

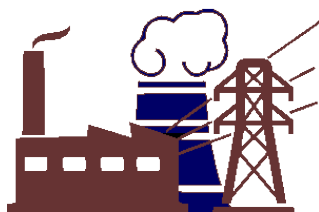
Энергетические Системы

Energy Systems

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

1
2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
(БГТУ им. В.Г. Шухова)



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Научный журнал

2023 год, № 1



ENERGY SYSTEM

Scientific journal

2023, Vol. 1

ISSN 2782-3989

Сайт журнала: <http://j-es.ru/>

Тел.: +7 (910) 632-38-28

E-mail: Energobgtu@mail.ru

Год основания журнала – 2016.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права и плагиата и принципах, изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (двойное слепое). Рецензирование статей осуществляется членами редакционной коллегии, ведущими учеными БГТУ им. В.Г. Шухова, а также приглашенными рецензентами.

Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции. Авторы статей сохраняют исключительные права на размещенные в сборнике материалы и вправе использовать свои произведения независимо от журнала.

Язык публикаций – русский, английский.

Рубрики ГРНТИ журнала:

- 440000. Энергетика;
- 450000. Электротехника;
- 670000. Строительство. Архитектура.

Рубрика OECD:

- 207. Environmental engineering.

Специальности ВАК:

- 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение
- 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов
- 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
- 2.4.3. Электроэнергетика
- 2.4.4. Электротехнология и электрофизика
- 2.4.5. Энергетические системы и комплексы
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника
- 2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники
- 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность
- 2.4.10. Техносферная безопасность (в энергетике)

В номере опубликованы материалы VIII Международной научно-практической конференции «Энергетические системы – 2023А» (ICES-2023А), прошедшей 30 июня 2023 г. в БГТУ им. В.Г. Шухова.

© БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023



Website: <http://j-es.ru/>

Telephone: +7 (910) 632-38-28

E-mail: Energobgtu@mail.ru

The journal was founded in 2016.

The editorial policy of the journal is based on the general provisions of the existing Russian legislation concerning copyright and plagiarism and the principles in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

All arriving materials undergo scientific reviewing (double blind). Reviewing of articles is carried out by the members of editorial board, the leading scientists of BSTU named after V.G. Shukhov and by invited reviewers.

All published materials are presented in the author's edition. The authors of the articles retain exclusive rights to the materials placed in the collection and have the right to use their works regardless of the journal.

The language of publications is Russian, English.

© Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov, 2023

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Трубаев Павел Алексеевич, председатель (главный редактор)

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

Белоусов Александр Владимирович

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

Бирюков Алексей Борисович

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

Гашо Евгений Геннадиевич

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

Мозговой Николай Васильевич

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

Радченко Вадим Витальевич

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

Удовиченко Злата Викторовна

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

Abdouloihabi Mohamed Valid Abdouloihabi

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

Marina Kozhukhova

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

Корнилова Наталья Вячеславовна, научный секретарь

Ст. преп. кафедры электроэнергетики и автоматики БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

Леонов Евгений Сергеевич, технический секретарь

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



EDITORIAL BOARD

Pavel Trubaev, Chief editor

Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor of the Department of Energy engineering of heat technology BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)

Alexandr Belousov

Cand. of Tech. Sciences (PhD), head of the Faculty of Energy, information technology and control systems BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)

Alexey Birukov

Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor, Head of the Department of Industrial Thermal Physics Donetsk National Technical University (Donetsk)

Evgeniy Gasho

Dr. of Tech. Sciences (DSc), Professor of the Department of Industrial heat and energy systems Moscow Power Engineering Institute, Expert of Analytical Center Under the Government of the Russian Federation (Moscow)

Nikolay Mozgovoy

Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor, Head of the Department of Industrial ecology and Safety Voronezh State Technical University (Voronezh)

Vadim Radchenko

Cand. of Econom. Sciences (PhD), Vice-chairman of the Belgorod City Council, CEO of the Center of Energy Technologies Ltd (Belgorod)

Zlata Udovichenko

Cand. of tech. Sciences (PhDS), Associate Professor (Reader) of the Department of Heat and gas supply and ventilation Donbass Academy of Architecture and Construction (Makeyevka)

Marina Kozhukhova

PhD, Adjunct Professor University of Wisconsin-Milwaukee (Milwaukee)

Abdouloihabi Mohamed Valid Abdouloihabi

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

Natalia Kornilova, Scientific secretary

Senior Lecturer of the Department of Power engineering and automatics BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)

Evgeny Leonov, Technical secretary

Engineer of the Department of Energy engineering of heat technology BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)



СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Секретарев Ю. А., Мятёж Т. В., Безменов С. В.

