как за счёт того, что индуктивное и ёмкостное сопротивление имеют разные знаки, при их последовательном сложении результирующее сопротивление равно нулю. Соответственно, когда их модули неравны, происходит либо неполная компенсация (недокомпенсация), либо перекомпенсация (когда ёмкостное сопротивление больше индуктивного).

Основные результаты и обсуждение

В рамках изложенного выше литературного обзора можно сделать вывод, что в нашей стране (в Российской Федерации) в контексте FACTS-технологий сделан хороший задел относительно управляемых устройств поперечной компенсации. Применение других известных FACTS-технологий имеется только в планах. На наш взгляд, ввиду большой протяжённости нашей страны наиболее востребованными для России FACTS-технологиями являются УУПК и HVDC. Это подтверждается опубликованными планами на сайте ФСК ЕЭС [39, 40]. При этом из этих двух технологий наибольшее предпочтение отдаётся именно УУПК как более дешёвой технологии увеличения пропускной способности ЛЭП.

Как уже было сказано ранее установка на линии электропередач устройств продольной компенсации позволяет решить следующие проблемы:

- 1) увеличение пропускной способности линии за счёт компенсации индуктивного сопротивления;
- 2) повышение статической и динамической устойчивости между системами за счёт демпфирования электромеханических колебаний (в случае применения управляемого УПК);
- 3) управление потоками активной мощности нескольких параллельных линий (в случае применения управляемого УПК хотя бы на одной из линий).

Как правило, установка устройств продольной компенсации целесообразна на линиях с соотношением индуктивного сопротивления к активному сопротивлению более 15 – 20 [41]. Для зарубежных стандартов такими параметрами обладают линии от 400 кВ. В России такими линиями являются ЛЭП с напряжением 500 – 750 кВ [41].

Продольная компенсация бывает сосредоточенная и распределённая. Распределённая компенсация выполняется при степени компенсации индуктивного сопротивления более 50%. Во всех остальных случаях она выполняется сосредоточенной.

Как показывают математические выкладки и многочисленные исследования, например [42], устройство сосредоточенной продольной компенсации целесообразней устанавливать в середине линии. Это обеспечивает максимально возможную пропускную способность (при прочих равных условиях) и при этом наименьшее значения перенапряжения на выводах УПК. В случае использования двух и трёх УПК на линии, то их оптимальное расположение зависит от длины ЛЭП. С точки зрения пропускной способности для ЛЭП до 500 км расположение УПК значения не имеет. Для ЛЭП длиной более 500 км наибольшая пропускная способность наблюдается (в пределе 100% компенсации) при наиболее равномерном расположении УПК по длине линии. С точки

зрения перенапряжений на выводах конденсаторов, то перенапряжения минимальны, если устройства продольной компенсации так же располагаются равномерно (для линий длиной до 1000 км). Для линий длиной 1000 км и более в случае использования двух УПК наименьшие перенапряжения наблюдаются при расположении УПК по концам линии, однако, это оказывается в ущерб пропускной способности. Для решения этой проблемы предлагается располагать УПК ассиметрично относительно центра линии – в начале и в середине [43].

Теоретическим пределом продольной компенсации является тот случай, когда емкостное сопротивление УПК равно индуктивному сопротивлению линии электропередач. На практике данный режим едва достижим по ряду факторов. Во-первых, как уже было сказано выше, и как это следует из закона электрофизики, на большем сопротивлении при прочих равных условиях возникает большая разность потенциалов. В данном случае эта разность потенциалов приводит к перенапряжениям на выводах компенсирующих конденсаторов. Как уже отмечалось выше, эта проблема имеет решение, заключающееся в распределении компенсирующей ёмкости вдоль линии. Отметим, что при большей степени продольной компенсации и при большей длине линии требуется большее количество УПК. Но при увеличении количества пунктов УПК стоимость всего проекта пропорционально увеличивается и при всём при этом из-за увеличения количества элементов снижается надёжность ЛЭП. Во-вторых, степень компенсации более 50% приводит к неправильной работе всех известных видов защит. Это связано, в частности, с возникновением на таких линиях при внешних и внутренних коротких замыканиях таких явлений как: инверсия тока, инверсия напряжения, возникновение низкочастотных колебаний после отключения короткого замыкания и т.д. Все эти явления приводят к неправильной работе релейной защиты и автоматики. Обсудим эти проблемы более подробно.

Токовые отсечки. Ток к. з., на который реагирует отсечка,

$$I_K = \frac{E}{X_{AK}},$$

где X_{AK} – реактивное сопротивление сети от источника питания до точки к. з. (рис. 19, а).

При к. з. до УПК сопротивление X_{AK} растет при удалении точки к. з., в связи с чем ток I_K (рис. 19, б) уменьшается.

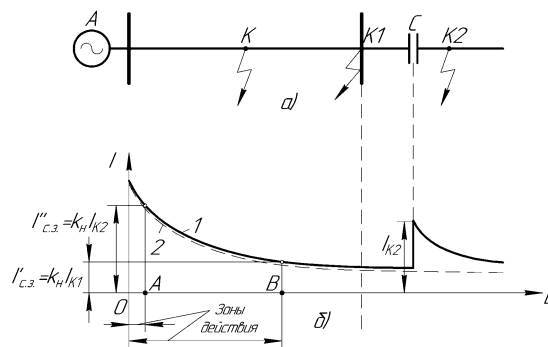


Рис. 19. Влияние устройства продольной емкостной компенсации (УПК) на работу токовой отсечки:

а – участок сети с УПК; б – характер изменения тока КЗ и зона действия отсечки при наличии и отсутствии УПК (кривые 1 и 2)

Fig.19. Influence of the Series Capacitor (SC) on the operation of the current cutoff:

a - section of the network with the SC; b - the character of the short-circuit current change and the cutoff coverage area in the presence and absence of the SC (curves 1 and 2)

В случае к. з. за УПК ток к. з. увеличивается скачком от I_{K1} до I_{K2} из-за компенсирующего действия емкости C УПК. По мере дальнейшего перемещения точки $K2$ ток I_K снова уменьшается за счет удлинения участка ЛЭП до точки короткого замыкания.

Ток срабатывания мгновенной отсечки выбирается так, чтобы она не действовала за пределами защищаемой линии. Из приведенных кривых 1 и 2 (рис. 19, б) видно, что при наличии УПК $I''_{с.з.} > I'_{с.з.}$, а зона действия отсечки соответственно меньше, чем при отсутствии УПК ($OA < OB$). Таким образом, продольная компенсация существенно снижает эффективность токовой отсечки и ограничивает возможность ее применения.

Аналогично влияет УПК и на токовые отсечки нулевой последовательности, но в меньшей степени, поскольку x_0 (т.е. сопротивление нулевой последовательности) линии в 2–3 раза больше x_1 , а x_0 и x_1 УПК одинаковы, поэтому емкостное сопротивление $x_{УПК}$ в меньшей степени снижает суммарное индуктивное сопротивление x_0 сети и линии от места установки защиты до точки к. з.

Дистанционная защита. На рис. 20 показан характер изменения сопротивления при удалении точки к. з. K от места установки дистанционной защиты P1. При к. з. до УПК это сопротивление растет пропорционально расстоянию до места к. з. При переходе точки к. з. за УПК (из K1 в K2) величина сопротивления резко уменьшается, поскольку батарея конденсаторов компенсирует определенную часть индуктивности линии. При дальнейшем удалении точки К (за точку K2) сопротивление участка снова нарастает, но закон пропорциональности между полным сопротивлением и расстоянием до места короткого замыкания, положенный в основу принципа действия дистанционных защит, оказывается нарушенным (см. рис. 20, б).

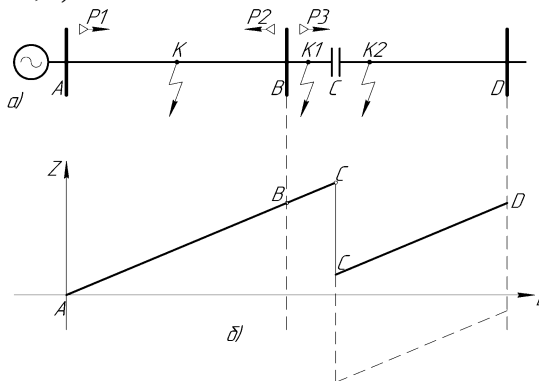


Рис. 20. Влияние ёмкости УПК на работу дистанционной защиты

Fig.20. Influence of the capacitance of the Series Capacitor on the operation of distance protection

Таким образом, далекое к. з., происшедшее на смежной линии BD , воспринимается защитой P1 как близкое к. з., расположенное на защищаемой линии AB , в результате защита может срабатывать неправильно с выдержкой времени первой зоны. Помимо искажения величины измеренного сопротивления z_p , $x_{УПК}$ (реактивное сопротивление устройства продольной компенсации) может исказить знак реактивной составляющей z_p , что приводит к нарушению направленности действия защиты. Такие условия возникают тогда, когда емкостное сопротивление УПК преобладает над индуктивным сопротивлением линии, от места установки защиты до места включения продольной компенсации. Например, для защиты P1 при $x_{УПК} > x_{AC}$ сопротивление z_{K2} в случае повреждения в точке K2 и за ней имеет емкостный характер, т. е. его индуктивная составляющая имеет отрицательный знак. Так как характеристика срабатывания реле включает в себя, как правило, по большей части зону положительных активно-индуктивных значений реле P1 не будет действовать, оно воспринимает это к. з. как повреждение до шин А.

Необходимо отметить, что и реле P3, находящееся у места к. з. (при повреждении в K2), отказывает в действии по той же причине, так как $x_{УПК} > x_{BC}$. В то же время реле P2 придет в действие, хотя по своему принципу оно не должно работать. При индуктивном сопротивлении участка BC (к. з. в K1) z_{P2} на реле P2 имеет отрицательный знак и располагается в III квадранте (в зоне отрицательных активных и реактивных сопротивлений), если же сопротивление BC станет емкостным (при к. з. в K2), то вектор сопротивления может попасть в другой квадрант, в ту часть, которая охвачена характеристикой реле, что приведёт к его неправильному срабатыванию. Из всего сказанного следует, что наличие УПК весьма существенно влияет на поведение дистанционных защит, искажая величину и знак z_p и приводит к неправильным действиям этих защит. Применение дистанционных защит в сети с УПК возможно при условии ограничения их зон действия и при относительно небольшом значении $x_{УПК}$.

Направленная защита (токовая). Наличие продольной компенсации может вызывать отказ и неправильное действие реле направления мощности в направленных защитах. Например, реле мощности, расположенное в P2 (рис. 20, а), из-за возникающей инверсии тока может неправильно работать при к. з. в точке K2 за УПК.

Дифференциальная защита линий. Дифференциально-фазная высокочастотная защита.

Рассмотрим случай, когда конденсаторная батарея расположена на одном из концов линии электропередачи. Если при коротком замыкании вблизи конденсаторов емкостное сопротивление последних достаточно велико для перекомпенсации индуктивности участка в сторону питающей системы, то применение дифференциально-фазных защит затруднено: ток короткого замыкания в перекомпенсированном участке получается опережающим, а на противоположном конце поврежденной линии – отстающим (дифференциально-фазная защита отказывает в действии). Такое положение наиболее вероятно в схеме рис. 21, а. В остальных случаях оно может иметь место при степени компенсации, большей 0,5. Следует заметить, что если конденсаторы продольной компенсации, послужившие причиной отказа релейной защиты, окажутся в результате повышения напряжения на их зажимах зашунтированными защитным разрядником, релейная защита подействует правильно [44].

Рассмотрим случай, когда конденсаторная батарея расположена в середине участка (рис. 21, б и 21, в). При этом варианте правильная работа высокочастотных защит обеспечивается при степени компенсации, не превышающей 0,5. При степени компенсации, большей 0,5 возможны отказы защит в действии по причинам, указанным выше.

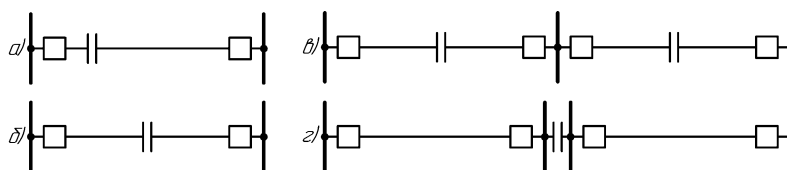


Рис. 21. Варианты расположения конденсаторов продольной компенсации

Fig.21. Series Capacitor Location Options

Рассмотрим вариант, когда конденсаторная батарея расположена между шинами переключательного пункта (рис. 21, г). Существенным преимуществом данного варианта, с точки зрения релейной защиты, является независимость в этом случае действия как направленной и дифференциально-фазной высокочастотных защит, так и поперечной защиты параллельных линий от работы разрядников, поскольку конденсаторы продольной компенсации в варианте рис. 3,г располагаются вне зон действия этих защит [44].

Наличие на линии устройств продольной компенсации также значительно усложняют работу автоматики повторного включения (АПВ) [45, 46, 47].

Из-за описанных выше проблем степень компенсации продольного сопротивления линии как правило составляет не более 50%. Тем не менее существуют научные разработки позволяющие частично решать описанные проблемы. В частности, выдающимся учёным и электроэнергетиком В. Г. Гарке был запатентован «быстродействующий релейный орган для дистанционной защиты линии с продольной компенсацией» позволяющий исключить из продифференцированного напряжения линии электропередачи первую производную напряжения на продольной ёмкости, тем самым повысив надёжность прототипа, взятого за основу [48].

Российским учёным Е. Н. Колобродовым предлагается разбивать защищаемую дистанционной защитой линию с продольной компенсацией на отдельные однородные по контролируемым электрическим параметрам участки [49].

Известен также «приём» с запоминанием вектора напряжения непосредственно до возникновения аварийного режима, позволяющего традиционной дистанционной защите правильно реагировать на короткие замыкания в зоне защищаемого объекта [50].

Известен метод искусственного ограничения зоны действия дистанционной защиты, когда при выходе точки короткого замыкания за устройство продольной компенсации, происходит блокировка ложного срабатывания. Для этого дополнительно вычисляется напряжение по следующей формуле и сравнивается с измеренным напряжением:

$$\bar{V}_{CALC} = \bar{Z}_{1L} \cdot (\bar{I}_A + k_0 \cdot \bar{I}_r) + (-jX_C) \cdot \bar{I}_A,$$

где:

- $\bar{I}_A$ – ток фазы А в месте подключения реле;
- $\bar{I}_r$ – ток нулевой последовательности в месте подключения реле;
- k_0 – компенсационный коэффициент нулевой последовательности;
- $\bar{Z}_{1L}$ – сопротивление нулевой последовательности;
- X_C – сопротивление устройства продольной компенсации.

Если отношение рассчитанного напряжения V_{CALC} к измеренному V_{MEAS} оказывается больше единицы, то срабатывает блокировка (см. рис. 22) [50].

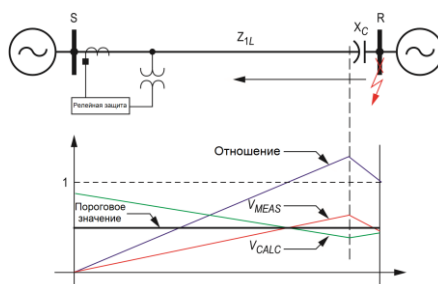


Рис. 22. Измеренное напряжение, расчетное напряжение и их соотношение меняются по мере перемещения места повреждения вдоль линии с последовательной компенсацией

Fig.22. The measured voltage, the calculated voltage, and their ratio vary as the fault location moves along the series-compensated line

Существует решение и для дифференциальной релейной защиты. Оно заключается в переходе от одномерной плоскости к двухмерной путём деления токов по концам линии друг на друга. Однако этот метод имеет один очень важный недостаток: если внутреннее короткое замыкание сопровождается подсинхронным резонансом время обнаружения внутреннего короткого замыкания может достигать 0,179 секунд [50]. Таким образом, на сегодняшний день применение дифференциальной защиты на ЛЭП ограничено появлением инверсии тока во время короткого замыкания, что в свою очередь ограничивает степень продольной компенсации ЛЭП и соответственно её пропускную способность. В мире существует несколько действующих проектов, где продольная компенсация составляет около 90% и при этом отсутствует явление инверсии тока при КЗ, что не мешает устойчивому функционированию дифференциальной релейной защиты, но это достигается за счёт большого количества распределённых вдоль линии устройств продольной компенсации, что, несомненно, ведёт к значительному удорожанию капитальных вложений.

Заключение

По результатам проведённого исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены основные элементы электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. Показано текущее состояние дел по применению элементов активно-адаптивной сети в ЕЭС России, а также перспективы дальнейшего внедрения этих элементов в ЕЭС России. Показано, что для Российской Федерации наиболее востребованной FACTS-технологией является компенсация реактивного сопротивления линии.

2. Освещены проблемы функционирования комплексов релейной защиты и автоматики при применении их на линиях электропередачи с устройством продольной компенсации. Показано, что использование на линии устройства для продольной компенсации реактивного сопротивления создаёт проблемы функционирования для всех видов устройств релейной защиты и автоматики, а именно: токовой, дистанционной, дифференциальной и АПВ.

3. Существующие решения адаптации алгоритмов РЗА для защиты компенсированных ЛЭП в основном направлены на совершенствование дистанционной защиты. Так же имеется наработка в отношении дифференциальной релейной защиты, которая имеет существенный недостаток в определённых режимах функционирования – в режиме подсинхронного резонанса время реагирования на внутренне короткое замыкание может достигать 0,179 секунд. Таким образом, совершенствование алгоритмов функционирования дифференциальной релейной защиты, применяемой на ЛЭП с устройствами продольной компенсации, всё ещё остаётся актуальной задачей.

Научная новизна исследования состоит в теоретическом обобщении сложной научной проблемы, связанной с функционированием комплексов релейной защиты и автоматики, применяемых на компенсированных ЛЭП, что позволило разработать теоретическую базу для дальнейшего совершенствования алгоритмов функционирования различных видов релейной защиты при применении их на ЛЭП с устройствами продольной компенсации.

Литература

1. Нудельман Г.С., Подшивалин А.Н. Направления инновационного развития РЗА // Релейщик. 2015. № 3. с.18–22.
2. Глускин И.З., Белотелов А.К., Косьянчук В.В., Сапожников А.В. Научно-технический отчет «Разработка концепции развития и применения систем релейной защиты и автоматики для интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью». Книга 1. М.: Общество с ограниченной ответственностью "Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей "ЭНЕРГОСЕТЫПРОЕКТ"; 2012. Работа выполнена по договору № 0710/2011.
3. СТАТКОМ [Интернет ресурс]. М: официальный сайт публичного акционерного общества «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ПАО «ФСК ЕЭС»). Доступно по: http://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/static_compensator_statcom/. Ссылка активна на 31 мая 2022.
4. Long W., Nilsson S.L. Introduction to flexible AC transmission systems (FACTS) controllers: a chronology. In: Andersen B. R., Nilsson S.L., editors. Flexible AC Transmission Systems. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 3-12.
5. Bekri O. L., Fellah M. K. The Static Var Compensator (SVC) Device in the power systems Using Matlab/SimPowerSystems. In: International Conference on Electrical Engineering and its Applications «ICEEA'08»; 20-21 May 2008. Sidi Bel-Abbès; 2008. Available at: https://www.researchgate.net/publication/272294293_The_Static_Var_Compensator_SVC_Device_in_the_power_systems_Using_MatlabSimPowerSystems. Accessed: 24 Jul 2022.
6. Barrios-Martínez E., Ángeles-Camacho C. Technical comparison of FACTS controllers in parallel connection // Journal of applied research and technology. 2017. Vol.15, N1. pp. 36-44.
7. Mahapatra Sh., Goyal A., Kapil N. Thyristor Controlled Reactor for Power Factor Improvement // International Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 4, N4. pp. 55–59.
8. Taktode K. C., Rojatkhar G. S., Raut Bh. T., et al. Reactive Power Control by Using Thyristor Switched Capacitor (TSC) and Thyristor Controlled Reactor (TCR) in FACTS // International Journal of Science and Research. 2019. Vol. 8, N4. pp. 61–64.
9. Miske S. A., Nozari F., Miller T., Moran R., Matraszek S. Static reactive power compensators for high voltage powersystems. Schenectady (NY): General Electric Company; 1982.
10. Lima M., Nilsson S.L. Technical Description of Static Var Compensators (SVC). In: Andersen B.R., Nilsson S.L., editors. Flexible AC Transmission Systems. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 155-206.
11. Gelen A., Yalcinoz T. The behavior of thyristor switched capacitor (TSC) installed in an infinite bus system. In: The IEEE Region 8 Eurocon 2009 Conference; May 2009. Saint-Petersburg; 2009. Доступно по: https://www.researchgate.net/publication/224564356_The_behavior_of_Thyristor_Switched_Capacitor_TSC_installed_in_an_infinite_bus_system. Ссылка активна на 6 августа 2022.
12. Davidson C., de Oliveira M.M. Technical Description of Static Compensators (STATCOM). In: Andersen B.R., Nilsson S.L., editors. Flexible AC Transmission Systems. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 207-251.
13. Smolovik S.V., Bryantsev A.M. Development of Magnetically Controlled Shunt Reactors in Russia. In: Andersen B.R., Nilsson S.L., editors. Flexible AC Transmission Systems. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 401–421.
14. Jancke G., Åkerström K. The series capacitor in Sweden // Electrical Engineering. 1952. Vol. 71, N3. pp. 222-227.
15. Nilsson S.L., de Mattos Tenório A.R., Sen S., Taylor A., Xu S., Zhao G., Song Q., Lei B. Application Examples of the Thyristor Controlled Series Capacitor. In: Andersen B.R., Nilsson S.L., editors. Flexible AC Transmission Systems. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 586–638.
16. Vandana, Verma S.N. Comparative Study of Different Facts Devices // International Journal of Engineering Research & Technology. 2014. Vol. 3, N6. pp. 1819–1822.
17. Ahmadi A., Gandoman F. H., Khaki B., et al. Comprehensive review of gate-controlled series capacitor and applications in electrical systems // IET Generation, Transmission & Distribution. 2017. Vol. 11, N5. pp. 1085–1093.