Оптимизация режимов работы ГЭС на основе теории предельной полезности и оценки стоимости гидроресурса8

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

Бирюков А.Б., Гнитиёв П.А.

Исследование особенностей использования нормализованной тепловой нагрузки для определения уровня энергоэффективности котельного агрегата в конкретных условиях33

Дерябин Г.А., Панкрашин С.М., Блинов В.Л.

Оценка технического состояния газотурбинной установки при помощи методов машинного обучения по искусственным данным.....42

Егоров М.Ю., Блинников А.А.

Нейтронно-физический расчет реактора ВВЭР-1000 на МОКС-топливе55

Кобылкин М.В., Риккер Ю.О., Акимов И.С.

Проверка гипотезы возможности измерения давления жидкости через стенку трубопровода. Результаты исследования.....63

Поляков М.В., Попов С.К.

Термохимическая рекуперация теплоты в газотурбинной установке72

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Мятёж Т.В., Любченко В.Я., Могиленко Е.А.

Влияние инверторного режима зарядных станций электромобилей на качество электроснабжения потребителя в энергосистеме83

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Гаврилова А.А., Сагитова Л.А., Чичев И.С.

Многокритериальная оценка эффективности мероприятий по ресурсосбережению в инженерных системах типовых зданий99

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ

Андреев Г. А., Пушанкина П. Д., Джимаков С. С., Петриев И. С.

Моно- и биметаллические наночастицы на основе палладия как эффективный инструмент интенсификации транскристаллического переноса водорода.....107

Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Светушков И.И.

Выбор оптимальных параметров пространственно-временной сетки при математическом моделировании нагрева заготовок в промышленных печах.....113



CONTENT

POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

- Yury Sekretarev, Tatyana Myateg, Stepan Bezmenov**
Optimization of HPP operation modes based on the theory of marginal utility and hydro resource cost estimation8

HEAT AND POWER ENGINEERING

- Biryukov A.B., Gnitiev P.A.**
Study of the peculiarities of using the normalized thermal load to determine the level of energy efficiency of the boiler unit under specific conditions.....33
- Gleb Deryabin, Svyatoslav Pankrashin, Vitalii Blinov**
Evaluation of the technical condition of a gas turbine plant using machine learning methods from artificial data assessing the technical condition of a gas turbine using machine learning methods with artificial data42
- Mikle Egorov, Alexander Blinnikov**
Neutron-physical calculation of the VVER-1000 on MOX-fueled reactor55
- Mikhail Kobylkin, Yulia Rikker, Ilya Akimov**
Verification of the hypothesis of the possibility of measuring liquid pressure through a pipeline wall. results of the study.....63
- Mikhail Polyakov, Stanislav Popov**
Thermochemical heat recovery in a gas turbine plant72

ELECTRIC POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING

- Tatiana Myatezh, Valentina Lyubchenko, Egor Mogilenko**
The influence of the inverter mode of electric vehicle charging stations on the quality of consumer power supply in the power system83

ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY

- Anna Gavrilova, Lyajsan Sagitova, Ilya Chichev**
Multi-criteria evaluation of the efficiency of resource-saving measures in the engineering systems of standard buildings99

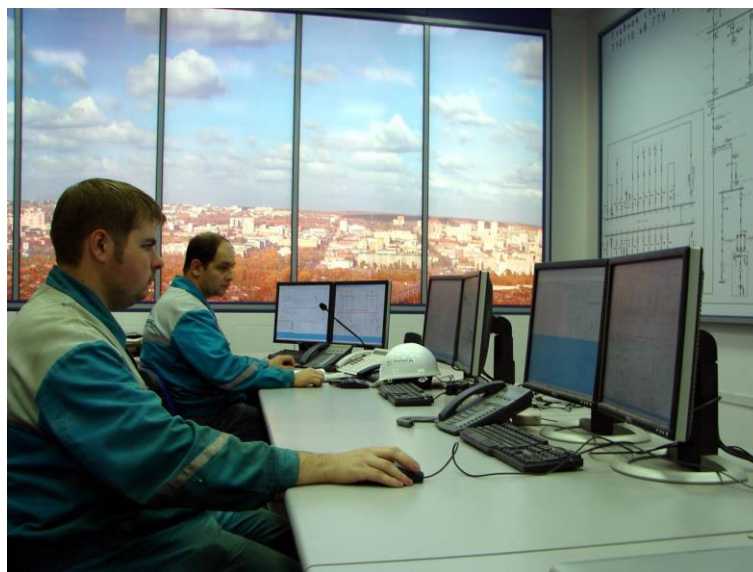
ALTERNATIVE AND RENEWABLE ENERGY SOURCES

- Georgy Andreev, Polina Pushankina, Stepan Djimak, Iliya Petriev**
Mono- and bimetallic pd-pt nanoparticles as an efficient tool for the intensification of transcrystalline hydrogen transport107
- Vyacheslav Bukhmirov, Daria Rakutina, Ilya Svetushkov**
Selection of optimal parameters of the space-time grid in mathematical modeling of heating of workpieces in industrial furnaces.....113