18. Kamalapur G. D., Sheelavant V. R. Simulation and Analysis of GCSC in Power System // Asian Journal of Convergence in Technology. 2018. Vol. 3, N3. Доступно по: <https://asianssr.org/index.php/ajct/article/view/274>. Ссылка активна на 9 августа 2022.
19. Maruf N. I., Mohsin, Shoeb A., et al. Study of thyristor controlled series capacitor (TCSC) as a useful FACTS device // International journal of engineering science and technology. 2010. Vol. 2, N9. pp. 4357–4360.
20. Aleem U. V., Mallareddy CH., Pitre S. S., et al. Static Synchronous Series Compensator (SSSC) as Stability Booster of a Power System // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2017. Vol. 46, N6. pp. 316–319.
21. Nilsson S.L., de Oliveira M.M. Technical Description of Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC). In: Andersen B.R., Nilsson S.L., editors. Flexible AC Transmission Systems. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 254–297.
22. Yin J., CHen G., Xu H., LI Q., LIU J., LI P. Unified Power Flow Controller Technology and Application. London: Academic Press; 2017.
23. Lee H.-J., Lee D.-Sh., Yoon Y.-D. Unified Power Flow Controller Based on Autotransformer Structure // Electronics. 2019, Vol. 8, N12.
24. Mailah N.F., Bashi S.M. Single Phase Unified Power Flow Controller (UPFC): Simulation and Construction // European Journal of Scientific Research. 2009. Vol.30, N4. pp. 677–684.
25. Baskar S., Kumarappan N., Gnanadass R. A Novel Configuration of Unified Power Flow Controller. In: Das V.V., Stephen J., Thankachan N. et al. editors. Power Electronics and Instrumentation Engineering. PEIE 2010: Proceedings of the International Conference; 7-9 Sep., 2010; Kochi, Kerala, India. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010. pp. 15-19.
26. Hussein N, Eisa A, Rashad EE. Analyzing the interline power flow controller (IPFC) steady state performance in power systems. In: Proceedings of the 15th International Middle East Power Systems Conference «MEPCON'12», 23-25 Dec 2012. Egypt, Alexandria University; 2012. Доступно по: https://www.researchgate.net/publication/284032295_Analyzing_the_Interline_Power_Flow_Controller_IPFC_Steady_State_Performance_in_Power_Systems. Ссылка активна на 11 августа 2022.
27. Gyugyi L. Interline Power Flow Controller (IPFC). In: Eremia M., Liu Ch.-Ch., Edris A.-A., editors. Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc.; 2016. P. 629-650.
28. Vijayakumar Y.N., Dr. Sivanagaraju Application of interline power flow controller (IPFC) for power transmission system // International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering. 2014. Vol. 2, N10. pp. 2138–2142.
29. Hussein N., Mahmoud H., Shehata S., Othman E.-S., Eisa A. Interline Power Flow Controller (IPFC) Characterization in Power Systems // Majlesi Journal of Electrical Engineering. 2019. Vol. 13, N3. pp. 1656-1665.
30. Кузнецов А. В., Юренков Ю. П., Ситникова Ю. Д. Проблема ограничения токов короткого замыкания в энергосберегающих системах транспортировки и распределения электроэнергии // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2020. №1. с.36–41.
31. Jovcic D. High voltage direct current transmission: converters, systems and DC grids. 2nd ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2019.
32. Huq K.S.Sh., Huq K.R. A Technical Review on High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission // International Journal of Electrical Engineering. 2018. Vol. 11, N1. pp. 77–85.
33. Kumar A., Hussain D.M.A. HVDC (high voltage direct current) transmission system: a review paper // Gyancity Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 4, N2. pp. 1–10.
34. Arrillaga J. High Voltage Direct Current Transmission. London, UK: Institution of Electrical Engineers; 1998.
35. Bertinato A., Torwelle P., Dantas de Freitas G., Colmenero M., Raison B. Pole-to-ground fault protection strategy for HVDC grids under symmetrical monopolar configuration In: 2019 IEEE Milan PowerTech: Proceedings of the 13th IEEE PowerTech conference; 23-27 Jun 2019; Milan, Italy. Доступно по: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8810909>. Ссылка активна на 13 августа 2022.
36. Goertz M., Wenig S., Beckler S., Hirsching C., Suriyah M., Leibfried T. Analysis of Cable Overvoltages in Symmetrical Monopolar and Rigid Bipolar HVDC Configuration // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35, N4, pp. 2097-2107.
37. Murty P.S.R. Electrical Power Systems. Boston (MA): Butterworth-Heinemann; 2017.

38. Филимонов А.Г., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А. Глобальное энергетическое объединение: новые возможности водородных технологий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРGETИКИ. 2021. Т. 23. № 2. С. 3-13.
39. Устройства продольной компенсации [Интернет ресурс]. М: официальный сайт публичного акционерного общества «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ПАО «ФСК ЕЭС»). Доступно по: https://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/series_compensation_device/. Ссылка активна на 29 июля 2022.
40. Вставки несинхронной связи [Интернет ресурс]. М: официальный сайт публичного акционерного общества «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ПАО «ФСК ЕЭС»). Доступно по: https://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/insert_asynchronous_communication/. Ссылка активна на 29 июля 2022.
41. Антонов А.В., Фокин В.К., Тузлукова Е.В. О применении устройств продольной емкостной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // журнал ЭНЕРГИЯ ЕДИНОЙ СЕТИ. 2017. №6(29). С. 26–41.
42. Bagriyanik M., Dag H. Determination of location of series compensation devices using fuzzy decision making // European Transactions on Electrical Power. 2001. Vol. 11, N4. pp. 241-245.
43. Некукар А.Р. Выбор расположения установок распределенной продольной емкостной компенсации на линии электропередачи // Вестник МЭИ 2010. №4. С. 5-11.
44. Атабеков Г. И. Вопросы релейной защиты линий электропередачи с продольной емкостной компенсацией // Журнал «Электричество». 1953. №8. с. 5–8.
45. Frimpong E.A., Okyere Ph.Y. A review of adaptive autoreclosure techniques // Indian Journal of Computer Science and Engineering. 2010. Vol. 1, N3. pp. 222–228.
46. Esztergalyos-Chairman J., Andrichak J., Colwell D.H., et al. Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines, IEEE committee report // Transactions on Power Delivery. 1992. Vol. 7, N1. pp. 182–192.
47. Zhalefar, F. Adaptive single-phase reclosing in transmission lines [dissertation]. London, Ontario, Canada; 2015. Доступно по: <https://core.ac.uk/download/pdf/61676356.pdf>. Ссылка активна на 15 августа 2017.
48. Гарке В. Г. Быстродействующий релейный орган для дистанционной защиты линии с продольной компенсацией. Патент СССР на изобретение №454628. 25.12.74. Бюл. №47. Доступно по: https://yandex.ru/patents/doc/SU454628A1_19741225. Ссылка активна на 15 августа 2022.
49. Булычев А.В., Колобродов Е.Н. Автоматика и защита линий электропередачи с управляемой продольной компенсацией в аварийных режимах // Энергетик. 2012. №12. с.19–24.
50. Altuve H.J., Mooney J.B., Alexander G.E. Advances in Series-Compensated Line Protection. In: Proceedings of the 63rd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference; 22-24 Apr 2009; Atlanta, Georgia; 2009. Доступно по: https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6340_SeriesCompLineProt_JM_20081022_Web.pdf. Ссылка активна на 16 августа 2022.

Авторы публикации

Иванов Игорь Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» Казанского государственного энергетического университета.

Новокрещенов Виталий Викторович – старший преподаватель кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» Казанского государственного энергетического университета.

Иванова Вилия Равильевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Nudel'man GS, Podshivalin AN. Napravleniya innovatsionnogo razvitiya RZA. *Releishchik*. 2015; 3:18-22. (In Russ).
2. Gluskin IZ, Belotelov AK, Kos'yanchuk VV, Sapozhnikov AV. Nauchno-tekhnicheskii otechet «Razrabotka kontseptsii razvitiya i primeneniya sistem releinoi zashchity i avtomatiki dlya intellektual'noi elektroenergeticheskoi sistemy s aktivno-adaptivnoi set'yu». Book 1. Moscow: "Design and research institute of power systems and networks «ENERGOSETPROJECT» limited; 2012. Contract № 0710/2011.
3. STATCOM [Internet]. Moscow: Official website of a public joint stock company «Federal'naya setevaya kompaniya Edinoi energeticheskoi sistemy». Available at: http://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/static_compensator_statcom/. Accessed: 31 May 2022.
4. Long W, Nilsson SL. *Introduction to flexible AC transmission systems (FACTS) controllers: a chronology*. In: Andersen BR, Nilsson SL, editors. *Flexible AC Transmission Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 3-12.
5. Bekri O. L., Fellah M. K. The Static Var Compensator (SVC) Device in the power systems Using Matlab/SimPowerSystems. In: *International Conference on Electrical Engineering and its Applications «ICEEA'08»; 20-21 May 2008*. Sidi Bel-Abbès; 2008. Available at: https://www.researchgate.net/publication/272294293_The_Static_Var_Compensator_SVC_Device_in_the_power_systems_Using_MatlabSimPowerSystems. Accessed: 24 Jul 2022.
6. Barrios-Martínez E., Ángeles-Camacho C. Technical comparison of FACTS controllers in parallel connection. *Journal of applied research and technology*. 2017;15(1):36-44.
7. Mahapatra Sh., Goyal A., Kapil N. Thyristor Controlled Reactor for Power Factor Improvement // *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2014; 4(4):55-9.
8. Taktode K. C., Rojatkar G. S., Raut Bh. T., et al. Reactive Power Control by Using Thyristor Switched Capacitor (TSC) and Thyristor Controlled Reactor (TCR) in FACTS. *International Journal of Science and Research*. 2019;8(4):61-4.
9. Miske SA., Nozari F., Miller T., Moran R., Matraszek S. *Static reactive power compensators for high voltage powersystems*. Schenectady (NY): General Electric Company; 1982.
10. Lima M, Nilsson SL. *Technical Description of Static Var Compensators (SVC)*. In: Andersen BR, Nilsson SL, editors. *Flexible AC Transmission Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 155–206.
11. Gelen A., Yalcinoz T. The behavior of thyristor switched capacitor (TSC) installed in an infinite bus system. In: *The IEEE Region 8 Eurocon 2009 Conference*; May 2009. Saint-Petersburg; 2009. Available at: https://www.researchgate.net/publication/224564356_The_behavior_of_Thyristor_Switched_Capacitor_TSC_installed_in_an_infinite_bus_system. Accessed: 6 aug 2022.
12. Davidson C, de Oliveira MM. *Technical Description of Static Compensators (STATCOM)*. In: Andersen BR, Nilsson SL, editors. *Flexible AC Transmission Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 207-251.
13. Smolovik SV, Bryantsev AM. *Development of Magnetically Controlled Shunt Reactors in Russia*. In: Andersen BR, Nilsson SL, editors. *Flexible AC Transmission Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 401–421.
14. Jancke G, Åkerström K. The series capacitor in Sweden. *Electrical Engineering*. 1952;71(3):222-7.
15. Nilsson SL, de Mattos Tenório AR, Sen S, Taylor A, Xu S, Zhao G, Song Q, Lei B. *Application Examples of the Thyristor Controlled Series Capacitor*. In: Andersen B.R., Nilsson S.L., editors. *Flexible AC Transmission Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 586–638.
16. Vandana, Verma S.N. Comparative Study of Different Facts Devices. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2014;3(6):1819–22.
17. Ahmadi A., Gandoman F. H., Khaki B., et al. Comprehensive review of gate-controlled series capacitor and applications in electrical systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017;11(5):1085–93.
18. Kamalapur G. D., Sheelavant V. R. Simulation and Analysis of GCSC in Power System. *Asian Journal of Convergence in Technology*. 2018;3(3). Available at: <https://asianssr.org/index.php/ajct/article/view/274>. Accessed: 9 Aug 2022.

19. Maruf N. I., Mohsin, Shoeb A., et al. Study of thyristor controlled series capacitor (TCSC) as a useful FACTS device. *International journal of engineering science and technology*. 2010;2(9):4357-60.
20. Aleem U. V., Mallareddy CH., Pitre S. S., et al. Static Synchronous Series Compensator (SSSC) as Stability Booster of a Power System. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2017;46(6). pp. 316-9.
21. Nilsson SL, de Oliveira MM. *Technical Description of Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC)*. In: Andersen BR, Nilsson SL, editors. *Flexible AC Transmission Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2020. P. 254–297.
22. Yin J., CHen G., Xu H., LI Q., LIU J., LI P. *Unified Power Flow Controller Technology and Application*. London: Academic Press; 2017.
23. Lee H.-J., Lee D.-Sh., Yoon Y.-D. Unified Power Flow Controller Based on Autotransformer Structure. *Electronics*. 2019;8(12). doi: 10.3390/electronics8121542
24. Mailah N.F., Bashir S.M. Single Phase Unified Power Flow Controller (UPFC): Simulation and Construction. *European Journal of Scientific Research*. 2009;30(4):677-84.
25. Baskar S., Kumarappan N., Gnanadass R. A Novel Configuration of Unified Power Flow Controller. In: Das V.V., Stephen J., Thankachan N. et al. editors. *Power Electronics and Instrumentation Engineering. PEIE 2010: Proceedings of the International Conference; 7-9 Sep., 2010; Kochi, Kerala, India. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010. pp. 15-19.*
26. Hussein N., Eisa A., Rashad E. E. Analyzing the interline power flow controller (IPFC) steady state performance in power systems. In: *Proceedings of the 15th International Middle East Power Systems Conference «MEPCON'12», 23-25 Dec 2012. Egypt, Alexandria University; 2012. Available at: https://www.researchgate.net/publication/284032295_Analyzing_the_Interline_Power_Flow_Controller_IPFC_Steady_State_Performance_in_Power_Systems. Accessed: 11 Aug 2022.*
27. Gyugyi L. *Interline Power Flow Controller (IPFC)*. In: Eremia M., Liu Ch.-Ch., Edris A.-A., editors. *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc.; 2016. P. 629-50.
28. Vijayakumar YN, Dr. Sivanagaraju Application of interline power flow controller (IPFC) for power transmission system. *International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering*. 2014;2(10):2138-42.
29. Hussein N., Mahmoud H., Shehata S., Othman E.-S., Eisa A. Interline Power Flow Controller (IPFC) Characterization in Power Systems. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*. 2019;13(3):1656-65. doi: 10.14419/ijet.v7i3.14894
30. Kuznetsov A. V., Yurenkov Yu. P., Sitnikova Yu. D. Problema ogranicheniya tokov korotkogo замыкания v energosberegayushchikh sistemakh transportirovki i raspredeleniya elektroenergii. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;1:36–41.
31. Jovcic D. *High voltage direct current transmission: converters, systems and DC grids*. 2nd ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2019.
32. Huq KSSh, Huq KR. A Technical Review on High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission. *International Journal of Electrical Engineering*. 2018;11(1):77-85.
33. Kumar A., Hussain D.M.A. HVDC (high voltage direct current) transmission system: a review paper. *Gyancity Journal of Engineering and Technology*. 2018;4(2):1-10.
34. Arrillaga J. *High Voltage Direct Current Transmission*. London, UK: Institution of Electrical Engineers; 1998.
35. Bertinato A, Torwelle P, Dantas de Freitas G, Colmenero M, Raison B. Pole-to-ground fault protection strategy for HVDC grids under symmetrical monopolar configuration In: *2019 IEEE Milan PowerTech: Proceedings of the 13th IEEE PowerTech conference; 23-27 Jun 2019; Milan, Italy*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8810909>. Accessed: 13 Aug 2022.
36. Goertz M, Wenig S, Beckler S, Hirsching C, Suriyah M, Leibfried T. Analysis of Cable Overvoltages in Symmetrical Monopolar and Rigid Bipolar HVDC Configuration. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020;35(4):2097-107. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2960851.
37. Murty PSR. *Electrical Power Systems*. Boston (MA): Butterworth-Heinemann; 2017.
38. Filimonova AA, Chichirov AA, Chichirova ND, Filimonov AG. Global energy association: new opportunities of hydrogen technologies. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021;23(2):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-3-13.
39. Series compensation device [Internet]. Moscow: Official website of a public joint stock company «Federal'naya setevaya kompaniya Edinoi energeticheskoi sistemy». Available at: <https://www.fsk->

ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/series_compensation_device/. Accessed: 29 Jul 2022.

40. Insert asynchronous communication [Internet]. Moscow: Official website of a public joint stock company «Federal'naya setevaya kompaniya Edinoi energeticheskoi sistemy». Available at: https://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/insert_asynchronous_communication/. Accessed: 29 Jul 2022.

41. Antonov AV, Fokin VK, Tuzlukova EV. O primeneniі ustroystv prodol'noi emkostnoi kompensatsii v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh Rossii. *Energy of Unified Grid, scientific and technical journal*. 2017; 6(29):26-41

42. Bagriyanik M, Dag H. Determination of location of series compensation devices using fuzzy decision making. *European Transactions on Electrical Power*. 2001;11(4):241-5. doi: 10.1002/etep.4450110405.

43. Nekukar A. R. Vybór raspolozheniya ustanovok raspredelennoi prodol'noi emkostnoi kompensatsii na linii elektropredachi. *Bulletin of MPEI*. 2010; 4:5-11.

44. Atabekov GI. Voprosy releinoi zashchity linii elektropredachi s prodol'noi emkostnoi kompensatsiei. *Zhurnal Elektrichestvo*. 1953; 8:5-8.

45. Frimpong EA, Okyere PhY. A review of adaptive autoreclosure techniques. *Indian Journal of Computer Science and Engineering*. 2010;1(3):222-8.

46. Esztergalyos-Chairman J, Andrichak J, Colwell DH, et al. Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines, IEEE committee report. *Transactions on Power Delivery*. 1992;7(1):182-92.

47. Zhalefar, F. *Adaptive single-phase reclosing in transmission lines* [dissertation]. London, Ontario, Canada; 2015. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/61676356.pdf>. Accessed: 15 августа 2017.

48. Garke V. G. Bystrodeistvuyushchii releinyi organ dlya distantsionnoi zashchity linii s prodol'noi kompensatsiei. Patent USSR №454628. 25.12.74. Byul. №47. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/SU454628A1_19741225. Accessed: 15 Aug 2022.

49. Bulychev AV, Kolobrodov EN. Avtomatika i zashchita linii elektropredachi s upravlyаемoi prodol'noi kompensatsiei v avariinykh rezhimakh // *Energetik*. 2012; 12:19-24.

50. Altuve H.J., Mooney J.B., Alexander G.E. Advances in Series-Compensated Line Protection. In: *Proceedings of the 63rd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*; 22-24 Apr 2009; Atlanta, Georgia; 2009. Available at: https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6340_SeriesCompLineProt_JM_20081022_Web.pdf. Accessed: 16 Aug 2022.

Authors of the publication

Igor Yu. Ivanov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vitaly V. Novokreshchenov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Viliya R. Ivanova - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 07.11.2022г.

Отредактировано 21.11.2022г.

Принято 28.11.2022г.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 536.2.022

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-124-132

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ЛЁГКИХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ДИАТОМИТОВЫХ ПОРОД И ПРИБОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Синицын¹ А.А., Соловьева² О.В.^{*}, Ахметова² И.Г., Ваньков² Ю.В.,
Закревская³ Л.В., Ананьев³ М.С., Шакурова² Р.З.

¹Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

³Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-4757-6387>, solovyeva.ov@kgeu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Одним из направлений энергосбережения и повышения энергетической эффективности является снижение потребления топливно-энергетических ресурсов. Большое количество тепловой энергии расходуется на обогрев зданий и сооружений в отопительный период. При этом часть тепла, предназначенного для отопления помещений, рассеивается через ограждающие конструкции зданий (стены, полы, крыши, окна). В случае высоких тепловых потерь, необходимо восполнять тепловую энергию путем сжигания дополнительного количества топлива. Для снижения тепловых потерь через ограждающие конструкции применяются различные теплоизоляционные материалы с низким значением теплопроводности. Целью настоящих исследований стало изучение проблемы разработки технологии лёгких бетонов на основе диатомитовых пород, а также возникающих при его создании неравномерных включений наполнителя из микросферических гранул, оценка влияния наличия зон, не занятых микрогранулами, на изоляционные свойства композитного материала, а также определение влияния объемного содержания микросферических гранул на величину теплопроводности. *МЕТОДЫ.* В настоящей работе проведено исследование получения легкого конструкционного бетона с пористым заполнителем, синтезированным из диатомитовых пород Владимирской области, а также влияния наличия зон, не занятых микрогранулами, на изоляционные свойства композитного материала. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Результаты показали, что распределение микрогранул в матрице оказывает значительное влияние на изоляционные свойства композита, а наличие пустот в материале способствует тепловым потерям и снижению термического сопротивления материала. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Технология получения разработанного бетона не отличается от технологии производства бетонов высокого класса, что позволяет использовать широко распространённое оборудование для бетонов.

Ключевые слова: композитный материал; микрогранула; теплоизоляция; теплопроводность; бетон.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания №075-01262-22-01 от 28 января 2022 г. (Дополнительное соглашение 075-03-2022-151/1 с 31 января 2022 года).

Для цитирования: Синицын А.А., Соловьева О.В., Ахметова И.Г., Ваньков Ю.В., Закревская Л.В., Ананьев М.С., Шакурова Р.З. Результаты разработки технологии лёгких бетонов на основе диатомитовых пород и приборное исследование его теплопроводности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 124-132. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-124-132.

RESULTS OF THE DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF LIGHT-WEIGHT CONCRETE BASED ON DIATOMITE ROCKS AND INSTRUMENT STUDY OF ITS THERMAL CONDUCTIVITY

AA. Sinitsin¹, OV. Soloveva^{2,*}, IG. Akhmetova², YV. Vankov², LV. Zakrevskaya³, MS. Ananiev³, RZ. Shakurova²

¹Vologda State University

²Kazan State Power Engineering University

³Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4757-6387>, solovyeva.ov@kgeu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* One of the directions of energy saving and energy efficiency improvement is the reduction of consumption of fuel and energy resources. A large amount of thermal energy is spent on heating buildings and structures during the heating season. To reduce heat losses through the building envelope, various heat-insulating materials with low thermal conductivity are used. The purpose of this research was to study the problem of developing the technology of lightweight concrete based on diatomite rocks, as well as uneven inclusions of filler from microspherical granules arising during its creation, assessing the effect of the presence of zones not occupied by microgranules on the insulating properties of the composite material, as well as determining the effect of the volume content of microspherical granules on the value of thermal conductivity. *METHODS.* In this work, we studied the production of lightweight structural concrete with porous aggregate synthesized from diatomite rocks of the Vladimir region, as well as the effect of the presence of zones not occupied by microgranules on the insulating properties of the composite material. *RESULTS.* The results showed that the distribution of microgranules in the matrix has a significant effect on the insulating properties of the composite, and the presence of voids in the material contributes to heat losses and a decrease in the thermal resistance of the material. *CONCLUSION.* The technology for obtaining the developed concrete does not differ from the technology for the production of high-class concrete, which allows the use of widely used concrete equipment.