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

POWER SYSTEMS AND COMPLEXES



ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЭС НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОЛЕЗНОСТИ И ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ ГИДРОРЕСУРСА

Секретарев Ю. А., Мятаж Т. В., Безменов С. В.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Аннотация: Целью данной статьи является решение задачи оптимизации работы ГЭС на основе теории предельной полезности и оценки стоимости гидроресурса с учетом характерных режимов работы ГЭС. В данной работе разработан универсальный метод, сочетающий в себе оптимизационный метод и метод оценки предельной полезности. Предлагаемый подход основан на адекватном представлении характеристики относительных приростов расхода топлива и воды, а также определении стоимости гидроресурса для управления режимами работы ГЭС. На примере Новосибирской ГЭС и ТЭЦ предполагается получить оценку экономического эффекта от реализации предложенных критериев и разработанной методики определения стоимости гидроресурса для ГЭС. По результатам реализации разработанного подхода на Новосибирских ТЭЦ цена реализации электроэнергии на рынке электроэнергии будет сопоставима с ценой реализации электроэнергии, вырабатываемой на ТЭЦ, и составит ориентировочно 370 коп/кВт·ч.

Ключевые слова: оптимизация функционирования гидроэлектростанций, предельная полезность, цена воды для гидроэлектростанций, ступенчатая характеристика, гибкий энергетический рынок.

OPTIMIZATION OF HPP OPERATION MODES BASED ON THE THEORY OF MARGINAL UTILITY AND HYDRO RESOURCE COST ESTIMATION

Yury Sekretarev, Tatyana Myateg, Stepan Bezmenov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Abstract: The purpose of this article is to solve the problem of optimizing the operation of a hydroelectric power station based on the theory of marginal utility and assessing the cost of a hydro resource, taking into account the characteristic modes of operation of a hydroelectric power station. In this work, a universal method, which combines an optimization method and a method for assessing marginal utility. The method developed by the authors involves use the adequate representation of the incremental rate characteristic and the determination of the cost of the hydro resource for the control of the operating modes of the HPP. Using the example of the Novosibirsk HPPs and TPPs, an assessment of the energy efficiency, proposing the concept of a developed methodology for determining the price of water for HPPs, will be obtained. Based on the results of the implementation of the developed approach at Novosibirsk HPPs, the electricity sales price competitive electricity market can be matched with the electricity sales price generated at TPP, which will be approximately 370 ¢/kWh.

Keywords: optimization of hydropower plants functioning; marginal utility; water price for hydropower plants; incremental rate characteristic; flexible energy market.

Введение

В настоящее время воздействие технологий на окружающую среду стало сопоставимым по своим масштабам с происходящими на планете природными процессами. Поэтому использование возобновляемых источников, в том числе водных ресурсов,



является особенно актуальным для энергетического рынка, устроенного по принципу «Интернет вещей» [1], а определение стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей функционирования ГЭС для всего водно-хозяйственного комплекса позволит повысить эколого-экономическую эффективность функционирования народного хозяйства страны в современных условиях, приблизив эксергию технологического процесса и конечного продукта функционирования энергосистемы к нулю.

Гидроэлектростанции представляют собой сложные, искусственно созданные системы открытого типа, обладающие специфическими свойствами: вероятностным и неопределенным характером изменяющихся во времени параметров, тесными связями с социальными, экономическими и природными факторами [2]. Управление режимами заданного объекта – непростая задача, которая значительно усложняется при работе станций в каскаде [3-5]. Взаимосвязи гидрологического, энергетического и электрического режимов ГЭС каскада изучены недостаточно, что приводит к неправильной оценке ситуаций при управлении режимом энергосистемы. Причиной этого стала невозможность создания сложных моделей и систем управления из-за дефицита вычислительных мощностей на этапе формирования единой энергосистемы и на начальных этапах развития автоматизированных систем управления ГЭС в 70-е гг. 80-е годы XX века [6-8]. Однако на сегодняшний день проблема скорости обработки данных и принятия решений решается скоростью современных вычислительных технологий и не является приоритетной. В связи с этим стоит пересмотреть устоявшийся подход к планированию и оптимизации режимов энергосистемы [4, 9-12].