Keywords: composite material; microgranule; thermal insulation; thermal conductivity; concrete.

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. 075-01262-22-01 from 28 January 2022 (Additional agreement 075-03-2022-151/1 from 31 January 2022).

For citation: Sinitsin AA, Soloveva OV, Akhmetova IG, Vankov YV, Zakrevskaya LV, Ananiev MS, Shakurova RZ. Results of the development of the technology of light-weight concrete based on diatomite rocks and instrument study of its thermal conductivity. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):124-132. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-124-132.

Введение

В настоящее время строительство в России расширяет свои горизонты, что подтверждается данными Росстат, которые говорят о том, что в 2022 году объем строительства вырос на 70% по сравнению с 2021 годом, а за январь — сентябрь 2022 года объем жилищного строительства в России составил 79,1 млн кв. м. Этот показатель на 26,5% превышает результаты аналогичного периода предыдущего года. В связи с этим спрос на строительные материалы растет. Наиболее важными критериями строительных материалов являются их экологичность, прочность, долговечность, надежность и стоимость [1].

В связи с политикой строительства, проводимой в России в последнее время, а конкретно – ФЗ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергоэффективности и внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ», особое внимание стоит уделить теплоизоляции зданий. Данный аспект способствует созданию новых строительных материалов из местных ресурсов с низкой конечной себестоимостью, что обуславливает актуальность работы [2]. Кроме того, нельзя не заметить, что все большую популярность набирает каркасное строительство. По данным аналитического обзора единого реестра застройщиков, на долю монолитно-блочного строительства приходится первое место и 33,6% всего строительства в России. При таком типе строительства наиболее удобным материалом для теплоизоляции являются легкие бетоны, так как они

выполняют одновременно и теплоизоляционную и ограждающую функции [3]. Мировой рынок композитных материалов в последние годы динамично развивается. По оценкам международных экспертов мировой рынок композитов в 2019 году составил более 99 млрд долл. в стоимостном выражении. Эксперты считают, что до 2027 года рынок композитов будет расширяться на 6,8% в год и по стоимости возрастет до 112 млрд долл. [4]. Высокие темпы развития рынка композиционных материалов, в том числе строительных и теплоизоляционных, определяются широким спектром их свойств, превосходящих свойства традиционных материалов, а также вариативным подходом к созданию изделия, начиная с моделирования его структуры, свойств и формы и заканчивая выбором технологий производства [5].

Кроме того, согласно 261-ФЗ «Об энергосбережении...», обозначена национальная задача снижения потребления ТЭР, в т.ч. снижение потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции зданий и сооружений [6]. Для снижения теплопотерь применяются различные теплоизоляционные материалы (минеральная вата, пенополиуретан и др.), которые обладают рядом существенных недостатков, в частности: гигроскопичностью, горючестью, токсичностью и т.д. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых теплоизоляционных материалов, которые лишены вышеперечисленных недостатков. Одним из направлений в разработке новых теплоизоляционных материалов является создание композитных строительных блоков на основе строительных смесей и микросфер из стекла, термопластика, керамики или гранулята вторичной продукции промпредприятий [7].

Среди микросфер, применяемых для создания строительных композитных блоков, наибольшее распространение получили стеклянные микросферы (HGM – hollow glass microsphere) благодаря низкой стоимости и высоким механическим характеристикам. Добавление стеклянных микросфер в строительную смесь с последующим формованием позволит получить композит с высокими теплоизоляционными свойствами при небольшом весе [8].

Микростеклокерамические гранулы представляют собой композит на основе природных кремний содержащих пород, таких как трепел, диатомит и др., получаемых путем обжига при температуре, не превышающей 850 °С.

В современной зарубежной и отечественной научной литературе эта тема представлена рядом исследований, которые подтверждают эффективность использования диатомитовых пород для создания строительных материалов. Несмотря на все существующие исследования, без сомнения, потенциал данной горной породы раскрыт не полностью и нуждается в дальнейшем изучении. Преимущества легких бетонов как строительного материала описали такие ученые как: Ю. М. Баженов, А. Г. Комар, Г. И. Горчаков и др. Работами А.В. Жукова, В.С. Немерцева, В.М. Рыбалко, В.Д. Кулябина, Е.Е. Звездиной, М.П. Семенюка, Т.Д. Липницкой, А.А. Крупина, Г.А. Петрихиной, Е.И. Бородин, а также в работах [9-13] зарубежных исследователей доказана принципиальная возможность получения искусственных пористых заполнителей из кремниевых пород.

Тепломеханические свойства композитов широко исследованы путем экспериментальных исследований [9-13]. Исследовалась зависимость теплопроводности от таких параметров композитных материалов, как средний диаметр микросфер, их содержание и распределение по объему композита. В работе [13] авторы исследовали характеристики композитной многослойной изоляции переменной плотности, содержащей полые стеклянные микросферы. Результаты экспериментальных исследований показали, что добавление микросфер в состав многослойной изоляции позволяет уменьшить количество изоляционных слоев, тем самым снизив вес изоляционной конструкции при сохранении низких значений коэффициента теплопроводности. В статье [14] авторами была представлена трехмерная модель элементарной ячейки в форме куба со случайным распределением полых микросфер в матрице. Авторы провели численные исследования коэффициента теплопроводности композита с HGM. Результаты исследований показали, что добавление HGM позволяет снизить плотность теплового потока ввиду высокого термического сопротивления микросфер. Таким образом, распределение теплового потока в композите очень неравномерно, что и привело к снижению коэффициента теплопроводности композита [15].

Постановка задачи

Технология получения гранул следующая: сырье просушивается до постоянной массы при температуре 105 °С, сухие компоненты кроме гидроксида натрия, смешиваются с водой в ступке лабораторной фарфоровой и при необходимости растирается до

образования однородной гелеобразной массы, далее раствор аккуратно добавляли к сухим компонентам и перемешивали до однородной консистенции. Полученная смесь экструдируется через измельчитель для качественного перемешивания и запуска реакции, при этом консистенция смеси менялась. Сушка шихты производилась при различных температурах до постоянной массы. Измельчение шихты производилось через измельчитель с последующим рассевом по фракциям через стандартные лабораторные сита. После каждого цикла крупная фракция измельчалась повторно. Подготовка к обжигу состояла из смешивания сырца с неактивной добавкой, предотвращающей слипание гранул в соотношении 30% сырца на 70% добавки по массе, смесь укладывалась на поддон из нержавеющей стали с толщиной металла 1 мм, толщина смеси составляла 7-10 мм. Обжиг производился в течении 10 минут. Остывание производилось без выгрузки с поддона при комнатной температуре. Для отделения гранул от добавки производилось просеивание на стандартном сите и промывки водой с последующим просушиванием до постоянной массы. Измерение истинной плотности производилось путем создания до обжига шариков сырца диаметром около 10 мм и вычисление объема и плотности исходя из измеренных геометрических размеров.

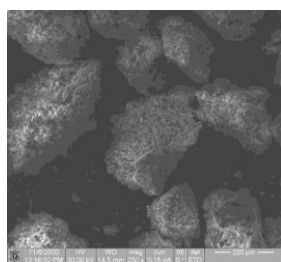
Технология получения бетона: промешивание производилось в металлической емкости двухроторным ручным смесителем. Емкость и шнеки обрабатывались слабо смоченной тканью, непосредственно перед замесом, вносились сухие компоненты, перемешивались на низких оборотах смесителем, затем добавлялась половина требуемой воды и смесь перемешивалась до однородной консистенции, затем добавлялась половина оставшейся воды и перемешивание повторялось, затем добавлялась оставшаяся вода и смесь перемешивалась в течение 2 минут. Сразу после замеса проверялись характеристики не затвердевшей смеси и формовались образцы по ГОСТ 10180-2012, прочность определялась по ГОСТ 18105-2018, морозостойкость по ГОСТ 26633-2012.

Синтезированный состав легкого конструкционного бетона представлен в таблице 1. Использованы гранулы по составу №13 при температуре обжига 900°C. Диаметр фракций указан после обжига.

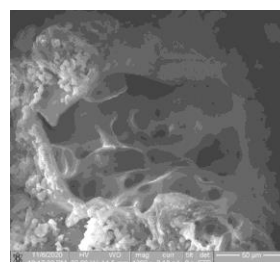
Таблица 1

Синтезированный состав легкого конструкционного бетона

Компонент	Содержание, % масс.
Цемент	34,79
Микрокальцит	17,38
Метакаолин	3,75
Гранулы фр 0,14-0,315	18,25
Гранулы фр 0,315-0,63	13,26
Вода	12,19
Суперпластификатор	0,38



а)



б)

Рис. 1. Электронная микроскопия микрогранул: а) поверхности, б) внутреннего строения.

Fig. 1. Electron microscopy of microgranules: a) surface, b) interior

На рисунке 1 показаны снимки поверхности микрогранул и их внутреннего строения, сделанные с помощью растровой электронной микроскопии, а в таблице 2 – характеристика легкого конструкционного бетона.

Таблица 2

Характеристика легкого конструкционного бетона				
Прочность на сжатие, МПа	Плотность, кг/м ³	Класс бетона	Марка по морозостойкости, не менее	Водопоглощение по массе, %
1350	1350	B30	F300	2

Форма гранул далека от сферической, с одной стороны высокая удельная поверхность такого заполнителя будет препятствовать расслоению раствора, с другой стороны увеличивается водопотребность заполнителя и повышается водотвердое отношение раствора при требуемой подвижности, что в значительной степени сказывается на прочности бетона.

Исследования показывают, что при создании изоляционного материала с применением слоя микросферических гранул могут образовываться дефекты. Например, при плохом перемешивании гранул в основном материале происходит формирование зоны с гранулами с разной плотностью упаковки. В самом неблагоприятном случае можно наблюдать небольшие объемы основного материала, где отсутствуют микросферические гранулы.

Для испытаний были выбраны исходные образцы бетона 150x150x25..35 мм.

Исследования проведены с применением измерителя теплопроводности ИТС-1, основанного на определении теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов методом стационарного теплового потока¹.

Для изучения результатов теоретических исследований [8] зависимости изменения параметров теплопроводности композитного материала от содержания микросферических гранул по объему формируемого образца, было выполнено рассечение объема по горизонтали на условно равные части: верхнюю и нижнюю, проведены работы по шлифовке поверхности для измерительных элементов прибора ИТС-1.

Испытываемые образцы формировались следующими размерами: 150x150x16..18мм. Испытания проводились в соответствии с вышеуказанным стандартом.

На рисунке 2 представлены фотографии исходных и рабочих образцов композитного бетона для измерения теплопроводности.



а)



б)

Рис. 2. Фотографии: а) исходных образцов композитного бетона, б) рабочего образца для измерителя теплопроводности

Fig. 2. Photos: a) Composite Concrete Reference Samples, b) Working Sample for Thermal Conductivity Meter

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний занесены в табличную форму (Таблица 3) с указанием номера образца, характера отклонения («вылета») значений 5 проведенных измерений (спарклайн), средней теплопроводности образца и толщины образца. На рисунке 3 приведены данные концентрационного анализа распределения значений коэффициента теплопроводности подготовленных образцов композитного бетона с микростеклокерамическими гранулами.

¹ ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. : дата введения 2000-04-01. – Москва : Госстрой России МНТКС, 1999. – 27 с.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов композитного бетона

Номер образца	Спарклайн	Осредненная теплопроводность, Вт/м·К	Толщина образца, мм
№1 (верх)		$0,374 \pm 0,8 \cdot 10^{-3}$	17,0
№1 (низ)		$0,337 \pm 0,8 \cdot 10^{-3}$	16,0
№2 (верх)		$0,404 \pm 0,8 \cdot 10^{-3}$	18,0
№2 (низ)		$0,319 \pm 0,8 \cdot 10^{-3}$	16,0
№3 (верх)		$0,376 \pm 0,8 \cdot 10^{-3}$	18,0
№3 (низ)		$0,259 \pm 0,8 \cdot 10^{-3}$	17,0

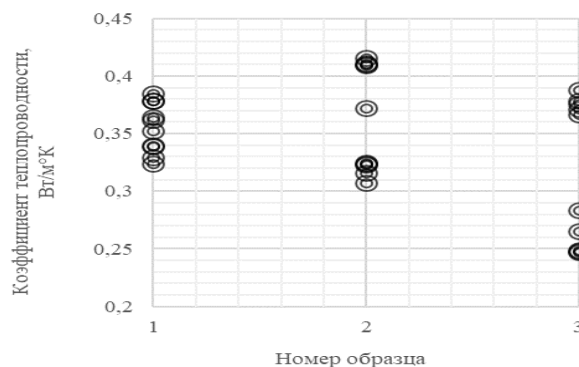


Рис. 3. Результаты концентрационного анализа распределения значений опытных данных по измерению коэффициента теплопроводности образцов композитного бетона.

Fig. 3. Results of a concentration analysis of the distribution of values of experimental data on the measurement of the thermal conductivity coefficient of composite concrete samples.

Для образцов 2 и 3 получены значительные расхождения результатов серии испытаний верхней и нижней части исходных образцов. Вероятно, это может быть обусловлено распределением частиц в слое материала при его изготовлении в зависимости от фракционного состава под действием гравитации. В случае смеси крупных и мелких частиц двух различных плотностей нижнее положение займут мелкие тяжелые, затем расположатся мелкие легкие, крупные тяжелые (или смесь мелких легких и крупных тяжелых); в верхнем положении окажутся крупные легкие частицы.

Оценим влияние неравномерности распределения микросфер в композитном слое материала. При перемещении гранул из слоев залегания, мы, очевидно, можем наблюдать увеличение среднего теплового потока. Интересны для сравнения результаты испытаний для образцов 2 и 3, так как в обоих случаях есть различие по средней теплопроводности. Таким образом, области с уменьшением количества микросфер способствует большим тепловым потерям для изоляционного материала.

Результаты для первого образца показывают, что изменения в величине теплового потока незначительно отличаются, что говорит о равномерности распределения гранул в верхней и нижней части одного образца.

Заклучение

В настоящей работе проведено исследование получения легкого конструкционного бетона с пористым заполнителем, синтезированным из диатомитовых пород Владимирской области, а также влияния наличия зон, не занятых микрогранулами, на изоляционные свойства композитного материала. Компоненты для получения бетона, за исключением гранул, легкодоступны на рынке, однако для производства микрозаполнителя требуется разработка специальной промышленной или опытно-промышленной технологии. Определение изоляционных свойств получено с помощью измерения коэффициента теплопроводности для рассеченных по горизонтали исходных образцов материалов. Их пониженная концентрация в верхней части исследуемого объема материала увеличивает теплопроводность и тепловой поток через композитный материал. Максимальное изменение теплового потока и коэффициента эффективной теплопроводности по сравнению со случаем образца 1, наблюдается в образцах 2 и 3, в

которых наибольшая часть верхнего объема матрицы находится с меньшей концентрацией микросфер, которые имеют меньший собственный коэффициент теплопроводности, и наоборот, нижняя часть объема матрицы находится с большей концентрацией микросфер. Подробный анализ результатов показал зависимость изменения параметров теплопроводности композитного материала от объемного содержания микросферических гранул, от неоднородности технологического процесса, вероятно, при подготовке исходных соотношений и формирования образцов в виброустановках.

В целом, технология получения разработанного бетона не отличается от технологии производства бетонов высокого класса, что позволяет использовать широко распространённое оборудование для бетонов. Разработанный материал пригоден для использования на заводах ЖБИ, стационарных РБУ, заводах по производству сухих строительных смесей, заводах по производству мелкоштучных бетонных изделий и архитектурных изделий, а также для индивидуального применения.

Литература

1. Даулетбаев Р. Б., Вовк Б. В. Надежность строительных конструкций зданий и сооружений в процессе их эксплуатации // Инновации и инвестиции. 2019. № 5. С. 173-177.
2. Васильева И. Л., Немова Д. В. Энергоэффективные материалы нового поколения в строительстве // Экология и строительство. 2018. № 4. С. 18-24.
3. Дребезгова, М. Ю., Чернышева, Н. В., Глаголев, Е. С., Герасимов, А. В. Анализ и перспективы развития монолитного малоэтажного строительства // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. 2016. № 9. С. 28-35.
4. Дориомедов М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6-7 (89). С. 29-37.
5. Омаров, Ж. М., Жолдыбаев, Ш. С., Жандалинова, К. А., Оразова, Д. К. Использование композитных материалов в строительной отрасли // Наука и техника Казахстана. 2019. № 4. С. 7-16.
6. Кузнецов, Г. В., Озерова, И. П., Половников, В. Ю., Цыганкова, Ю. С. Оценка фактических потерь тепла при транспортировке теплоносителя с учетом технического состояния и реальных условий эксплуатации тепловых сетей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2011. Т. 319, № 4. С. 56-60.
7. Гольцман, Б. М., Яценко, Е. А., Геращенко, В. С., Комунжиева, Н. Ю., Яцен-ко, Л. А., Смолий, В. А., Ченг, Ч. Ч. Пористые теплоизоляционные материалы на основе различных видов силикатного сырья // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2020. № 1 (205). С. 55-60.
8. Соловьев, С. А., Соловьева, О. В., Ахметова, И. Г., Ваньков, Ю. В., Шакурова, Р. З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24, № 1. С. 86-98.
9. Liu B., Wang H., Qin Q. H. Modelling and characterization of effective thermal conductivity of single hollow glass microsphere and its powder // Materials. 2018. Т. 11, № 1. С. 133.
10. Curd M. E., Morrison N. F., Smith M. J., Gajjar P., Yousaf Z., Parnell W. J. Geometrical and mechanical characterisation of hollow thermoplastic micro-spheres for syntactic foam applications // Composites Part B: Engineering. 2021. Т. 223. С. 108952.
11. Petkova-Slipets R., Zlateva P. An analysis of the structure and thermal conductivity of hollow microsphere filled syntactic foams // Civil and Environmental Engineering. 2019. Т. 15, №. 1. С. 36-41.
12. Wang, P., Ji, L., Yuan, J., An, Z., Yan, K., Zhang, J. Modeling and optimization of composite thermal insulation system with HGMS and VDMLI for liquid hydrogen on orbit storage // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Т. 45, № 11. С. 7088-7097.
13. Wang H., Hou F., Chang C. Experimental and computational modeling of thermal conductivity of cementitious syntactic foams filled with hollow glass micro-spheres // Construction and Building Materials. 2020. Т. 265. С. 120739.
14. Xiao P., Yifeng Z., Peng W., Dan L. Estimation of thermal conduction in hollow-glass-beads-filled cement-based composites by variational asymptotic homogenization method // Applied Thermal Engineering. 2019. Т. 161. С. 114191.
15. Solovev S. A., Soloveva O. V., Akhmetova I. G., Vankov Y. V., Paluku D. L. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in an Open-Cell Foam Catalyst on Example of

Авторы публикации

Синицын Антон Александрович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Теплогазоводоснабжение» Вологодского государственного университета (ВоГУ).

Соловьева Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ахметова Ирина Гареевна – д-р техн. наук, заведующая кафедрой «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, зав. кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Закревская Любовь Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительное производство» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ).

Ананьев Михаил Сергеевич – студент кафедры «Строительное производство» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ).

Шакурова Розалина Зуфаровна – аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Dauletbaev R. B., Vovk B. V. Reliability of building structures of buildings and structures during their operation. *Innovation and investment*. 2019,5: 173-177.
2. Vasil'yeva I. L., Nemova D. V. Energy-efficient materials of a new generation in construction. *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2018, 4:18-24.
3. Drebezgova M. YU., Chernysheva N. V., Glagolev Ye. S., Gerasimov A. V. Analysis and development prospects of monolithic low-rise construction. *The Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016, 9:28-35.
4. Doriomedov M. S. Russian and world market of polymer composites (review). *Proceedings of VIAM*. 2020, 6-7 (89):29-37.
5. Omarov Zh. M., Zholdybaev Sh. S., Zhandalina K. A., Orazova D. K. The use of composite materials in the construction industry. *Science and Technology of Kazakhstan*. 2019, 4:7-16.
6. Kuznetsov G. V., Ozerova I. P., Polovnikov V. Yu., Tsygankova Yu. S. Estimation of actual heat losses during transportation of the coolant, taking into account the technical condition and actual operating conditions of heating networks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2011, 319(4):56-60.
7. Goltsman B. M., Yatsenko E. A., Gerashchenko V. S., Komunzhieva N. Yu., Yatsenko L. A., Smolij V. A., Cheng Ch. Ch. Porous heat-insulating materials based on various types of silicate raw materials. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2020, 1(205):55-60. <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2020-1-55-60>.
8. Solovev S. A., Soloveva O. V., Akhmetova I. G., Vankov Yu. V., Shakurova R. Z. Numerical study of the thermal conductivity of a composite heat-insulating material with microgranules. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022, 24(1):86-98. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-86-98>.
9. Liu B., Wang H., Qin Q. H. Modelling and characterization of effective thermal conductivity of single hollow glass microsphere and its powder. *Materials*. 2018, 11(1):133. <https://doi.org/10.3390/ma11010133>.
10. Curd M. E., Morrison N. F., Smith M. J., Gajjar P., Yousaf Z., Parnell W. J. Geometrical and mechanical characterisation of hollow thermoplastic micro-spheres for syntactic foam applications. *Composites Part B: Engineering*. 2021, 223:108952. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108952>.

11. Petkova-Slipets R., Zlateva P. An analysis of the structure and thermal conductivity of hollow microsphere filled syntactic foams. *Civil and Environmental Engineering*. 2019, 15(1):36-41.

12. Wang P., Ji L., Yuan J., An Z., Yan K., Zhang J. Modeling and optimization of composite thermal insulation system with HGMS and VDMLI for liquid hydrogen on orbit storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020, 45(11):7088-7097. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.110>.

13. Wang H., Hou F., Chang C. Experimental and computational modeling of thermal conductivity of cementitious syntactic foams filled with hollow glass micro-spheres. *Construction and Building Materials*. 2020, 265:120739. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120739>.

14. Xiao P., Yifeng Z., Peng W., Dan L. Estimation of thermal conduction in hollow-glass-beads-filled cement-based composites by variational asymptotic homogenization method. *Applied Thermal Engineering*. 2019, 161:114191. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114191>.

15. Solovev S. A., Soloveva O. V., Akhmetova I. G., Vankov Y. V., Paluku D. L. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in an Open-Cell Foam Catalyst on Example of the Acetylene Hydrogenation Reaction. *Chem Engineering*. 2022, 6(1):11. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6010011>.

Authors of the publication

Anton A. Sinitsin – Vologda State University, Vologda, Russia.

Olga V. Soloveva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Irina G. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yuri V. Vankov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Lyubov V. Zakrevskaya – Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia.

Mikhail S. Ananiev – Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia.

Rozalina Z. Shakurova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 28.11.2022г.

Отредактировано 01.12.2022г.

Принято 05.12.2022г.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ МАШИННОГО ЗАЛА ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

Разаков М.А.^{1,2}

¹Московский энергетический институт, г. Москва, Россия

²Российский биотехнологический университет, г. Москва, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0419-4522>, RazakovMA@mpei.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть влияние отключения системы отопления на теплонапряженность машинного зала высоковольтной городской канализационной насосной станции. Определить, как влияет полное отключение системы отопления на тепловой режим рассматриваемого помещения при неизменных требованиях к тепловлажностным параметрам микроклимата внутреннего воздуха. Провести численный эксперимент моделирования стационарного теплового режима машинного зала с учетом основных технологических процессов в машинном зале высоковольтной городской канализационной насосной станции. Выполнить адаптацию разработанной модели теплового режима для моделирования отключения системы отопления. Рассмотреть распределение тепловых потерь помещения машинного зала при поддержании постоянной температуры воздуха. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялся метод расчета проектного стационарного режима машинного зала, разработанный в прошлых работах автора. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, рассмотрена особенность изменения теплонапряженности машинного зала при отключении системы отопления и иных факторов. Приведены результаты расчета тепловых избытков при различном количестве работающих насосов и изменении температуры сточных вод. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Отключение системы отопления снижает теплонапряженность помещения машинного зала в среднем на 0,3-0,4 Вт/м³. Данный способ энергосбережения способствует снижению расхода тепловой энергии и рекомендуется к использованию в рассматриваемом помещении. Экономия от использования данного метода энергосбережения для рассматриваемого типа канализационной насосной станции при проектном режиме эксплуатации составляет 890 000 рублей в год.

Ключевые слова: теплонапряженность; тепловой режим; система водоотведения; высоковольтная канализационная насосная станция; тепловые избытки; система отопления; технологический процесс.

Для цитирования: Лаптев А.Г., Лаптева Е.А., Аласгарли С.У. Эффективность охлаждения жидкостей в турбулентном барботажном слое на ситчатых тарелках // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 6. С. 133-142. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-133-142.

ENGINE ROOM THERMAL DENSITY SPECIALS IN HEATING SYSTEMS SHUTDOW PROCESS

MA. Razakov^{1,2}

¹Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

²Russian Biotechnological University, Moscow, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0419-4522>, RazakovMA@mpei.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the effect of heating system turning off process on the engine room thermal density in a high-voltage city sewage pumping station. Determine how the heating system shutdown affects to the considered room thermal regimes with unchanged requirements for the indoor air microclimate thermal and moisture parameters. Do a numerical experiment which simulates the stationary thermal regime of engine room and taking into account the main technological process in this room of a high-voltage city sewage pumping

station. Perform adaptation of thermal regime developed model to simulate the heating system turning off process. Describe the distribution of heat losses in the engine room while maintaining a constant air temperature. **METHODS.** When solving the task, author has used the method of calculating the engine room design stationary mode. **RESULTS.** Researcher describes the relevance of the topic, considers the specials of the change in the engine room thermal density when the heating system is turned off and other factors. Author has presented the results of the thermal excesses calculation for different numbers of operating pumps and changes in wastewater temperature. **CONCLUSION.** The turning off process of the heating system reduces the thermal density of the engine room by an average of $0.3 - 0.4 \text{ W/m}^3$. This method of energy saving helps to reduce the consumption of thermal energy and could be used in this part of sewage pumping station. The economical effect of proposed energy saving measurement will be in economical index reducing. It will be 890 000 rubles saving per year for this type of sewage pumping station in designed mode.

Keywords: heat tension; thermal conditions; sewage system; high voltage sewage pumping station; thermal excesses; heating system; technological process.

For citation: Razakov M.A. Engine room thermal density specials in heating systems shutdown process. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):133-142. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-133-142.

Введение

Городская инфраструктура жилищно-коммунального хозяйства включает в себя большое количество зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения. Одним из основных комплексов города является система водоотведения. Она состоит из сооружений, для которых необходимо подключение энергетических систем (систем электро- и теплоснабжения). Несмотря на то, что в системе канализации существуют гравитационные элементы (трубопроводы и отстойники со сточными водами) большинство зданий и сооружений используют тепловую и электрическую энергии. Современные отечественные и зарубежные исследования в области энергосбережения для системы водоотведения посвящены снижению энергопотребления за счет оптимизации технологических процессов и повышения эффективности использования электрической энергии. Причем рассмотрены как здания городских канализационных насосных станций [1-4], так и очистные сооружения [3-6]. Исключение составляют работы Волкова В.В., Прохорова В.И., Хохлова В.А. и других авторов. В них они рассмотрели основные принципы энергосбережения в теплопотребляющих системах канализационных сооружений и варианты использования тепловых насосов, извлекающих теплоту от сточных вод, а также возможности использования продуктов брожения микроорганизмов на очистных сооружениях [7-10]. Несомненно, расход электрической энергии в комплексе системы водоотведения является основным по отношению к расходу тепловой энергии. Но расход энергии на тепловые нужды рассматриваемых сооружений также необходимо постоянно учитывать в связи с тем, что без данного типа энергии невозможно обеспечивать работу энергетических устройств, использующих электрическую энергию [11, 12].

Исследования теплопотребления инженерных систем канализационных насосных станций (КНС) в основном приведены в странах, где наблюдается холодный климат. При этом также необходимо учитывать, что системы канализации зарубежных стран отличаются от отечественных систем по своему строению. За рубежом децентрализованных систем водоотведения больше, чем в Российской Федерации и странах СНГ. Поэтому количество высоковольтных КНС в России больше, и для нашей страны не менее актуальным является планирование энергосберегающих мероприятий для данных типов сооружений. Некоторые особенности технологических процессов в низковольтных и высоковольтных канализационных насосных станциях приведены в работе В.И. Прохорова [11]. Основным способом снижения энергопотребления КНС является использование частотного регулятора для электроприводов насосных агрегатов. Данному способу посвящен ряд отечественных и зарубежных исследований [13-18]. При этом в работах иностранных авторов внимание уделяется математическим моделям и алгоритмам регулирования, которые используют временные фактические анализаторы расхода сточных вод с сохранением и автоматическим корректированием работы электрических двигателей [5, 19, 20]. Менее эффективные способы снижения

потребления электрической энергии приведены в работах [21, 22]. Все приведенные выше способы относятся к непосредственному процессу перекачивания сточных вод и снижению расхода электрической энергии в КНС. Тепловая энергия в канализационной насосной станции необходима для систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения. Некоторые результаты исследования потребления тепловой энергии КНС представлены в работе Рыбакова Р.С. и Прохорова В.И. [23, 24]. Основным способом снижения теплоснабжения для КНС является использование теплового насоса. Источником теплоты для него является сточная вода. Применение теплового насоса на КНС ограничивается в связи с особенностями процессов на сооружениях по очистке сточных вод. На некоторых этапах данного процесса необходима температура сточных вод выше $+10^{\circ}\text{C}$ [25-27]. При снижении температуры необходим дополнительный подогрев сточных вод, который приводит к увеличению общего теплоснабжения системы водоотведения. При данных условиях становится актуальным поиск иных энергосберегающих мероприятий на канализационной насосной станции.

Материалы и методы

Снижение затрат тепловой энергии для системы отопления в городской канализационной насосной станции необходимо производить с помощью компенсации тепловых потерь за счет внутренних источников энергии. Некоторые результаты моделирования теплообменных процессов в канализационной насосной станции представлены в предыдущих работах автора данного исследования и авторов из СНГ [28-30]. Одним из эффективных способов энергосбережения и снижения тепловых избытков в помещении с высокой теплонапряженностью является полное отключение данной системы. Он возможен не для всех типов помещений в КНС. Поэтому использование данного способа предполагается только для машинного зала высоковольтного типа сооружения из-за наличия больших источников тепловых избытков. Отключение системы отопления как способ энергосбережения и снижения тепловых избытков никогда не рассматривается для данных помещений, несмотря на то, что снижение температуры воздуха в машинном зале предусматривалось в рамках аварийного периода работы системы отопления [31]. Иной вероятной причиной малого количества исследований для высоковольтных типов КНС является их незначительное распространение в мировой и отечественной практике строительства, ввиду широкого диапазона их стоимости в сравнении с низковольтными типами канализационных насосных станций. Еще одной причиной отсутствия научно-исследовательских работ в данной области является распространение гравитационных систем водоотведения в городах. В низковольтных КНС у насосных агрегатов также имеются электродвигатели, но их удельная мощность не превышает 400 кВт [22]. В современном мире большое распространение получили насосные установки с мощностью электродвигателя от 65 до 120 кВт. На рис. 1 и 2 представлена принципиальная схема высоковольтной канализационной насосной станции [8,28].

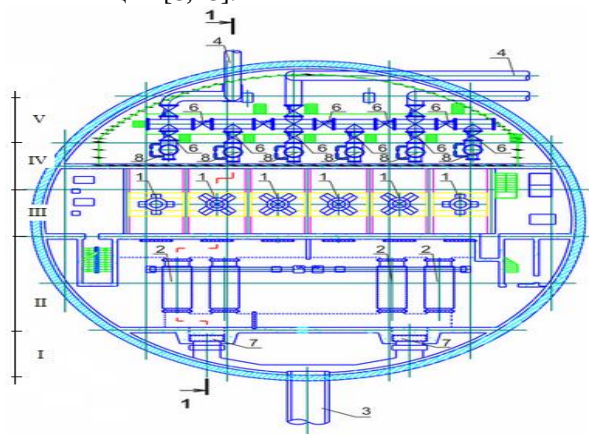


Рис. 1. План подземной части КНС:
1 – Насосная установка; 2 – Грабелная решетка; 3, 4 – Трубопровод со сточными водами (подающий и отводящий); 5, 6 – Задвижки (на подающем и отводящем трубопроводах); 7 – Затвор; 8 – Клапан; 9 – Напорный трубопровод.

Fig. 1. Underground part of sewage pumping station: 1 – Pump; 2 – Rake grate; 3, 4 – Pipeline with waste water (supply and discharge); 5, 6 – Gate valves (on the supply and discharge pipelines); 7 – Shutter; 8 – Valve; 9 – Pressure pipeline.

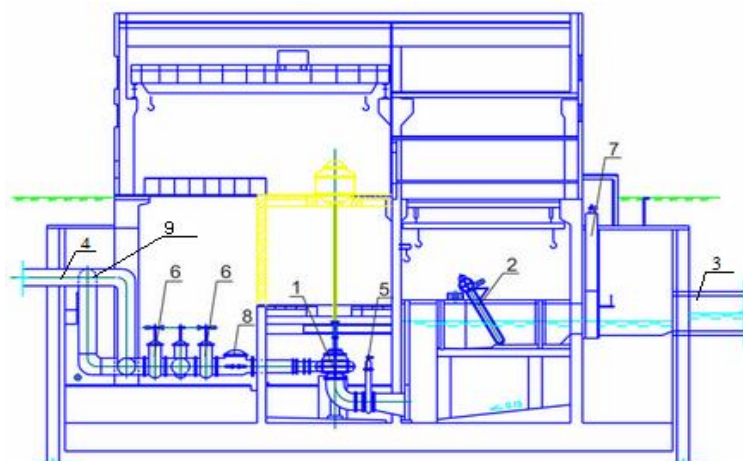


Рис. 2. Разрез 1-1 канализационной насосной станции
(Условные обозначение идентичны рисунку 1)

Fig. 2. Section 1-1 of the sewage pumping station
(Symbols are identical to Figure 1)

Для определения влияния полного отключения системы отопления на теплонапряженность машинного зала и на эксплуатационные затраты были использованы данные исследования эксплуатируемой АО Мосводоканал высоковольтной канализационной насосной станции. Избытки теплоты были определены для 1, 2, 3, 4, 5 постоянно работающих высоковольтных насосов. Удельная электрическая мощность электродвигателя составила 1,6 МВт. Коэффициент полезного действия равен 93 %. Основные элементы насосного оборудования представлены на рисунках 3 и 4.



Рис. 3. Внешний вид электродвигателя

Fig. 3. Appearance of electric motor

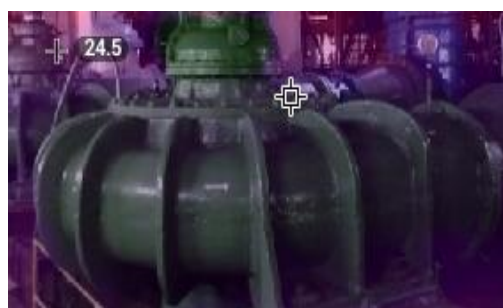


Рис. 4. Внешний вид насоса

Fig. 4. Waste water pump

На рисунках 5 и 6 представлен внешний вид и термограмма иного основного источника тепловых поступлений в машинном зале городской канализационной насосной станции – грабельного отделения.



Рис. 5. Внешний вид отделительной стены между машинным залом и грабельным отделением

Fig. 5. Separation wall between the engine room and rake room



Рис. 6. Термограмма отделительной стены между машинным залом и грабельным отделением

Fig. 6. Thermogram of the separating wall between the engine room and the rake room

Объем помещения машинного зала равен 15080 м^3 . Температура в помещении машинного зала принята равной $+21 \text{ °C}$. Затраты рассчитывались согласно требованиям энергетического паспорта зданий и сооружений. Необходимо отметить, что энергопаспорт не является обязательным для КНС из-за отсутствия различных данных для этого типа сооружения у составителя документа, но при корректном расчете он может быть использован для оценки проектного расхода тепловой энергии. Для расчета тепловой напряженности в помещении необходимо определение всех составляющих теплового баланса помещения. В выражении (1) представлено балансовое уравнение, описывающее тепловые потоки в машинном зале и учитывающее все источники теплоты и холода:

$$\sum Q_{\text{т.п.}(1)} + Q_{\text{у.п.}} = \sum Q_{\text{т.п.}(2)} + Q_{\text{п.в.}} \quad (1)$$

где: $\sum Q_{\text{т.п.}(1)}$ – суммарные тепловые поступления от различных источников теплоты (освещение; основное насосное оборудование; переменные источники, например, сточные воды) в помещение машинного зал без учета теплосодержания уходящего воздуха, кВт;

$\sum Q_{\text{т.п.}(2)}$ – суммарные тепловых потери от различных источников холода (ограждающие конструкции, соприкасающиеся с грунтом; ограждающие конструкции, соприкасающиеся с наружным воздухом; переменные источники, например, сточные воды; инфильтрационный воздух) в помещении машинного зал без учета теплосодержания приточного воздуха, кВт;

$Q_{\text{п.в.}}$ – теплосодержание приточного воздуха, подаваемого в машинный зал, кВт;

$Q_{\text{у.п.}}$ – теплосодержание удаляемого из помещения машинного зала воздуха, кВт;

Теплонапряженность помещения характеризуется коэффициентом теплонапряженности, который определяется по формуле (2). Если коэффициент теплонапряженности помещения выше значения 23 Вт/м^3 , то данное помещение можно отнести к помещениям с высокой теплонапряженностью:

$$q_{\text{т.н.}} = \frac{Q_{\text{т.и.}}}{V_{\text{пом}}} \quad (2)$$

где: $Q_{\text{т.и.}}$ – тепловые избытки в помещении с учетом тепловых потерь от источников холода, Вт;

$V_{\text{пом}}$ – объем помещения, м^3 .

В выражении (3) представлен способ расчета эксплуатационных годовых затрат тепловой энергии согласно методике, приведенной в энергетическом паспорте:

$$\mathcal{E}_{\text{т.э.}(год)} = 0,024(t_{\text{вн}} - t_{\text{н.ср}})d \frac{Q_{\text{с.о}}^p}{(t_{\text{вн}} - t_{\text{н}})} \frac{n}{24} \quad (3)$$

где: $t_{\text{вн}}$ – температура внутреннего воздуха, °C;

$t_{\text{н.ср.}}$ – средняя температура воздуха за отопительный период, °C;

$t_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха, °C;

$Q_{\text{с.о.}}^p$ – проектные часовые тепловые потери здания, Вт;

n – количество часов работы системы отопления в сутки, ч.

Результаты и обсуждение

Суммарные проектные тепловые потери машинного зала и грабельного отделения для рассматриваемой высоковольтной канализационной насосной станции составили 68 200 Вт. 89 % от данных тепловых потерь приходится на машинный зал. Для расчета тепловых потерь подземной части КНС была применена зональная методика [32]. Суммарные тепловые поступления в машинный зал и грабельное отделение при температуре сточных вод равной 21 °C составили 658 241 Вт, а при температуре сточных вод равной 25 °C – 663 844 Вт. 91,80%¹ и 91,87%² от всех тепловых поступлений составили тепловые поступления в помещение машинного зала. Основными источниками избытков теплоты в машинном зале являются электродвигатель от насосного оборудования, на который приходится 86,8%¹ (86,1%²) тепловых поступлений в машинном зале, и грабельное отделение, на которое приходится до 3,65%¹ и 3,62%² от аналогичного показателя помещения. На рисунке 7 приведены результаты только тепловых потерь (поступлений) от грабельного отделения.

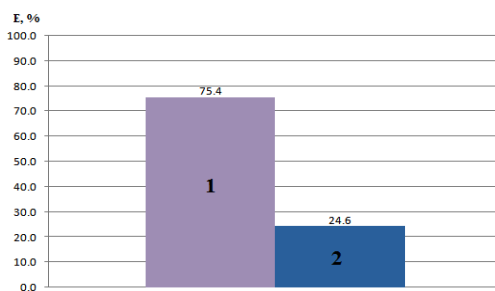


Рис. 7. Процентное распределение тепловых потерь в грабельном отделении при температуре в помещении равной +23 °C и температуре сточных вод равных +25 °C (E, %):

1 – тепловые потери в окружающий КНС грунт; 2 – тепловые потери от грабельного отделения в машинный зал

Fig.. 7. Percentage distribution of heat loss in the rake chamber at a room temperature of +23 oC and a wastewater temperature of +25 °C (E, %):

1 - thermal losses to the surrounding KNS ground; 2 - thermal losses from the rake chamber to the engine room

В таблице приведены результаты моделирования теплонапряженности машинного зала при отключении системы отопления.

Таблица

Суммарные составляющие тепловых избытков в машинном зале

Кол-во работающих насосов	Теплонапряженность машинного зала ^{а)} , Вт / м ³	Теплонапряженность машинного зала ^{б)} , Вт / м ³	Теплонапряженность помещения при отключении системы отопления*, Вт / м ³	Теплонапряженность помещения при отключении системы отопления**, Вт / м ³
I	10,4	10,7	6,3	6,6
II	17,8	18,1	13,8	14,1
III	25,2	25,5	21,2	21,5
IV	32,6	33,0	28,6	28,9
V	40,1	40,4	36,0	36,4

^{а)} температура сточных вод равна 21 °C;

^{б)} температура сточных вод равна 25 °C.

¹ При температуре сточных вод 21 °C

² При температуре сточных вод 25 °C

Теплонапряженность машинного зала при пяти работающих насосных установках и температуре сточных вод равной 21 °С, составила 40,1 Вт/м³. При повышении температуры сточных вод на 4 °С, теплонапряженность в помещении повысится на 0,3 Вт/м³. При отключении системы отопления теплонапряженность машинного зала равна 36,4 Вт/м³ (при условии, что температура сточных вод равна 25 °С). При значении температуры сточных вод 21 °С, теплонапряженность помещения снизится на 0,4 Вт/м³. Снижение теплонапряженности при отключении системы отопления в помещении составит 4,1 Вт/м³ и 4,0 Вт/м³ при различном количестве работающих насосных установок и температуре сточных вод. Годовой проектный расход тепловой энергии для системы отопления рассматриваемой канализационной насосной станции составит 153 447 кВтч. Если учитывать, что в машинном зале КНС используется электрическое отопление и стоимость 1 кВт ч равна 5,8 рублей, то суммарная проектная стоимость затрат на данный вид энергопотребления составит 890 000 рублей. При полном отключении системы отопления помещения машинного зала данные затраты будут равны 0, что позволит направить полученные средства на модернизацию сооружения. Модернизация может быть связана с энергосберегающими мероприятиями основного технологического оборудования, а также с вторичным оборудованием, которое используется для поддержания в рабочем состоянии главных производственных мощностей сооружения.

Заключение

Отключение системы отопления в машинном зале высоковольтной канализационной насосной станции является одним из эффективных способов снижения расхода тепловой энергии в здании без дополнительных финансовых вложений. Данный способ энергосбережения рекомендуется использовать во всех высоковольтных типах КНС для машинного зала при планировании сокращения расходов энергопотребления.

Литература

1. Filipe J., Bessa R. J., Reis M., et al. Data-driven predictive energy optimization in a wastewater pumping station // *Applied Energy*. 2019. V. 252. p. 113423.
2. Rinas M., Tränckner J., Koegst T. Sedimentation of raw sewage: Investigations for a pumping station in northern Germany under energy-efficient pump control // *Water*. 2018. V. 11, N1. p. 40.
3. Jorge C., Almeida M. D. C., Covas D. A novel energy balance tailored for wastewater systems // *Urban Water Journal*. 2022. V. 19, N5. pp. 441-452.
4. Leber T., Meisel M., Gamauf T., et al. Preparations for demand response on a municipal level. IEEE Africon 2011. Victoria Falls, Zambia. IEEE; 2011. p. 6072124. doi:10.1109/AFRCON.2011.6072124
5. Кофман В. Я. Повышение энергоэффективности очистных сооружений канализации за рубежом // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2012. № 9. с. 65-72.
6. Битиев А.В., Басов Н.С., Устюжанин А.В., и др. Прогнозирование энергосберегающего эффекта управляемой подачи воздуха для Ново-Люберецких очистных сооружений // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2018. № 9. с. 47-56.
7. Khavanov P., Volkov V. Ensuring Energy Efficiency and Environmental Friendliness of the Ventilation Systems with Baths Wastewater Treatment. In: Solovev D.B. editor. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies 2019 (FarEastCon 2019); Vladivostok, Russia. IEEE; 2019. p. 8934406.
8. Makisha N., Shevchenko-Enns E. Review of Energy Saving and Energy Efficiency Approaches Applied in Water Sector in Russia // *E3S Web of Conferences*. 2019. V. 97. p. 01040.
9. Васильев Г.П., Пасков В.В., Абуев И.М., и др. 12-летний опыт эксплуатации теплонасосной установки на районной тепловой станции // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2016. № 4. С. 30-32.
10. Smirnov A., Tsabolov K., Ineshina L., et al. Using biogas as an energy source // *E3S Web of Conferences*. 2021. V. 263. p.04064.
11. Прохоров В. И., Разаков М.А. Особенности применения теплоутилизационного оборудования на канализационных насосных станциях // *Вестник МЭИ*. 2022. № 2. С. 45-55.
12. Khohlov V., Razakov M. Energy Saving in Municipal Sewage Pumping Station // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1683, N5. p. 052003.
13. Hedes A., Svoboda M., Anton L. E., et al. In: Basile S., Boscaino V., Burattini C., et al., editors. In situ measurements on the electrical motors of hydraulic pumps installed in a wastewater station. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering

2018 and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe 2018 (IEEEIC 2018 / I&CPS Europe 2018); Palermo, Italy. IEEE; 2018. p. 8494589.

14. Möller E., Pensler T., Thamsen P. U. Effect of speed variation on clogging of sewage pumps. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division Summer Meeting FEDSM 2021; New York, USA. ASME; 2021. V. 2. p. V002T00A001.

15. Wang X., Zhou X., & Zhang L. Energy-saving mechanism and control strategy of sewage pumping station system // Journal of Zhejiang University (Engineering Science). 2005. V. 39, N7. p. 1068-1071;

16. Васенин А. Б., Степанов С.Е., Крюков О.В. Основные проблемы и новые технические средства автоматизации системы канализационных насосных станций // Экологические системы и приборы. 2019. № 11. С. 3-8.

17. Усачев А. П. Методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов КНС // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 1. С. 42-51.

18. Мальцев А. Н., Хватов О.С. Определение энергоэффективных режимов работы насосных агрегатов с частотно-регулируемым электроприводом на канализационных станциях // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2017. № 4(119). С. 100-107.

19. Moreno-Rodenas A. M., Duinmeijer A., Clemens F. H. L. R. Deep-learning based monitoring of FOG layer dynamics in wastewater pumping stations // Water Research. 2021. V. 202. p. 117482.

20. Ganora D., Isacco S., Claps P. Framework for enhanced stormwater management by optimization of sewer pumping stations. Journal of Environmental Engineering (United States). 2017. V. 143, N8. p. 04017025.

21. Березин С. Е., Баженов В.И. Новации энергосбережения в ВКХ, проверенные практикой // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2016. № 5. С. 48-55.

22. Березин С.Е. и др. Насосные станции с погружными насосами. Расчет и конструирование. Стройиздат. 2008 г. 160 с.

23. Рыбаков Р. С., Темный Д.С., Битиев А.В. Сравнительная оценка расчетного и фактического энергопотребления канализационных насосных станций // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 11. С. 38-41.

24. Прохоров В.И., Разаков М.А., Чернова Р.В. Теплопотребление городской канализационной насосной станции // Яковлевские чтения : Сборник докладов XIV Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева и 90-летию со дня создания факультета «ВиВ» Москва, 14–15 марта 2019 года. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. С. 128-135.

25. Gilbert E. M., Agrawal S., Karst S. M., Horn H., Nielsen P. H., Lackner S. Low temperature partial nitrification/anammox in a moving bed biofilm reactor treating low strength wastewater // Environmental science & technology. 2014. V. 48, N 15. pp. 8784-8792.

26. Белова Д. Д. Подбор носителей и параметров иммобилизации консорциума микроорганизмов-деструкторов фосфатов // Вестник КрасГАУ. 2018. № 2(137). С. 294-299.

27. Колесников В. П., Ксенофонтов Б. С., Черникова Л. Ю., и др. Комбинированные сооружения для очистки сточных вод поселков и городов России // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 11. С. 27-34.

28. Prokhorov V., Rymarov A., Razakov M., Kosarev A. Specialized method of calculating heat input from wastewater in the premises of the sewage pumping stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 463, N 3. p. 032073.

29. Кугаевская Т.С., Зубричева Л.Л. Тепловые и тепловоздушные балансы канализационной насосной станции // Сборник научных трудов SWorld. 2014. Т. 18. Вып. 1. С. 71-75.

30. Прохоров В. И., Разаков М.А., Белоглазов А.Р. Качественная и количественная оценка тепlopоступлений от сточных вод в помещение канализационной насосной станции // Естественные и технические науки. 2017. № 7(109). С. 143-146.

31. Рымаров, А. Г., Разаков М.А., Чернова Р.В. Управление работой системы отопления на канализационных насосных станциях // Естественные и технические науки. 2017. № 12(114). с. 293-295.

32. Малявина Е. Г., Иванов Д.С., Михеева Е.А. Сравнение результатов расчета тепlopотерь заглубленных в грунт частей зданий по существующим инженерным методикам // Естественные и технические науки. 2015. № 6(84). С. 549-552.

Автор публикации

Разаков Мухаммет Азатович – ассистент кафедры «Энергетические и Гидротехнические Сооружения» (ЭГТС) Московский энергетический институт (НИУ МЭИ); старший преподаватель кафедры «Инженерия процессов, аппаратов, холодильной техники и технологии» Российский биотехнологический университет (ФГБОУ ВО Росбиотех-МГУПП).

References

1. Kofman VYa. Improving the operating efficiency of the wastewater treatment facilities overseas. *Water supply and sanitary technique*. 2012;9: 65-72.
2. Bitiev AV, Basov NS, Ustiuzhanin AV, et al. predicting energy-efficient effect of the controlled air delivery at the Novo-Liuberetskie wastewater treatment facilities. *Water supply and sanitary technique*. 2018;9:47-56.
3. Leber T, Meisel M, Gamauf T, et al. Preparations for demand response on a municipal level. *IEEE Africon 2011; Victoria Falls, Zambia*. IEEE; 2011. p. 6072124. doi:10.1109/AFRCON.2011.6072124
4. Jorge C, Almeida M DC, Covas D. A novel energy balance tailored for wastewater systems. *Urban Water Journal*. 2022; 19(5): 441-52. doi:10.1080/1573062X.2022.2035409
5. Filipe J, Bessa RJ, Reis M, et al. Data-driven predictive energy optimization in a wastewater pumping station. *Applied Energy*. 2019; 252: 113423. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113423
6. Rinas M, Tränckner J, Koegst T. Sedimentation of raw sewage: Investigations for a pumping station in northern Germany under energy-efficient pump control. *Water*. 2018;11 (1): 40. doi:10.3390/w11010040.
7. Khavanov P, Volkov V. Ensuring Energy Efficiency and Environmental Friendliness of the Ventilation Systems with Baths Wastewater Treatment. In: Solovev D.B. editor. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies 2019 (FarEastCon 2019); Vladivostok, Russia*. IEEE; 2019. p. 8934406. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934406.
8. Prohorov VI, Razakov MA. Specific features of applying heat recovery equipment at sewage pumping stations. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2022; 2: 45-55. doi:10.24160/1993-6982-2022-2-45-55.
9. Khohlov V, Razakov M. Energy Saving in Municipal Sewage Pumping Station. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1683(5): 052003. doi:10.1088/1742-6596/1683/5/052003.
10. Makisha N, Shevchenko-Enns E. Review of Energy Saving and Energy Efficiency Approaches Applied in Water Sector in Russia. *E3S Web of Conferences*. 2019;97:01040. doi:10.1051/e3sconf/20199701040.
11. Vasilyev GP, Paskov VV, Abuyev IM, et al. 12-letniy opyt ekspluatatsii teplonasosnoy ustanovki na rayonnoy teplovoy stantsii. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2016; 4: 30-32.
12. Smirnov A, Tsabolov K, Ineshina L, et al. Using biogas as an energy source. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263: 04064. doi:10.1051/e3sconf/202126304064
13. Hedes A, Svoboda M, Anton LE, et al. In: Basile S, Boscaino V, Burattini C, et al., editors. In situ measurements on the electrical motors of hydraulic pumps installed in a wastewater station. *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering 2018 and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe 2018 (EEEIC 2018 / I&CPS Europe 2018)* 2018; Palermo, Italy. IEEE; 2018. p. 8494589. doi: 10.1109/EEEIC.2018.8494589
14. Möller E, Pensler T, Thamsen PU. Effect of speed variation on clogging of sewage pumps. *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division Summer Meeting FEDSM 2021; New York, USA*. ASME; 2021. V. 2. p. V002T00A001. doi:10.1115/FEDSM2021-65515.
15. Moreno-Rodenas AM, Duinmeijer A, Clemens FHL. R. Deep-learning based monitoring of FOG layer dynamics in wastewater pumping stations. *Water Research*. 2021; 202: 117482. doi:10.1016/j.watres.2021.117482.
16. Ganora D, Isacco S, Claps P. Framework for enhanced stormwater management by optimization of sewer pumping stations. *Journal of Environmental Engineering (United States)*. 2017; 143(8): 04017025. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001220
17. Wang X, Zhou X, & Zhang L. Energy-saving mechanism and control strategy of

sewage pumping station system. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*. 2005; 39(7): 1068-71.

18. Vasenin AB, Stepanov SE, Kryukov OV. Main problems and new technical means of automation sewage pumping station systems. *Ecological Systems and Devices*. 2019;11: 3-8. (In Russ). doi:10.25791/esip.11.2019.981

19. Usachev AP. Method of evaluating the effectiveness of frequency regulation of the performance of sewage pumping units. *Water supply and sanitary technique*. 2020;1:42-51. doi:10.35776/MNP.2020.01.06

20. Maltsev AN, Khvatov OS. The definition of energy efficient modes in pumping units operation with variable frequency drives at the sewer stations. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2017; 119(4): 100-107.

21. Berezin SE, Bazhenov VI. Novatsii energosberezheniya v VKKH, proverennyye praktikoy. *Nailuchshiy dostupnyye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya*. 2016;5:48-55.

22. Berezin SE, et al. *Nasosnyye stantsii s pogrulzhnymi nasosami. Raschet i konstruirovaniye*. Moscow: Stroyizdat; 2008.

23. Rybakov RS, Temnyi DS, Bitiev AV. Comparative assessment of the estimated and actual energy consumption of sewage pumping stations. *Water supply and sanitary technique*. 2020; 11: 38-41.

24. Prokhorov VI, Razakov MA, Chernova RV. Teplopotrebleniye gorodskoy kanalizatsionnoy nasosnoy stantsii. In: Andrianov A.P. editors. *XIV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, posvyashchennaya pamyati akademika RAN S.V. Yakovleva i 90-letiyu so dnya sozdaniya fakul'teta «ViV»*; 14–15 March 2019; Moscow, Russia. Moscow: MGSU Publ., 2019. pp. 128-135.

25. Gilbert EM, Agrawal S, Karst SM, et al. Low temperature partial nitrification/anammox in a moving bed biofilm reactor treating low strength wastewater. *Environmental science & technology*. 2014; 15(48): 8784-92.

26. Belova DD. Selection carriers and parameters for the immobilization of consortium of microorganisms-destroyers of phosphates. *Bulletin of KSAU*. 2018; 137 (2): 294-299.

27. Kolesnikov VP, Ksenofontov BS, Chernikova L Yu, et al. Combined facilities for wastewater treatment in Russian cities and communities. *Water supply and sanitary technique*. 2020; 11: 27-34.

28. Prokhorov V, Rymarov A, Razakov M, Kosarev A. Specialized method of calculating heat input from wastewater in the premises of the sewage pumping stations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;463 (3):032073. doi: 10.1088/1757-899X/463/3/032073.

29. Kugayevskaya TS, Zubricheva LL. Teplovyye i teplovozdushnyye balansy kanalizatsionnoy nasosnoy stantsii. *Sbornik nauchnykh trudov Sworld*. 2014; 18 (1): 71-75.

30. Prokhorov VI, Razakov MA, Beloglazov AR. Qualitative and quantitative assessment of heat transfer from waste water to the sewage pumping station rooms. *Natural and Technical Sciences*. 2017;109 (7):143-146.

31. Rymarov AG, Razakov MA, Chernova RV. Operation control of the heating system at sewage pumping stations. *Natural and Technical Sciences*. 2017; 114 (12): 293-295.

32. Malyavina EG, Ivanov DS, Mikheyeva EA. Comparison of the results of calculating the heat loss of parts of buildings buried in the ground according to existing engineering methods. *Natural and Technical Sciences*. 2015; 84 (6): 549-552.

Author of the publication

Muhammet A. Razakov – Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia; Russian Biotechnological University, Moscow, Russia.

Получено

21.11.2022г.

Отредактировано

28.11.2022г.

Принято

01.12.2022г.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



УДК 662.76

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ С ВНЕШНИМ И ВНУТРЕННИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Демин А.В.¹, Демина Г.В.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3658-7830>, alexei_demin@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Выявление оптимальных режимов для автотермического и аллотермического способов газификации растительной биомассы с точки зрения энергетических параметров генераторных газов, а также определение экологических показателей при последующем сжигании генераторных газов для получения тепловой энергии. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* При моделировании процессов газификации использована нестехиометрическая модель, основанная на предположении, что химически реагирующая многокомпонентная смесь находится в состоянии термодинамического и химического равновесия, которому соответствует минимальное значение изобарно-изотермического потенциала. При моделировании горения генераторного газа в смеси с воздухом использована кинетическая модель проточного реактора идеального смешения и учитывается детальный механизм химического взаимодействия для реагирующей системы C-H-O-N-S. Теплота сгорания генераторного газа, полученного при паровой газификации и внешнем подводе тепловой энергии существенно выше, чем теплота сгорания газа, полученного при внутреннем подводе тепловой энергии. Однако значения энергетического потенциала и термохимического КПД весьма близки для обоих типов газификации. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Для растительной биомассы, имеющей заданный осредненный элементный состав, определены условия газификации, способствующие повышению степени конверсии исходных материалов в генераторный газ. В частности, для автотермического способа газификации максимальные расчетные значения энергетического потенциала сухого обеззоленного генераторного газа и термохимического КПД получены при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 0,32$. Для аллотермического способа газификации максимальным расчетным значениям энергетического потенциала генераторного газа и термохимического КПД соответствует диапазон температуры газификации $T \approx 1050-1100$ К и массовая доля подводимого пара $g_{H_2O} \approx 0,217$. Для обеспечения этих условий потребуются подвод тепловой энергии за счет сжигания ≈ 37 масс. % генераторного газа. Генераторный газ, полученный аллотермическим способом, имеет более высокие энергетические показатели, а негативное воздействие на окружающую среду при его последующем сжигании характеризуются меньшими удельными выбросами CO и CO₂ в пересчете на тонну условного топлива.

Ключевые слова: биомасса; газификация; генераторный газ; горение; моделирование; численные исследования.

Для цитирования: Демин А.В., Демина Г.В. Экологические характеристики термической утилизации отходов с внешним и внутренним подводом тепловой энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24, № 6. С.143-152. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152.

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF THERMAL UTILIZATION OF WASTE WITH EXTERNAL AND INTERNAL SUPPLY OF THERMAL ENERGY

AV. Demin¹, GV. Demina²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3658-7830>, alexei_demin@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Identification of optimal regimes for autothermal and allothermic methods of gasification of plant biomass in terms of energy parameters of generator gases, as well as determination of environmental indicators during subsequent combustion of generator gases to obtain thermal energy. *METHODS.* When modeling gasification processes, a non-stoichiometric model was used, based on the assumption that a chemically reacting multicomponent mixture is in a state of thermodynamic and chemical equilibrium, which corresponds to the minimum value of the isobaric-isothermal potential. When modeling the combustion of generator gas in a mixture with air, a kinetic model of a perfectly mixed flow reactor was used and the detailed mechanism of chemical interaction for the C-H-O-N-S reacting system was taken into account. The calorific value of generator gas obtained by steam gasification and external supply of thermal energy is significantly higher than the calorific value of gas obtained by internal supply of thermal energy. However, the values of the energy potential and thermochemical efficiency are very close for both types of gasification. *RESULTS.* For plant biomass with a given averaged elemental composition, gasification conditions are determined that increase the degree of conversion of initial materials into generator gas. In particular, for the autothermal gasification method, the maximum calculated values of the energy potential of dry ash-free generator gas and thermochemical efficiency were obtained at an excess air coefficient $\alpha \approx 0.32$. For the allothermic gasification method, the maximum calculated values of the energy potential of the generator gas and the thermochemical efficiency correspond to the gasification temperature range $T \approx 1050-1100$ K and the mass fraction of the supplied steam $g_{H_2O} \approx 0.217$. To ensure these conditions, it will be necessary to supply thermal energy through combustion of ≈ 37 wt. % generator gas. Generator gas produced by the allothermic method has higher energy performance, and the negative impact on the environment during its subsequent combustion is characterized by lower specific CO and CO₂ emissions in terms of a ton of reference fuel.

Keywords: biomass; gasification; generator gas; combustion; modeling; numerical research.

For citation: Demin AV, Demina GV. Environmental characteristics of thermal utilization of waste with external and internal supply of thermal energy. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):143-152. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152.

Введение. Литературный обзор

Биомасса считается возобновляемым источником энергии, нейтральным с точки зрения выбросов парниковых газов. Основными методами термохимической конверсии биомассы являются сжигание, пиролиз и газификация. Производство тепловой и электрической энергии за счет сжигания биомассы имеет невысокий коэффициент полезного действия (КПД). Пиролиз позволяет получать смесь высокомолекулярных углеводородов. Определенные ограничения на широкое использование технологий пиролиза накладывает сложность дальнейшей переработки получаемых жидких продуктов. Наиболее перспективными обоснованно считаются технологии газификации биомассы. В результате газификации образуется большое количество газообразных продуктов, содержащих горючие газы (H₂, CO, CH₄ и др.). На эффективность газификации влияют многие факторы, такие как вид газифицирующего агента, массовое соотношение газифицирующего агента и биомассы, начальная влажность биомассы, элементные составы органической и минеральной частей биомассы, конструкция газификатора, режимные характеристики (уровни температуры и давления, производительность) и т. д.

Актуальными научно-техническими задачами при модернизации существующих или создании новых газифицирующих установок являются повышение степени конверсии биомассы в генераторный газ, снижение затрат на осуществление процессов и уменьшение негативного воздействия на окружающую среду. Для решения такой комплексной задачи

необходимо применять теоретический анализ наряду с экспериментальными исследованиями. Известны затруднения, связанные с использованием результатов экспериментальных испытаний конкретных конструкций для создания других конструкций, отличающихся видом используемой биомассы и режимными характеристиками. Поэтому изучению процессов термической переработки биомассы и их математическому моделированию уделяется большое внимание [1-14]. Моделирование процессов проводят чаще всего с использованием равновесных или кинетических подходов [1, 5]. Наряду с равновесными и кинетическими моделями находят применение модели на основе методов CFD-моделирования и искусственных нейронных сетей [2, 4, 6, 7, 9, 10].

Газификация биомассы относится к числу перспективных технологий, как с точки зрения энергообеспечения, так и с точки зрения получения водорода и использованию генераторного газа как сырья в химических технологиях [3, 11]. Существенное практическое значение имеет исследование процессов, в целом характерных для пиролиза, газификации и сжигания [8, 12-14].

Следует отметить, что определение равновесного состава является частью многих задач высокотемпературной энергетики и характеризуется большим разнообразием методов расчета. Основы методов расчета термодинамического и химического равновесия представлены в работах А.П. Ваничева, В.П. Глушко, Я.Б. Зельдовича, А.В. Болгарского, В.Е. Алемасова, А.Ф. Дрегалю и др. Широкому применению равновесных моделей способствовали их основные преимущества: универсальность для различных видов исходных материалов и режимных параметров газификации; независимость от конструкции газификатора; возможность прогнозирования максимально достижимой степени конверсии биомассы.

В данной работе рассматриваются два способа организации процессов газификации биомассы. Первый способ основан на внутреннем подводе к реагирующей системе тепловой энергии, получаемой за счет сжигания части биомассы при значениях коэффициента избытка воздуха $\ll 1$ (далее тип газификации А). Газифицирующим агентом формально является воздух, но фактически – продукты неполного сгорания биомассы. Второй – на внешнем подводе тепловой энергии, получаемой при сжигании части генерируемого газа (далее тип газификации Б). Продукты сгорания горючего газа не смешиваются с продуктами газификации. Тепло, необходимое для газификации передается через внешнюю стенку реактора, а также идет на предварительный нагрев газифицирующего агента – водяного пара.

Основной целью работы является выявление оптимальных режимов для двух выбранных типов газификации с точки зрения энергетических параметров генераторных газов, а также определение экологических показателей при последующем сжигании генераторных газов для получения тепловой энергии.

Новизна результатов исследования заключается в том, что для типичного элементного состава растительной биомассы определены оптимальные режимные параметры газификации, а также проведена сравнительная оценка состава и количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании генераторных газов, полученных двумя наиболее распространенными способами газификации. Принятый подход и полученные результаты имеют практическую значимость при создании или усовершенствовании установок для получения генераторных газов и их использовании в качестве топлива в тепловых энергоустановках.

Материалы и методы

Наиболее доступным ресурсом для производства генераторного газа из возобновляемых источников сырья является растительная биомасса (солома зерновых культур, лузга подсолнечника, древесные отходы, и др.), различные виды которой имеют примерно одинаковый элементный состав. При выполнении исследований принято, что условная биомасса представляет собой механическую смесь органической и минеральной частей с определенным влагосодержанием. Элементный состав условной биомассы был принят на основе анализа и обобщения известных данных [1, 2, 7, 10]. Состав органической части в сухом беззольном состоянии, масс. %: углерод 51,7065; водород 5,2531; кислород 41,8824; сера 0,124; азот 1,034. В составе минеральной части биомассы присутствуют соединения таких макрокомпонентов, как калий, кальций, кремний, магний. При выполнении расчетов учитывались следующие вещества, входящие в состав золы в мелкодисперсном конденсированном состоянии: K_2O , CaO , SiO_2 , MgO . Состав золы, масс. %: калий 9,1251; кальций 24,2055; кремний 22,4723; магний 4,2557; кислород 39,9414. Массовая доля золы и влажность биомассы приняты равными 3 % и 8 %, соответственно. Низшая теплота сгорания биомассы определена по известной формуле Д.И. Менделеева

$Q_n = 16248$ кДж/кг. Давление в реакционном объеме $p = 0,101$ МПа.

При моделировании процессов газификации использована нестехиометрическая модель, основанная на предположении, что химически реагирующая многокомпонентная смесь находится в состоянии термодинамического и химического равновесия, которому соответствует минимальное значение изобарно-изотермического потенциала. В конденсированной фазе находятся частицы золы, а также, в зависимости от условий организации процессов, может присутствовать часть углерода. Математическая модель газификации биомассы представлена системой уравнений, включающей нелинейные алгебраические уравнения в логарифмической форме: закон действующих масс (диссоциации); уравнения сохранения вещества; уравнение, устанавливающее равенство давления смеси и суммарного числа молей веществ; уравнение сохранения энергии [15].

При моделировании горения генераторного газа в смеси с воздухом использована кинетическая модель проточного реактора идеального смешения [16], согласно которой химическое взаимодействие в газовой фазе подчиняется основным положениям химической кинетики, в том числе закону действующих масс. Все химические превращения происходят в виде независимых друг от друга элементарных реакций, а механизм химического взаимодействия представлен совокупностью таких элементарных химических реакций. Для реагирующей многокомпонентной газовой смеси, состоящей из исходных реагентов, промежуточных и конечных продуктов сгорания (Ar, O, H, N, C, S, CO, CO₂, H₂, CH₄, H₂O, H₂S, N₂, O₂, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CH₃, CH₂, CH, C₂H, C₂H₃, C₂H₅, H₂CO, HCO, HC₂O, N₂H₂, N₂H, NH₃, NH₂, NH, HNO, HCN, CN, NCO, NO₂, N₂O, HS, HO₂, OH, NO, S₂, SO, SO₂, SO₃), механизм химического взаимодействия включал 185 элементарных обратимых реакций. Сведения о химических реакциях были выбраны из базы данных [17].

Эффективность процессов газификации оценивалась с использованием следующих показателей:

$M_{\text{шт}}$ – общая масса продуктов газификации, включающих газообразные вещества и конденсированную фазу, кг;

M – масса сухого обеззоленного газа, получаемого при переработке 1 кг биомассы, кг/кг биомассы;

$h_{\text{шт}}$, h_6 – удельные массовые энтальпии продуктов газификации при температуре газификации и биомассы при начальной температуре 293 К, кДж/кг, соответственно;

H_r – низшая теплота сгорания сухого обеззоленного генераторного газа, кДж/кг;

$m = M_{\text{шт}}(h_{\text{шт}} - h_6) / H_r$ – масса сухого обеззоленного газа, тепловая энергия которого используется для осуществления процессов газификации 1 кг биомассы, кг/кг биомассы (для газификации типа А $m = 0$);

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса водяного пара, используемого при газификации 1 кг биомассы, кг/кг биомассы;

$g_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{H}_2\text{O}} / (1 + m_{\text{H}_2\text{O}})$ – массовая доля водяного пара, используемого для газификации 1 кг биомассы;

$Q = (M - m) \cdot H_r$ – энергетический потенциал сухого обеззоленного газа, полученного при переработке 1 кг биомассы, кДж;

$\eta = H_r \cdot (M - m) \cdot 100 / Q_n$ – термохимический КПД газификации биомассы, %.

Потери тепловой энергии не учитывались. Таким образом, полученные оценки основных показателей близки к своим идеальным теоретически достижимым значениям.

Результаты и их обсуждение

Основные результаты прогнозирования состава и параметров генераторного газа при газификации типа А приведены в табл. 1. Состав, значения удельной теплоты сгорания и масса получаемого газа приведены для сухого обеззоленного состояния.

Изменение концентраций газообразных веществ и основных параметров генераторного газа соответствуют известным закономерностям, например, [1, 10].

Характерный максимум концентрации СО выявлен при $\alpha \approx 0,32$. С увеличением коэффициента избытка окислителя концентрация Н₂ снижается, а концентрация N₂ повышается. Кроме того, при значениях $\alpha \leq 0,31$ в продуктах газификации присутствует углерод в конденсированном состоянии; массовая доля твердого углерода при $\alpha = 0,31$ составляет 3,7 %, а при $\alpha = 0,30$ – 8,2 %. Максимальные значения энергетического потенциала сухого обеззоленного генераторного газа и термохимического КПД процессов

газификации наблюдаются при $\alpha = 0,32$.

Таблица 1

Состав и параметры генераторного газа при различных значениях
коэффициента избытка воздуха

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации	Коэффициент избытка воздуха α				
	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34
CO, об. %	25,2967	25,7151	26,0377	25,9304	25,7885
H ₂ , об. %	21,0331	20,6933	20,4186	20,2896	19,894
CH ₄ , об. %	0,74615	0,6970	0,59852	0,29611	0,11829
H ₂ S, об. %	0,0339	0,0331	0,0323	0,0318	0,0314
CO ₂ , об. %	10,0489	9,7049	9,4008	9,2654	9,1742
N ₂ , об. %	42,5606	42,8697	43,2188	43,885	44,6824
H _г , кДж/кг	5335	5325	5295	5158	5020
M, кг/кг биомассы	2,4581	2,5257	2,5895	2,6345	2,6774
Q, кДж	13115	13449	13711	13590	13442
η , %	80,71	82,77	84,39	83,64	82,73

При исследовании процессов газификации типа Б, на основании предварительных расчетов, были установлены температурные диапазоны ($T = 1000$ - 1260 К) и количества водяного пара ($q_{H_2O} = 0,195$ - $0,314$), при которых достигается достаточно высокая эффективность газификации, оцениваемая по наибольшим значениям энергетического потенциала генераторного газа и термохимического КПД. Основные результаты прогнозирования состава и параметров генераторного газа приведены в табл. 2 – 4. Данные показаны для трех различных значений массы пара, участвующего в реакциях газификации.

Таблица 2

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации при
различных температурах газификации ($m_{H_2O} = 0,24324$ кг/кг биомассы)

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации	Температура газификации T, К				
	1000	1050	1100	1175	1260
CO, об. %	40,051	44,719	47,012	47,5005	47,8121
H ₂ , об. %	49,9576	49,5023	49,6238	50,2194	50,2963
CH ₄ , об. %	2,1853	1,3865	0,7361	0,1709	0,0357
H ₂ S, об. %	0,0510	0,0469	0,0448	0,0442	0,04419
CO ₂ , об. %	7,2679	3,897	2,1555	1,642	1,3895
N ₂ , об. %	0,48629	0,44737	0,42704	0,4221	0,42153
H _г , кДж/кг	15812	16507	16858	16933	16981
m, кг/ кг биомассы	0,35272	0,38267	0,40457	0,42092	0,43459
M, кг/ кг биомассы	1,0735	1,1474	1,1855	1,1865	1,1848
Q, кДж	11396	12624	13165	12963	12740
η , %	70,14	77,69	81,02	79,78	78,40

Таблица 3

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации при
различных температурах газификации ($m_{H_2O} = 0,27778$ кг/кг биомассы)

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации	Температура газификации T, К				
	1000	1050	1100	1175	1260
CO, об. %	40,0671	44,7085	45,4774	46,0961	46,5584
H ₂ , об. %	49,9738	49,5431	50,4729	50,7838	50,7369
CH ₄ , об. %	2,1834	1,3714	0,4875	0,1013	0,0206
H ₂ S, об. %	0,0487	0,0448	0,0440	0,0437	0,0438
CO ₂ , об. %	7,2614	3,9037	3,0976	2,557	2,2217
N ₂ , об. %	0,4647	0,4276	0,4198	0,4173	0,4178
H _г , кДж/кг	15820	16511	16622	16715	16786
m, кг/кг биомассы	0,36747	0,39877	0,41457	0,42947	0,44271
M, кг/кг биомассы	1,1243	1,2005	1,2023	1,2003	1,1965
Q, кДж	11974	13237	13093	12883	12653
η , %	73,69	81,47	80,58	79,29	77,88

Таблица 4

Состав генераторного газа и показатели процесса газификации при различных температурах газификации ($m_{H_2O} = 0,31429$ кг/кг биомассы)					
Состав генераторного газа и показатели процесса газификации	Температура газификации T , К				
	1000	1050	1100	1175	1260
CO, об. %	40,0905	43,1176	43,9417	44,6903	45,3054
H ₂ , об. %	49,9905	50,5267	51,1778	51,2982	51,1669
CH ₄ , об. %	2,1794	1,0374	0,347	0,0703	0,0141
H ₂ S, об. %	0,0465	0,0439	0,0434	0,0433	0,0434
CO ₂ , об. %	7,2484	4,8542	4,0755	3,4843	3,0552
N ₂ , об. %	0,44379	0,4193	0,41389	0,41299	0,41418
H_f , кДж/кг	15831	16269	16386	16498	16592
m , кг/кг биомассы	0,38326	0,40987	0,42402	0,43786	0,45105
M , кг/кг биомассы	1,1782	1,219	1,2184	1,2139	1,2084
Q , кДж	12585	13162	13016	12803	12565
η , %	77,45	81,01	80,11	78,80	77,33

Анализ полученных результатов позволил определить оптимальные режимы процессов паровой газификации, соответствующие максимальным расчетным значениям энергетического потенциала генераторного газа и термохимическому КПД (см. табл. 3): температурный диапазон $T = 1050-1100$ К; массовая доля подводимого пара $g_{H_2O} = 0,217$.

При температурах газификации $T \leq 1000$ К в продуктах газификации отмечено наличие конденсированного углерода. Например, при температуре $T = 1000$ К массовые доли конденсированного углерода: $g_C = 4,8$ % при $g_{H_2O} = 0,195$; $g_C = 3,2$ % при $g_{H_2O} = 0,217$; $g_C = 1,6$ % при $g_{H_2O} = 0,314$.

Из результатов расчетов следует, что теплота сгорания генераторного газа, полученного при паровой газификации и внешнем подводе тепловой энергии существенно выше, чем теплота сгорания газа, полученного при внутреннем подводе тепловой энергии. Однако значения энергетического потенциала и термохимического КПД весьма близки для обоих типов газификации.

Далее моделировались условия в камере сгорания при сжигании смеси воздуха и сухого генераторного газа, очищенного от конденсированной фазы, при различных коэффициентах избытка воздуха. Для вычислительных экспериментов были выбраны два варианта исходных данных по составу генераторных газов: 1 – генераторный газ, полученный при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 0,32$ (см. табл. 1, тип генераторного газа А); 2 – генераторный газ, полученный при температуре $T = 1050$ К и массовой доле подводимого пара $g_{H_2O} = 0,217$ (см. табл. 3, тип генераторного газа Б).

Для двух типов генераторного газа в табл. 5, 6 приведены некоторые из результатов выполненных расчетов основных характеристик продуктов сгорания, включая выбросы таких загрязняющих веществ, как CO, CO₂, NO₂, SO₂.

Таблица 5

Параметры продуктов сгорания при различных значениях коэффициента избытка воздуха (тип генераторного газа А)				
Параметры	Значения параметров			
Коэффициент избытка воздуха α	1,0	1,2	1,4	1,6
Температура продуктов сгорания T , К	1950	1858	1746	1644
Массовое соотношение воздуха и генераторного газа	1,3978	1,6773	1,9569	2,2364
Масса продуктов сгорания при сжигании одной тонны генераторного газа, т	2,3978	2,6773	2,9569	3,2364
Выбросы CO, кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	22,351	5,5452	2,1778	1,3799
Выбросы CO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	620,7	647,69	652,87	653,78
Выбросы NO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	0,383	0,316	0,138	0,074
Выбросы SO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	0,856	0,857	0,857	0,857

Таблица 6

Параметры продуктов сгорания при различных значениях коэффициента избытка воздуха (тип генераторного газа Б)				
Параметры	Значения параметров			
Коэффициент избытка воздуха α	1,0	1,2	1,4	1,6
Температура продуктов сгорания T , К	2323	2202	2050	1900
Массовое соотношение воздуха и генераторного газа	4,4206	5,3047	6,1889	7,073

Продолжение таблицы 6

Масса продуктов сгорания при сжигании одной тонны генераторного газа, т	5,4206	6,3047	7,1889	8,073
Выбросы CO, кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	87,359	13,889	2,262	1,139
Выбросы CO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	1266,7	1386	1406,3	1403,2
Выбросы NO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	21,975	20,687	6,854	1,615
Выбросы SO ₂ , кг на 1 т сжигаемого генераторного газа	1,834	1,839	1,841	1,835

Изменение массовых долей указанных веществ в продуктах сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха приведено на рис. 1, 2.

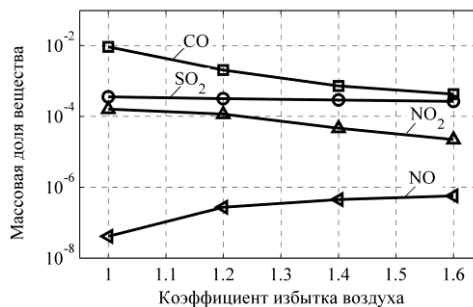


Рис. 1. Массовые доли загрязняющих веществ в продуктах сгорания генераторного газа (тип А) в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Fig. 1. Mass fractions of pollutants in the combustion products of generator gas (type A) depending on the coefficient of excess air

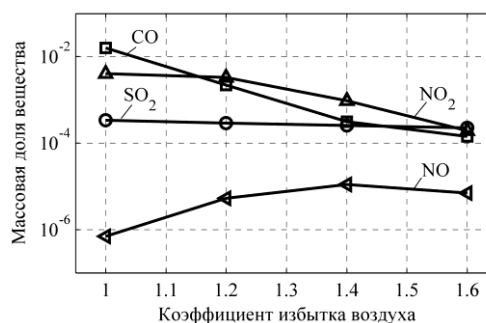


Рис. 2. Массовые доли загрязняющих веществ в продуктах сгорания генераторного газа (тип Б) в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Fig. 2. Mass fractions of pollutants in the combustion products of generator gas (type B) depending on the coefficient of excess air

Из приведенных результатов видно, что для сжигания генераторного газа типа Б требуется большее количество воздуха, чем для сжигания генераторного газа типа А, поэтому и удельные показатели выбросов в пересчете на одну тонну сжигаемых газов выше для газа типа Б, по сравнению с такими же показателями для газа типа А. Однако сравнение экологических показателей продуктов сгорания для двух исследуемых типов генераторного газа наиболее целесообразно проводить по удельным показателям выбросов в пересчете на одну тонну условного топлива (табл. 7).

Таблица 7

Удельные выбросы загрязняющих веществ					
Тип генераторного газа	Вещество	Массовый выброс вещества, кг/т у. т., при различных значениях коэффициента избытка воздуха α			
		$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,4$	$\alpha = 1,6$
А	NO _x	2,118	1,748	0,766	0,411
	SO ₂	4,741	4,745	4,745	4,742
	CO	123,68	30,684	12,051	7,636
	CO ₂	3434,6	3584	3612,6	3617,6
Б	NO _x	48,64	45,789	15,172	3,575
	SO ₂	4,059	4,071	4,0767	4,063
	CO	193,37	30,744	5,007	2,523
	CO ₂	2803,8	3067,8	3112,7	3105,9

В камерах сгорания тепловых энергоустановок сжигание горючих газов, как правило, осуществляется при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1,2-1,4$. В таких условиях более высокий уровень температур характерен для горения генераторного газа типа Б, следствием этого являются и более высокие концентрации оксидов азота. Для их снижения разработаны и успешно применяются соответствующие способы организации рабочих процессов, например, ступенчатый подвод воздуха, нестехиометрическое сжигание и оптимизация времени пребывания реагирующей смеси в камере сгорания.

Из анализа приведенных в табл. 7 расчетных данных следует, что с точки зрения выбросов СО и СО₂ практическое использование для получения тепловой энергии генераторного газа типа Б будет оказывать меньшее негативное воздействие на окружающую среду, чем использование генераторного газа типа А.

Заключение

Выполнены численные исследования процессов газификации растительной биомассы при внутреннем и внешнем подводе тепловой энергии и разных типах газифицирующих агентов.

Для растительной биомассы, имеющей заданный осредненный элементный состав, определены условия газификации, способствующие повышению степени конверсии исходных материалов в генераторный газ.

В частности, для автотермического способа газификации максимальные расчетные значения энергетического потенциала сухого обеззоленного генераторного газа и термохимического КПД получены при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 0,32$.

Для аллотермического способа газификации максимальным расчетным значениям энергетического потенциала генераторного газа и термохимического КПД соответствует диапазон температуры газификации $T \approx 1050-1100$ К и массовая доля подводимого пара $g_{H_2O} \approx 0,217$. Для обеспечения этих условий потребуется подвод тепловой энергии за счет сжигания ≈ 37 масс. % генераторного газа.

Генераторный газ, полученный аллотермическим способом, имеет более высокие энергетические показатели, а негативное воздействие на окружающую среду при его последующем сжигании характеризуются меньшими удельными выбросами СО и СО₂ в пересчете на тонну условного топлива.

Литература

1. Puig-Arnavat M., Bruno J. C., Coronas A. Review and analysis of biomass gasification models // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. V. 14. pp. 2841-2851. doi: 10.1016/j.rser.2010.07.030.
2. Dipal Baruah, Baruah D.C. Modeling of biomass gasification: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. V. 39. pp. 806 – 815. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.129.
3. Farzad S., Mandegari M., Görgens J. A Critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments // Biofuel Research Journal. 2016. V. 3(4). pp. 483 – 495. doi: 10.18331/BRJ2016.3.4.3.
4. Aydinli B., Caglar A., Pekol S., et al. The prediction of potential energy and matter production from biomass pyrolysis with artificial neural network // Energy Exploration & Exploitation. 2017. V. 35(6). pp. 698 712. doi: 10.1177/2F0144598717716282.
5. Safarian S., Unnþórsson R., Richter C. A review of biomass gasification modelling // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. V. 110. pp. 378 – 391. doi: 10.1016/j.rser.2019.05.003.
6. Ramos A., Monteiro E., Rouboa A. Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. V. 110. pp. 188 – 206. doi: 10.1016/j.rser.2019.04.048.
7. Mazaheri N., Akbarzadeh A.H., Madadian E., et al. Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production // Energy Conversion and Management. 2019. V. 183. pp. 671 – 688. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.097.
8. Perera S., Wickramasinghe C., Samarasiri B., et al. Modeling of thermochemical conversion of waste biomass – a comprehensive review // Biofuel Research Journal. 2021. V. 8(4). pp. 1481 – 1528. doi: 10.18331/BRJ2021.8.4.3.
9. Kushwah A., Reina T.R., Short M. Modelling approaches for biomass gasifiers: a comprehensive overview // Science of the Total Environment. 2022. V. 834. pp. 155243. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155243.
10. Ajourloo M., Ghodrat M., Scott J., et al. Recent advances in thermodynamic analysis of biomass gasification: a review on numerical modelling and simulation // Journal of the Energy Institute. 2022. V. 102. pp. 395 – 419. doi: 10.1016/j.joei.2022.05.003.

11. Tezer Ö., Karabağ N., Öngen A., et al. Biomass gasification for sustainable energy production: a review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. V. 47. Is. 34. P. 15419-15433. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.158
12. Павлов Г.И., Ахметшина А.И., Сабирзянов А.Н., и др. Разработка расчетной схемы камеры сгорания для сжигания щепы старых шпал // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 3-13.
13. Таймаров М.А., Чикляев Е.Г. Разработка прямоточной пиролизной установки для пирогазификации древесины // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020. Т. 22. № 6. С. 68-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-68-78.
14. Донской И.Г. Математическое моделирование газификации древесины с разложением смолистых продуктов на частицах активных компонентов // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 107-117. doi:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117.
15. Демин А.В. Оценка экологичности и эффективности процессов газификации биомассы // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2021. № 1. С. 40-50. doi:10.17277/voprosy.2021.01.pp.040-050.
16. Naoumov V. I., Krioukov V.G., Abdullin A.L., et al. *Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications*. – Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108581714
17. NIST Chemical Kinetics Database / J.A. Manion, R.E. Huie, R. D. Levin et al // NIST Standard Reference Database 17, Version 7.0 (Web Version), Release 1.6.8, Data version 2022. – Gaithersburg, Maryland : National Institute of Standards and Technology, 2022. Доступно по: <http://kinetics.nist.gov>. Ссылка активна на 10 июня 2022.

Авторы публикации

Демин Алексей Владимирович – профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», Казанский государственный энергетический университет.

Демина Галина Владимировна – доцент кафедры «Ботаника и физиология растений», Казанский федеральный университет.

References

1. Puig-Arnavat M., Bruno J. C., Coronas A. Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14:2841-2851. doi: 10.1016/j.rser.2010.07.030.
2. Dipal Baruah, Baruah D.C. *Modeling of biomass gasification: a review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;39:806-815. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.129.
3. Farzad S, Mandegari M, Görgens JA Critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments. *Biofuel Research Journal*. 2016;3(4):483-495. doi: 10.18331/BRJ2016.3.4.3.
4. Aydinli B, Caglar A, Pekol S, et al. The prediction of potential energy and matter production from biomass pyrolysis with artificial neural network. *Energy Exploration & Exploitation*. 2017;35(6):698-712. doi: 10.1177/2F0144598717716282.
5. Safarian S, Unnpórrsson R, Richter C. *A review of biomass gasification modelling*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;110:378-391. doi: 10.1016/j.rser.2019.05.003.
6. Ramos A, Monteiro E, Rouboa A. *Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: a review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;110:188-206. doi: 10.1016/j.rser.2019.04.048.
7. Mazaheri N, Akbarzadeh AH, Madadian E, et al. Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production. *Energy Conversion and Management*. 2019;183:671-688. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.097.
8. Perera S, Wickramasinghe C, Samarasinghe B, et al. Modeling of thermochemical conversion of waste biomass – a comprehensive review. *Biofuel Research Journal*. 2021;8(4):1481-1528. doi: 10.18331/BRJ2021.8.4.3.
9. Kushwah A, Reina TR, Short M. Modelling approaches for biomass gasifiers: a comprehensive overview. *Science of the Total Environment*. 2022;834:155243. doi: 10.1016/j.scitotenv. 2022.155243.
10. Ajorloo M, Ghodrat M, Scott J, et al. Recent advances in thermodynamic analysis of biomass gasification: a review on numerical modelling and simulation. *Journal of the Energy*

Institute. 2022;102:395-419. doi: 10.1016/j.joei.2022.05.003.

11. Tezer Ö, Karabağ N, Öngen A, et al. Biomass gasification for sustainable energy production: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(34):15419-15433. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.158

12. Pavlov GI, Akhmetshina AI, Sabirzyanov AN, et al. Development of the design scheme of the combustion chamber for burning of wood chips the old sleepers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(1-2):3-13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-3-13>.

13. Taimarov MA, Chiklyayev EG. Development of a direct flow pyrolysis plant for pyrogenetic decomposition of wood. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):68-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-68-78.

14. Donskoy IG. *Mathematical modelling of wood gasification with tarry products decomposition on active material particles*. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018;20(11-12):107-117. doi:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-107-117.

15. Demin AV. Evaluation of environmental friendliness and efficiency of biomass gasification processes. Problems of contemporary science and practice. *Vernadsky university*. 2021;1(79):40-50. doi:10.17277/voprosy.2021.01.pp.040-050.

16. Naoumov VI, Krioukov VG, Abdullin AL, et al. *Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications*. Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108581714.

17. Manion JA, Huie RE, Levin RD, et al. *NIST Chemical Kinetics Database*. NIST Standard Reference Database 17, Version 7.0 (Web Version), Release 1.6.8, Data version 2022. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2022. Available at: <http://kinetics.nist.gov>. Accessed: 10 Jun 2022.

Authors of the publication

Alexey V. Demin – Professor of the Department «Engineering ecology and labor safety» of Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Galina V. Demina – Associate Professor of the Department «Botany and Plant Physiology» of Kazan Federal University, Kazan, Russia.

Получено 22.11.2022г.

Отредактировано 28.11.2022г.

Принято 02.12.2022г.

БИОКОКС ИЗ ИЛОВОГО ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД – ЭФФЕКТИВНЫЙ СУБСТРАТ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО И ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОЧВ

Макоев С.О., Ахметова И. Г.

**Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
MakoevSO@mpei.ru**

Резюме: Очистка сточных вод и утилизации отходов сорбентов, полученных из остаточной биомассы. Получение биококса из илового осадка. Обеспечение максимальной теплоты сгорания сырья. **МЕТОДЫ.** Рентгенофазовый анализ золы после сжигания отработанных сорбентов. Термогравиметрический анализ биококса в окислительной среде. Оценка элементного анализа исходного сырья и продуктов термической конверсии ТКО. Экспериментальный анализ морфологического состава ТКО для муниципального округа. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проведены экспериментальные исследования по анализу илового осадка сточных вод и проведена оценка по энергетическим и экологическим показателям. Выполнено обоснование возможности частичного замещения ископаемого топлива посредством использования ТКО при производстве тепловой энергии. Приведена схема очистки сточных вод и использования отработанных сорбентов в качестве топлива. Для уточнения теплоты сгорания были проведены эксперименты в калориметрической бомбе, которые показали, что биококс имеет низшую теплоту сгорания равную 11,5 МДж/кг. Получена теплота сгорания биококса по данным термоанализатора, которая составляет 8–12 МДж/кг и зависит как от типа исходного осадка сточных вод, так и от режима подготовки биококса. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные результаты позволяют оценить эффективность применения биококса, полученного из осадочных сточных вод, для последующего применения для обеззараживания полигонов ТКО и влияние для восстановления качества почв.

Ключевые слова: биококс; обеззараживание полигонов; переработка илового осадка; сточные воды; утилизация ТКО.

Для цитирования: Макоев С.О., Ахметова И. Г. Биококс из илового осадка сточных вод – эффективный субстрат для обеззараживания полигонов ТКО и восстановления качества почв // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 153-164. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-153-164.

BIOCOKE FROM WASTEWATER SLUDGE IS AN EFFECTIVE SUBSTRATE FOR DISINFECTING MSW POLYGONS AND RESTORE SOIL QUALITY

SO. Makoev, IG. Akhmetova

**National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
MakoevSO@mpei.ru**

Abstract. THE PURPOSE. Wastewater treatment and waste disposal of sorbents obtained from residual biomass. Obtaining biocoke from sludge. Ensuring maximum calorific value of raw materials. **METHODS.** X-ray phase analysis of ash after burning spent sorbents. Thermogravimetric analysis of biocoke in an oxidizing environment. Elemental analysis evaluation of raw materials and products of municipal solid waste thermal conversion. Experimental analysis of municipal solid waste morphological composition for the municipal district. **RESULTS.** Completed experimental studies on the analysis of sewage sludge and an assessment on energy and environmental indicators. The substitution of partial replacement of fossil fuels by using municipal solid waste in thermal energy generation. Scheme of wastewater

treatment and application of used sorbents as fuel. In order to clarify the calorific value, experiments were made in a calorimetric bomb which showed that biocoke has a lower calorific value of 11.5 MJ/kg. The calorific value of biocoke was obtained according to the data of a thermal analyzer, which is 8–12 MJ/kg and depends both on the type of initial sewage sludge and on the mode of biocoke preparation. CONCLUSION The obtained results make possible to evaluate the effectiveness of biocoke usage obtained by conversion of sewage sludge for the disinfection of MSW landfills and the impact on restoring soil quality.

Keywords: *biocoke; landfill decontamination; sludge processing; wastewater; solid waste disposal.*

For citation: Makoev SO, Akhmetova IG. Biocoke from wastewater sludge is an effective substrate for disinfecting msw polygons and restore soil quality. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):153-164. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-153-164.

Введение

Исторически остроту проблемы с утилизацией илового осадка сточных вод и твердых коммунальных отходов (ТКО) ощутили те регионы, где ускоренный рост городов и промышленности проходил на географически ограниченных территориях – в центральной части Западной Европы (Германия, Австрия, Швейцария, Нидерланды). Именно в этих странах началась выработка концепций в управлении гигантскими потоками городских отходов. В России негативные последствия неуправляемого кризиса в области ТКО первыми ощутили крупные города и промышленные регионы: Москва и Московская область, Санкт-Петербург, Урал.

Результаты попыток управления этим кризисом пока неудовлетворительны. Так, за последние 5 лет объем генерируемых в столице бытовых отходов вырос на 12,5%. Из них только 10% перерабатывается в сырье для новой продукции и энергию, остальные 90% вывозятся на свалки и полигоны, расположенные в Московской области. Каждый день из столицы вывозится 9,5 тысячи тонн ТКО. Московская область, в которой проживает около 5% населения России, размещает у себя 20% всех отходов России. Эта гигантская экологическая нагрузка продолжает расти и наносит большой вред здоровью населения и многим областям сельского хозяйства, промышленности и туризма.

В данной работе поставлена задача по оптимальной переработке илового осадка сточных вод в биококс для применения на полигонах ТКО, в том числе оценка элементного анализа исходного сырья и продуктов термической конверсии ТКО.

Научная новизна заключается в получении энерго- и ресурсосберегающей технологии, включающие в себя: использования отходов для получения сорбентов для очистки СВ; утилизацию отработанных сорбентов в качестве топлива, применения золы, после сжигания отработанных сорбентов как добавку для органоминерального удобрения почв.

Литературный обзор

Аналогичные проблемы с оптимальной утилизацией наблюдаются и для илового осадка водоочистных сооружений (ОСВ). На каждый миллион жителей на станциях водоочистки ежегодно генерируется 150–200 тыс. тонн влажного ОСВ, или 30 тыс. тонн в сухом весе.

В настоящее время в мире одним из наиболее перспективных методов переработки отходов лесного, сельского, городского и ряда других видов хозяйств является пиролиз с целью дальнейшего использования в различных сферах полученных материалов. Категория углеродосодержащих материалов, получаемых при переработке органических отходов природного происхождения методом пиролиза, в зарубежной практике носит обобщающее название биококс. В числе отходов, перерабатываемых с целью получения биококса, можно назвать осадок сточных вод, опилки, стружки, древесную щепу, кору, солому, шелуху различных с/х культур, ветки и пр. Получаемый биококс (рис. 1) может использоваться в различных сферах: в качестве сорбента, в качестве почвенного субстрата для ремедиации загрязнённых почв и полигонов бытовых отходов, для улучшения характеристик бедных почв, в городском хозяйстве для нужд озеленения, при борьбе с опустыниванием и эрозией почв, при выращивании технических видов культур и пр.

В международной практике наиболее выгодным для переработки в биококс с точки зрения характеристик исходного сырья рассматривается осадок сточных вод вследствие изначально высокого в нём содержания фосфора (до 18%) и азота (до 20%). Переработка

ОСВ с целью получения биококса, кроме получения достаточно востребованного продукта, позволяет обеспечить полную утилизацию (переработку) ОСВ. При этом ОСВ содержит патогенную микрофлору, канцерогенные вещества, ксенобиотики, тяжёлые металлы, в связи с чем его утилизация представляет из себя отдельную проблему. Касательно технологий переработки ОСВ важно отметить, что на настоящий момент экономически рентабельных методов его переработки в полезный продукт не существует, в связи с чем происходит его затратная утилизация. По оценкам зарубежных специалистов, на сегодняшний день переработка ОСВ в биоккок является одним из наиболее перспективных способов его использования [1].



Рис. 1. Биоккок, полученный из осадка сточных вод

Fig. 1. Biocoke gained from sewage sludge

Применение биококка, получаемого из ОСВ, имеет ряд особенностей. Так, на характеристики конечного продукта оказывают существенное влияние ряд факторов, которые необходимо учитывать уже на этапе разработки технологических процессов:

- характеристики исходного сырья (химический состав самого ОСВ, в т. ч. процент содержания фосфора и азота, наличие песка и иных минеральных загрязнений и пр.);
- степень износа очистных сооружений, где планируется осуществить установку оборудования для переработки ОСВ в биоккок;
- особенности технологического процесса и оборудования, применяемые для получения биококка;
- планируемая сфера применения биококка.

Так в зависимости от области применения биококка подбирается температурный режим пиролиза. На рис. 2 показано изменение структуры материала в зависимости от температурных условий [2].

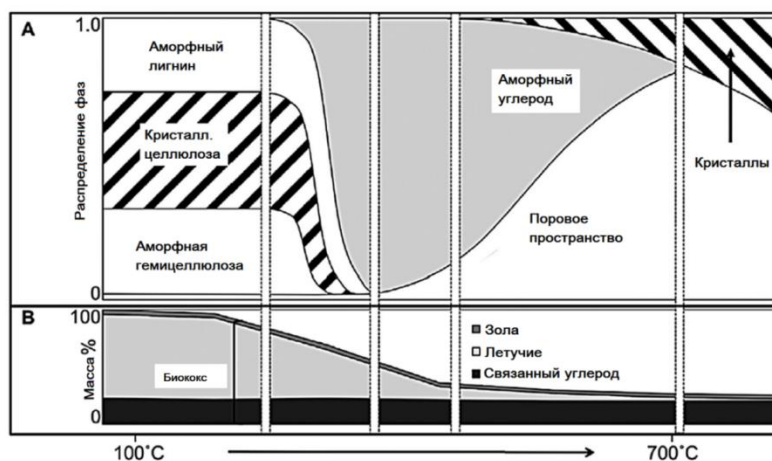


Рис. 2. Изменение структуры биококка в зависимости от температуры пиролиза

Fig. 2. Changes in biocoke structure depending on pyrolysis temperature

Среди перспективных направлений использования биококка, получаемого, можно выделить борьбу с опустыниванием и эрозией почвенного слоя [3 – 5]. Внесение биококка при опустынивании (значительном уменьшении продуктивности почвы вплоть до снижения урожайности до уровня сорняков) позволяет увеличить влагозадержание за счёт пористости субстрата, увеличение доли доступных фосфатов для питания корневой системы растений и

обеспечивает создание условий для образования гумуса. В случае эрозии – нарушении поверхностного почвенного слоя за счёт ветрового и водного воздействия, результатом которой является появление оврагов, разрушение профилей насыпей и склонов: при внесении биококса формируется эрозионно-устойчивый верхний почвенный слой, улучшается структура почвы, происходит ускоренное произрастание трав и кустарников, в результате чего поверхность почвы укрепляется их корнями.

На сегодняшний день существует достаточное количество методов по переработке и утилизации отходов. Данные методы делятся на две основные группы: нетермические и термические (рис. 3).

К нетермическим методам относят захоронение, компостирование и вторичную переработку отходов [6, 7]. Под термическими методами понимается высокотемпературное воздействие на ТКО, при этом всегда жидкая фаза – физическая вода испаряется, твердая фаза неорганической субстанции претерпевает структурные превращения: дегидратация, диссоциация, полиморфизация, плавление, испарение [8 - 11].

Материалы и методы

Объем накопленных ТКО в России составляет около 80-100 млрд. тонн (бытовые отходы, изношенные шины, шлаки металлургических производств, отходы обогатительных фабрик и др.). Несмотря на это, в настоящее время около 90 % мусора вывозится на свалки и полигоны. Утилизируется не более 10 % ТКО, из которых около 3 % сжигается и 7 % - поступает на промышленную переработку. Накопление мусора в современных городах составляет более 300 кг на 1 человека в год при ежегодном росте этого количества 4-6 %.

Для утилизации ОСВ также разработаны различные технологии, которые отличаются как капитальными затратами, так и экологическими показателями. В табл. 1 представлены основные способы утилизации ОСВ.

Табл. 1.

Современные способы утилизации ОСВ

Способ	Особенности	Недостатки
Вывоз на поля	Использование фосфора, стабильный спрос во многих странах	Правовые барьеры, нежелание фермеров, логистика, хранение в межсезонный период
Компостирование	Дешевый и простой способ	Хранение, низкая скорость переработки, нет рекуперации энергии
Анаэробное сбраживание	Получение энергии, производство компоста	Низкая энергоэффективность, токсичность компоста
Сжигание	Получение энергии, снижение объема отходов, широкое распространение	Высокие капитальные затраты, токсичность золы, требуется газоочистка
Сушка	Снижение объема отходов, на выходе сухой материал	Высокие капитальные затраты, низкая энергоэффективность, токсичность
Сушка-пиролиз-газификация	Высокая энергоэффективность, рециклинг фосфора, экологическая чистота удобрений	Высокие капитальные затраты, технологии только начинают развиваться

Что касается органической субстанции, то в зависимости от способа температурного воздействия она может окисляться (сжигание), распадаться (пиролиз), газифицироваться (газификация). Применение тех или иных способов переработки отходов связано, в первую очередь, с технологической освоенностью используемого метода и экономическими затратами на его реализацию. От применения конкретного способа также зависит эффективность переработки отходов.

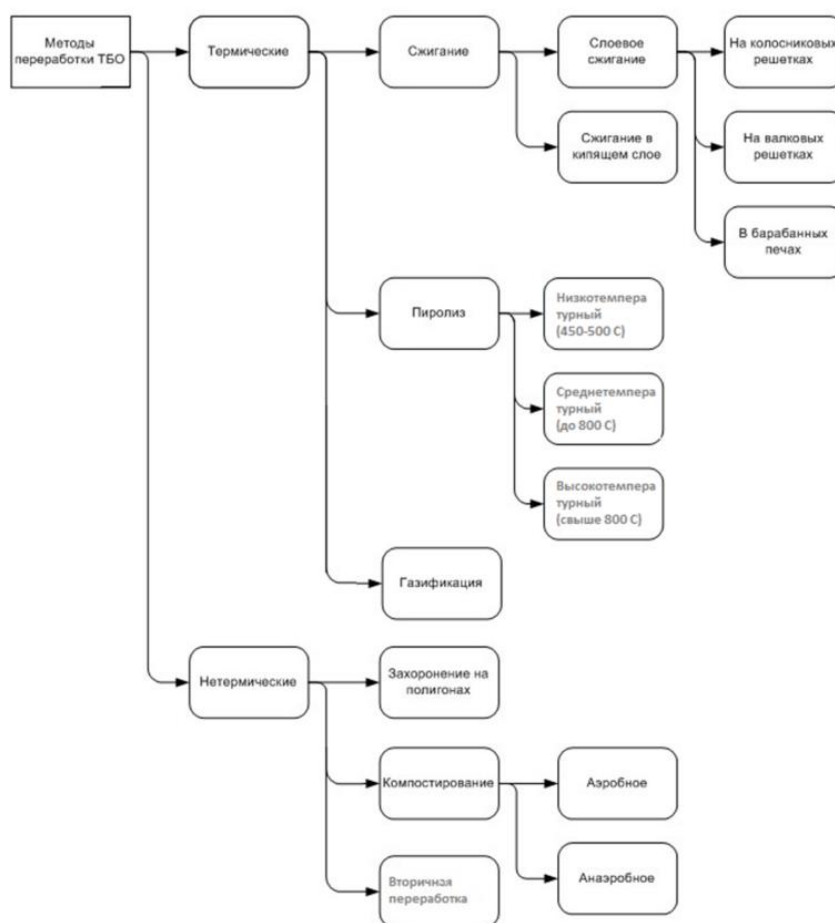


Рис. 3. Основные методы утилизации ТКО

Fig. 3. Basic methods of TKO disposal

Как следует из табл. 1, каждый способ имеет как свои положительные, так и отрицательные стороны. Однако только термическая переработка ОСВ (сушка-пиролиз-газификация) позволяет раскрыть потенциал биококса для комплексного решения обеих проблем управления самыми большими потоками городских отходов. В отличие от других технологий в данном случае предлагается переработка ОСВ в коммерчески востребованный продукт, а не его затратная утилизация. При этом в зависимости от планируемой сферы применения качественные характеристики биококса должны оптимизированы для решения конкретных задач [12].

Целевые задачи при переработке ОСВ в биококс для применения на полигонах ТКО заключаются в следующем:

- обеспечение содержание углерода не менее 25%;
- обеспечение размера пор от 5 до 50 мкм.

Преимущества использования биококса:

- удержание тепличных газов (метана, оксидов углерода и пр.) в теле полигона для дальнейшего их разложения почвенными бактериями;
- удержание токсичных жидкостей в теле полигона;
- снижение уровня неприятных запахов;
- предотвращение пожаров за счет удержания и связывания метана.

Биококс представляет собой углеродсодержащий компонент с теплотой сгорания на уровне торфа или древесины. Основные его характеристики: высокая концентрация чистого углерода С (не менее 15–30% от общей массы биококса) при низком содержании водорода Н ($H/C \leq 0,2$), практическое отсутствие органических токсичных веществ (например, полиароматических углеводородов), высокая пористость (около 40%), транспортная прочность (около 1,0 МПа).

Согласно проведенным экспериментальным исследованиям (рис. 4), теплота сгорания биококса по данным термоанализатора составляет 8 – 12 МДж/кг и зависит как от типа исходного ОСВ, так и от режима подготовки биококса. Важно отметить, что сырые

начинает воспламеняться при температуре 320-350 °С, что позволяет избежать плавления или уноса минеральных составляющих образца. Данная особенность существенно снижает затраты на очистку дымовых газов и утилизацию золы.

Для уточнения теплоты сгорания были проведены эксперименты в калориметрической бомбе, которые показали, что биококс имеет низшую теплоту сгорания равную 11,5 МДж/кг.

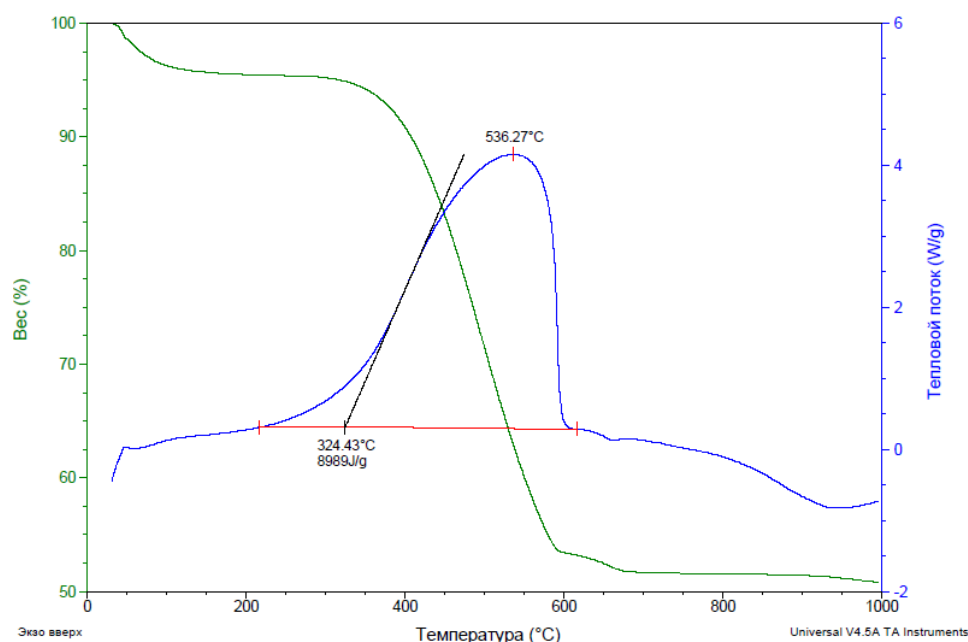


Рис. 4. Термогравиметрический анализ биококса в окислительной среде

Fig. 4. Thermogravimetric analysis of biocoke in oxidative medium

С другой стороны, более 90% всех топливно-энергетических ресурсов страны используется для непосредственного сжигания в энергетических, промышленных и транспортных установках. Сжигание топлива в этих установках неизбежно связано с образованием и выбросом вредных веществ и парниковых газов в окружающую среду. По этой причине могут быть рассмотрены альтернативные более экологичные способы термической конверсии биококса в энергетических целях, такие как газификация. Процесс газификации зависит от многих факторов, влияющих на состав получаемого газа и его теплоту сгорания (вид дутья, давление, температура, размер частиц, способ подвода тепловой энергии и выведения продуктов).

Целевая задача при переработке ОСВ в биококс для применения в качестве альтернативного органического топлива заключается в следующем:

- обеспечение максимальной теплоты сгорания сырья.

Преимущества использования биококса:

- отсутствие необходимости строительства илосжигающих заводов;
- отсутствие необходимости дорогостоящей очистки дымовых газов благодаря сравнительно невысокой температуре воспламенения, что позволяет избежать унос тяжелых металлов;
- возможность длительного хранения сырья.

В качестве подтверждения востребованности ремедиации почв можно представить следующие данные по одному из регионов России: около 5% территории Московской области, что составляет 2 200 км², имеет кризисную степень загрязнения (рис. 5).

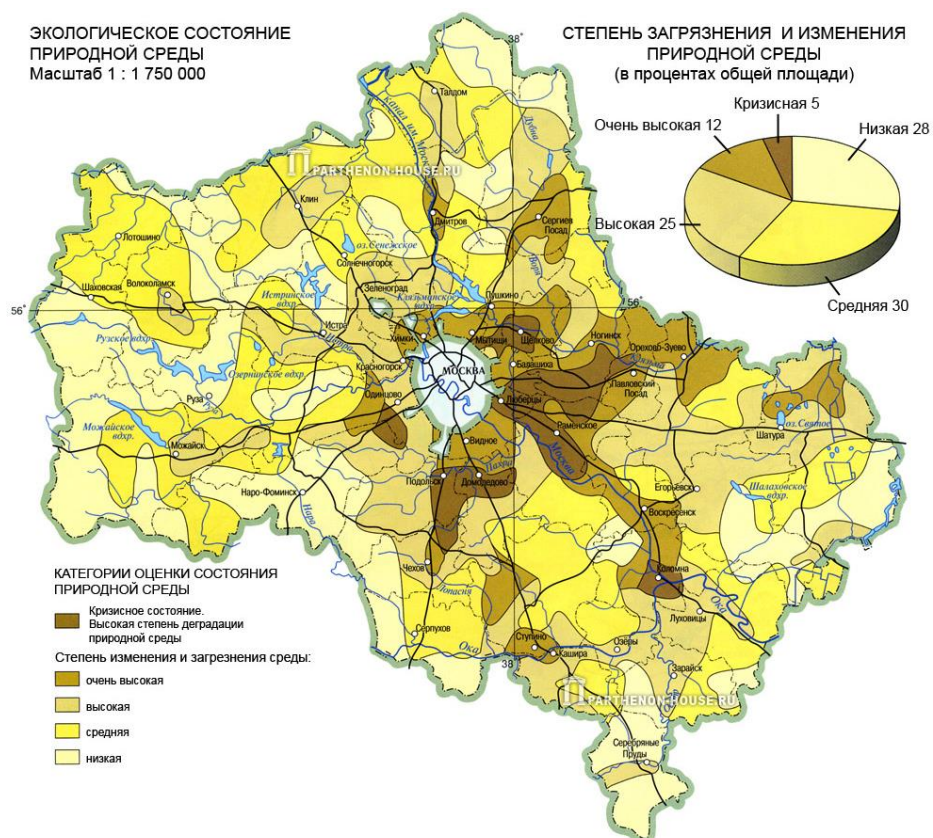


Рис. 5. Экологическое состояние природной среды Московской области

Fig. 5. Ecological state of the natural environment of the Moscow region

Необходимо учитывать, что на территорию Московской области вывозится для дальнейшего захоронения около 90% мусора, образующегося на территории г. Москвы, в связи с чем описанная ситуация может оказаться нетипичной для некоторых регионов России. Однако, на территории других регионов присутствуют свои источники заражения почв: промышленные предприятия, несанкционированные свалки, выработавшие свой срок свалочные полигоны и иные подобные объекты.

Целевые задачи при переработке ОСВ в биокос для применения в качестве почвенного сорбента заключаются в следующем:

- обеспечение доступности фосфора и азота для растений;
- обеспечение содержание углерода не менее 25%;
- обеспечение размера пор от 30 до 50 мкм.

Преимущества использования биокоса:

- возможность использования для нужд городского хозяйства (обсыпка обочин, парковые и ландшафтные работы, газоны, выращивание технических культур и пр.);
- восстановление и улучшение качества почв;
- минимальный уровень потерь фосфора при его вымывании естественными осадками;
- накопление и удержание почвенной влаги;
- ускоренное образование гумуса.

Среди перспективных направлений использования биокоса, получаемого из ОСВ, можно выделить борьбу с опустыниванием и эрозией почвенного слоя. Вопросы применения биокоса в качестве почвенного субстрата впервые стали рассматриваться в 1998 году для восстановления пустынных земель в Африке. Однако, главной проблемой применимости были высокие сроки окупаемости установки в сравнении с конкурентными технологиями производства удобрений.

Внесение биокоса при опустынивании (значительном уменьшении продуктивности почвы вплоть до снижения урожайности до уровня сорняков) позволяет увеличить влагозадержание за счёт пористости субстрата, увеличение доли доступных фосфатов для питания корневой системы растений и обеспечивает создание условий для образования гумуса. В случае эрозии - нарушении поверхностного почвенного слоя за счёт ветрового и водного воздействия, результатом которой является появление оврагов, разрушение профилей насыпей и склонов, - при внесении биокоса формируется

эрозионно-устойчивый верхний почвенный слой, улучшается структура почвы, происходит ускоренное произрастание трав и кустарников, в результате чего поверхность почв укрепляется их корнями.

Для улучшения качества почвы соответствующие субстраты следует вносить в верхний плодородный слой глубиной 0,3 м в количестве примерно 10–15% от его объема, т. е. при удельном весе биококка $0,8 \text{ г/см}^3$ на один квадратный метр требуется вносить 24–36 кг биококка. Следовательно, с помощью биококка, получаемого в течение года в городе-миллионнике, можно ежегодно улучшать 45–55 га городских территорий с неудовлетворительным состоянием почвенного покрова (плохая водо- и воздухопроницаемость и, соответственно, глубокое промерзание в зимний период и затопляемость в период дождей, недостаточное количество трав и декоративных культур и пр.), а в городе с населением 10 млн человек (Москва) – до 550 га/год.

В тоже время внесение биококка в почву позволяет снизить эмиссию углекислого газа в атмосферу. Как известно, растения в процессе фотосинтеза поглощают CO_2 для применения атома углерода в своей полимерной структуре. Обратный процесс разложения органического вещества неминуемо сопровождается выделением CO_2 в атмосферу. Различные исследования показывают, что переработка растительных отходов в биококк позволяет существенно снизить скорость эмиссии CO_2 благодаря более стабильной структуре материала (рис. 6).

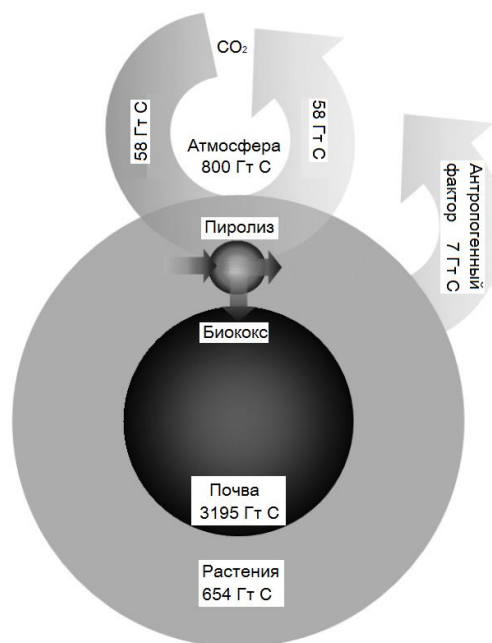


Рис. 6. Годовой цикл углерода на планете [13]

Fig. 6. The annual carbon cycle on the planet [13]

Результаты и обсуждения

В мировой научной литературе встречается немало количество статей, посвященных как вопросам получения биококка, так и его эффективного использования. В Китае [14] проводятся работы по оценке эффекта от внесения биококка, полученного из различных органических материалов, в верхние слои почвы в качестве удобрения. При этом проводится сравнительный анализ биококка с минеральными удобрениями, а также с различными смесями на их основе.

На рис. 7 показаны снимки структуры биококка из бамбука за время проведения экспериментальных исследований. Согласно статистическим данным, период эффективного использования биококка в почве составляет 1,5 – 2,0 года. По истечении данного времени требуется дополнительное внесение компонента в грунт.

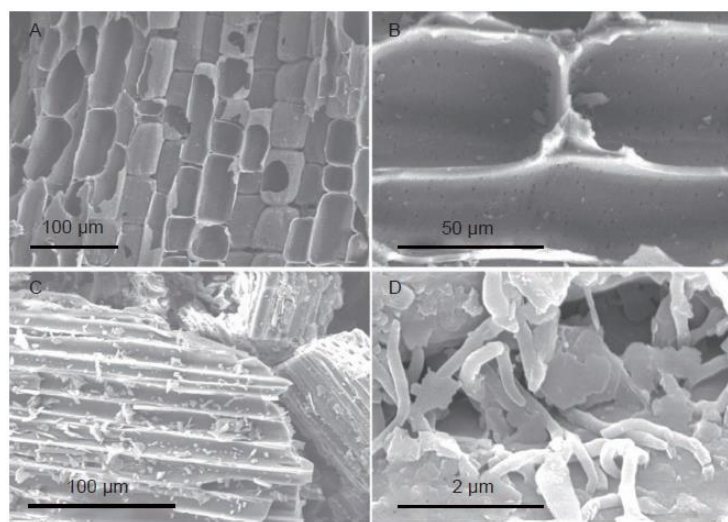


Рис. 7. Изменение структуры биококка до (А, В) и после проведения эксперимента (С, D) по внесению в почву сроком на 1,5 года

Fig. 7. Restructuring of biocoke before (A, B) and after the 1.5 year (C, D) soil application

Среди выявленных положительных эффектов применения биококка исследователи отметили:

- увеличение содержания фосфора и калия в почве;
- ускорение катионного обмена;
- увеличение показателя pH;
- рост количества и повышение активности микроорганизмов;
- повышение урожайности почвы.

В Пакистане проводились исследования влияния биококка, полученного из навоза и птичьего помета на рост кукурузы и пшеницы [15]. В данном регионе наблюдается низкое содержание органических веществ в почве, что создает значительную угрозу плодородию почв, урожайности и экономической целесообразности сельского хозяйства в засушливых и полузасушливых экосистемах. По этой причине биоккок становится привлекательным вариантом для использования в качестве удобрения. Авторы работы провели двухлетние полевые эксперименты по выращиванию кукурузы и пшеницы в 2015 и 2016 годах, чтобы проверить влияние биококка на урожайность, свойства почв и эффективность фосфорного обмена в сравнении с традиционными минеральными удобрениями.

Интересно, что помимо ценового преимущества в виде низкой себестоимости, вариант с внесением биококка показал наилучшие показатели с точки зрения урожайности (рис. 8).

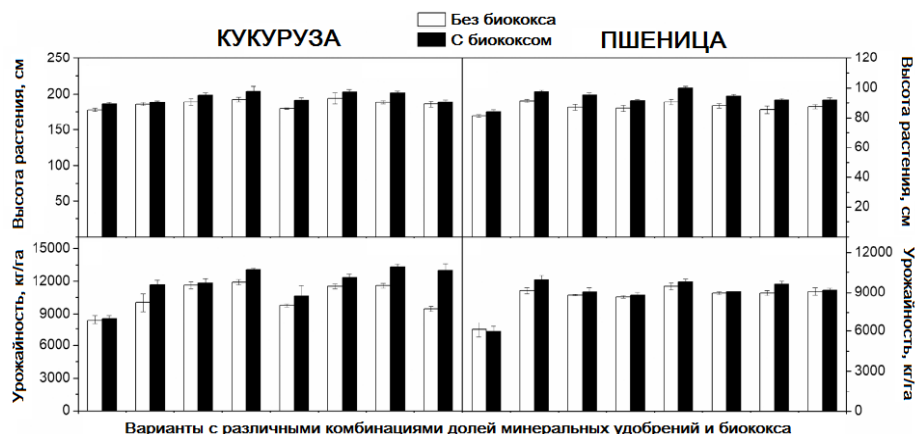


Рис. 8. Влияние биококка на урожайность кукурузы и пшеницы

Fig. 8. Influence of biocoke on maize and wheat yield

Специалисты из США и Катара пытаются решить комбинированную задачу переработки ТКО в биоккок с последующим его применением для ремедиации почв [16]. Для обеспечения экологической и экономической стабильности крупных городов необходимо

разработать новые способы эффективной утилизации ТКО. Биококс является перспективным направлением с точки зрения обращения с ТКО, обеспечения цикличности углерода в природе и ремедиации пораженных почв. Специалистами рассмотрены вопросы получения биококса из газет, картонов, древесной щепы и растительных отходов по отдельности или в смесях с равными массовыми долями. Эксперименты проводились при трех температурах пиролиза (350, 500, и 750 °С) и при разном времени пребывания в реакторе (2, 4 и 6 часов). При этом наблюдаются изменения ключевых свойств биококса, таких как pH, электропроводность, плотность, удержание воды, доля микроэлементов в зависимости от сырья и условий производства. Кроме того, увеличение температуры пиролиза и времени нахождения в реакторе резко уменьшает массовую долю биококса, полученного из смеси ТКО (рис. 9).

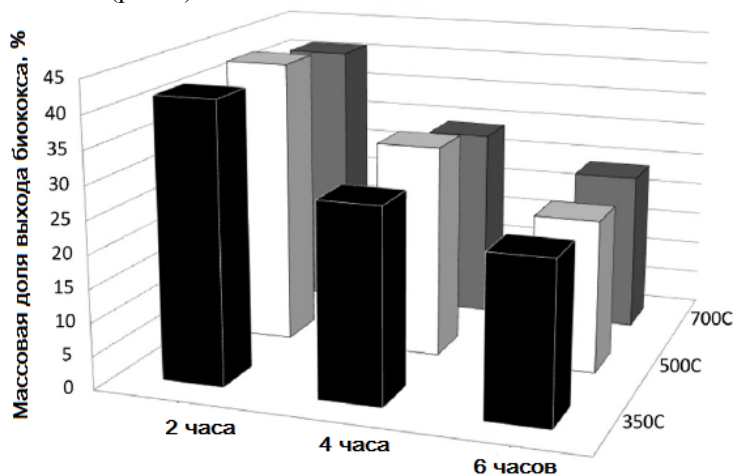


Рис. 9. Зависимость выхода биококса из ТКО от температуры и времени реакции

Fig. 9. Dependence of biocoke output from TKO on temperature and reaction time

Установлено, что повышение температуры пиролиза приводит к росту пористости поверхности биококса, величины pH и электрической проводимости. Что касается ремедиации почвы, то авторы исследования подчеркивают снижение содержания кальция, калия и магния в грунте при увеличении количества азота и фосфора.

Представленный обзор доказывает высокую актуальность применения биококса благодаря широкому спектру проблем, решаемых с помощью данного продукта.

Современные очистные сооружения ежегодно генерируют около 30–35 кг ОСВ в сухом остатке (равнозначно порядка 150–180 кг ОСВ с влажностью 80%) на каждого городского жителя. Массово применяемые в настоящее время в мире технологии (сушка и складирование, сжигание, захоронение на полигонах и пр.) позволяют обеспечить исключительно утилизацию ОСВ, а не его переработку или иное экономически эффективное использование. Предлагаемые способ и технология обеспечивают не просто утилизацию ОСВ, но и его переработку с получением коммерчески востребованного продукта.

Представленная задача по внедрению экологически и экономически эффективного способа утилизации ОСВ предопределяет комплексный подход, для успешного осуществления которого необходимо проведение исследований сразу по трём основным направлениям:

- влияние характеристик исходного сырья на конечные характеристики биококса;
- влияние режимов пиролиза на конечные характеристики биококса;
- моделирование в лабораторных условиях природных процессов, которые бы позволили оценить влияние биококса на процессы ремедиации загрязнённых земель и свалочных полигонов с целью поиска оптимальных характеристик биококса, который бы стал наиболее эффективным для решения данной задачи.

Литература

1. Бутусов М.М., Комаров А.Ю., Писаренко С.С., Кудерна М., Поллак М. Безотходная переработка илового осадка канализационных очистных сооружений – производство биококса // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 8. С. 47–51.

2. Novotny E.H., Maia C.M., Carvalho M.T., Madari B.E. Biochar: Pyrogenic carbon for agricultural use – a critical review // R. Bras. Ci. Solo, 39:321-344, 2015.
3. Jing Q., Fernandes de Souza M., Robles-Aguilar A., Ghysels S., Sik Ok Y., Ronsse F., Meers E. Improving biochar properties by co-pyrolysis of pig manure with bio-invasive weed for use as the soil amendment, Chemosphere, Volume 312, Part 1, 2023, 137229.
4. Zhang R.-H., Xie Y., Zhou G., Li Z., Ye A., Huang X., Xie Y., Shi L., Cao X., Zhang J., Lin C. The effects of short-term, long-term, and reapplication of biochar on the remediation of heavy metal-contaminated soil, Ecotoxicology and Environmental Safety, Volume 248, 2022, 114316.
5. Тимербаев Н.Ф., Тунцев Д.В., Хайруллина М.Р., Китаев С.В. Технология и оборудования для электроэнергетического использования древесных отходов. известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017;19(1-2):102-107.
6. Politaeva N., Smyatskaya Y., Fedyukhin A. Fiber and carbon materials for wastewater purification from petroleum products. Desalination and Water Treatment, 174 (2020) P. 116-122.
7. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р., Добронравов А.Д., Шамсутдинов Э.В. Комплексное использование золошлаковых отходов. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015;(7-8):26-36.
8. Савина М.В., Тимофеева С.С. Разработка схемы использования генераторного газа из низкосортного угля в ПГУ // Вестник КГЭУ, 2021, том 13, № 2 (50).
9. Анализ возможности использования биоугля в металлургическом производстве / А. В. Карпов, А. О. Диментьев, Д. С. Шмарин, Т. В. Цымбал // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 1(47). – С. 69-76.
10. Таймаров М.А., Чикляев Е.Г. Разработка прямоточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020;22(6):68-78.
11. Рижия, Е. Я. Влияние биоугля на содержание минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве с разной степенью окультуренности / Е. Я. Рижия, Н. П. Бучкина, Е. В. Балашов // Агрохимия. – 2020. – № 8. – С. 22-29.
12. Крылова, А. Ю. Получение биоугля пиролизом биомассы / А. Ю. Крылова, Е. Г. Горлов, А. В. Шумовский // Химия твердого топлива. – 2019. – № 6. – С. 55 – 64.
13. Lehmann, J., Gaunt, J. and Rondon, M. (2006) Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. V. 11, PP. 403–427.
14. He Li-li, Zhong Zhe-ke, Yang Hui-min Effects on soil quality of biochar and straw amendment in conjunction with chemical fertilizers // Journal of Integrative Agriculture 2017, 16(3): 704–712.
15. Muhammad Arif, Muhammad Ilyas, Muhammad Riaz, Kawsar Ali, Kamran Shah, Izhar Ul Haq, Shah Fahad Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil // Field Crops Research 214 (2017) 25 – 37.
16. P. Randolph, R.R. Bansode, O.A. Hassan, Dj. Rehrah, R. Ravella, M.R. Reddy, D.W. Watts, J.M. Novak, M. Ahmedna Effect of biochars produced from solid organic municipal waste on soil quality parameters // Journal of Environmental Management 192 (2017) 271 – 280.

Авторы публикации

Султан Олегович Макоев – директор дирекции международного образования Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Россия.

Ирина Гареевна Ахметова – др. техн. наук, доцент, проректор по развитию и инновациям Казанского государственного энергетического университета, Казань, Россия.

References

1. Butusov MM, Komarov AYU, Pisarenko SS, et al. Waste-free processing of sludge from sewage treatment plants - production of biocox. *Water supply and sanitary equipment*. 2017;8:47-51.
2. Novotny EH, Maia CM, Carvalho MT, et al. *Pyrogenic carbon for agricultural use – a critical review*. R. Bras. Ci. Solo, 39:321-344, 2015.
3. Jing Q, Fernandes de Souza M, Robles-Aguilar A. Improving biochar properties by co-pyrolysis of pig manure with bio-invasive weed for use as the soil amendment, Chemosphere. V. 312, Part 1, 2023, 137229.

4. Zhang R.-H, Xie Y, Zhou G, et al. The effects of short-term, long-term, and reapplication of biochar on the remediation of heavy metal-contaminated soil, *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 202;248:114316.
5. Timerbaev NF, Tuntsev DV, Khairullina MR, et al. Technologies and equipment for the production of electricity from wood waste. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(1-2):102-107.
6. Politaeva N, Smyatskaya Y, Fedyukhin A. Fiber and carbon materials for wastewater purification from petroleum products. *Desalination and Water Treatment*, 174 (2020) P. 116-122.
7. Afanaseva OV, Mingaleeva GR, Dobronravov AD, et al. Complex use of ash and slag waste. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(7-8):26-36.
8. Savina MV, Timofeeva SS. Development of a scheme for using generator gas from low-grade coal in PSU. *Vestnik KGEU*, 2021;13(2 (50)).
9. Karpov AV, Dimentiev AO, Shmarin DS. Analysis of the possibility of using bio-coal in metallurgical production. Tsybal. *Bulletin of the Lipetsk State Technical University*. 2022;1(47):69-76.
10. Taimarov MA, Chiklyaev EG. Development of a direct flow pyrolysis plant for pyrogenetic decomposition of wood. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):68-78.
11. Rizhiya EYa, Buchkina NP, Balashov EV. The influence of bio-coal on the content of mineral forms of nitrogen in sod-podzolic sandy loam soil with different degrees of cultivation. *Agrochemistry*. 2020;8:22-29.
12. Krylova AYU, Gorlov EG, Shumovsky AV. Obtaining bio-coal by pyrolysis of biomass. *Chemistry of solid fuels*. 2019;6:55-64.
13. Lehmann J, Gaunt J. and Rondon, M. (2006) Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2006;11:403–427.
14. He Li-li, Zhong Zhe-ke, Yang Hui-min Effects on soil quality of biochar and straw amendment in conjunction with chemical fertilizers. *Journal of Integrative Agriculture* 2017;16(3):704–712.
15. Muhammad Arif, Muhammad Ilyas, Muhammad Riaz, Kawsar Ali, Kamran Shah, Izhar Ul Haq, Shah Fahad Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil. *Field Crops Research* .214 (2017) 25 – 37.
16. P. Randolph, R.R. Bansode, O.A. Hassan, et al. Effect of biochars produced from solid organic municipal waste on soil quality parameters. *Journal of Environmental Management*. 192(2017) 271-280.

Authors of the publication

Sultan O. Makoev – Director of International Education Department, National Research University «MPEI».

Irina G. Akmetova – Vice-Rector for Development and Innovation, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 28.11.2022г.

Отредактировано 05.12.2022г.

Принято 05.12.2022г.

Номенклатура-переходник журнала «ИЗВУЗ. Проблемы энергетики»

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты	2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы	
05.09.12 – Силовая электроника	
05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений)	
05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий	2.2.8 Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)	
05.14.01 – Энергетические системы и комплексы	2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)
05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы	2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)
05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование эксплуатации и вывод из эксплуатации	
05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика	2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)
05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты	2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки) 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы 2.4.10. Техносферная безопасность (в энергетике)

Сдано в набор 15.12.2022г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати 27.12.2022г
Усл. печ. л. 19,07
Заказ № 5270
Дата выхода в свет 30.12.2022г.

Формат 60х90/8
Уч.изд. л. 14,49
Цена свободная