Целью проводимого исследования является оптимизация режимов работы ГЭС на основе определения стоимости гидроресурса с учетом ее режимных особенностей для определения стоимости водных ресурсов всего водно-хозяйственного комплекса по критерию эколого-экономической эффективности для улучшения экологической обстановки в регионах и мире в целом. Проводимое исследование является актуальным, поскольку наметившийся в последнее время рост вредного воздействия на окружающую среду требует введения мер, повышающих бережное отношение к ней. Расчеты проводились для объединенной энергосистемы Сибири (ОЭС Сибири), где доля ГЭС в установленной мощности энергосистемы составляет порядка 53, 5% (вся установленная мощность ОЭС Сибири равна 52 139, 9 МВт. Поэтому разработка подобных предложенной авторами методик является довольно актуальной.

Обзор отечественного и международного опыта оптимизации смешанных энергосистем

Более того, как показывает проведенный авторами патентно-ориентированный поиск, до сих пор не было разработано универсальной методики по оценке и определению стоимости использования водных ресурсов для ГЭС и всего водно-хозяйственного комплекса. Поэтому учитывая необходимость их баланса и восполнения в природе, авторы считают актуальным создание методики по определению стоимости гидроресурса для ГЭС с учетом ее режимных особенностей как основы для оптимизации режимов работы всего водно-хозяйственного комплекса в дальнейших проводимых исследованиях.

Разработанная авторами методика относится к электроэнергетике и может быть использована для наивыгоднейшего распределения нагрузки в энергосистеме на основании определения стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей работы ГЭС по эколого-экономическому критерию эффективности для оптимизации режимов работы энергообъединений в целях экономии топлива и улучшения экологической обстановки в стране в целом.

Как показывают результаты анализа проводимых исследований в международной практике, то в части оценки эффективности использования воды можно отметить



лишь введение налога на нее. В российской практике предпринимались попытки создания подобных методик, хотя они так и не увенчались успехом. Что касается оптимизации режимов работы водно-хозяйственного комплекса, то здесь можно отметить использование методики сведения водного баланса с определением расхода воды по конкретным потребителям, таким как, рыбное хозяйство, водный транспорт, промышленность, сельское хозяйство, а также бытовое население. Поскольку в основе всего ВХК лежит электроэнергетика, которая является инфраструктурной отраслью, то необходимо проанализировать методики, используемые для оптимизации ее режимов работы.

Аналогом к предлагаемой методике является известный в настоящее время способ оптимального распределения нагрузки энергосистемы между гидроэлектростанциями (ГЭС) и тепловыми электрическими станциями (ТЭС) на основе равенства дифференциальных характеристик расхода топлива на тепловых электростанциях и расхода воды на гидравлических [6]. Такие характеристики еще в СССР получили названия характеристик относительных приростов (ХОП).

В общем виде решение критериального уравнения при оптимальном распределении нагрузки в ЭЭС без учета технических ограничений, накладываемых на него, выглядит следующим образом [4, 5]:

$$\frac{b_3}{1 - \sigma_3} = \lambda_2 * \frac{q_1}{1 - \sigma_1} = \dots = \lambda_2 * \frac{q_m}{1 - \sigma_m} = idem \quad (1)$$

здесь b_3 – относительные приросты расходов топлива на эквивалентной тепловой станции (ТЭС); $q_1, \dots, q_m$ – относительный прирост расхода воды на гидростанциях (ГЭС); λ_2 – переводной коэффициент, суть которого будет раскрыта ниже; $\frac{\partial \Delta P}{\partial N_3} = \sigma_3$ носит название относительного прироста потерь активной мощности от протекания в сети мощности i -ой станции; $\sigma_1, \dots, \sigma_m$ – относительный прирост потерь активной мощности от протекания в сети мощности i -ой гидроэлектростанции.

При этом учитывается, что ГЭС является одиночной (т. е. работает не в каскаде ГЭС) и ведет годовое (сезонное) регулирование. При этом напор в течении суток за редким исключением остается величиной неизменной, т. е. $H \approx \text{const}$ [6]. Допущение о постоянстве напора ГЭС существенно упрощает алгоритм решения задачи. При этом 1 м³ водных ресурсов для всего периода оптимизации будет обладать практически одинаковой энергией. Что является недостатком предложенного в [6] метода равенства относительных приростов расхода топлива.

Необходимо сказать, что учет потерь в сети усложняет оптимизационный расчеты. В работе для простоты и наглядности иллюстрации предлагаемого подхода к оценке стоимости гидроресурса с допущением используется условие оптимизации (2).

Следует заметить, что ТЭС в оптимизационных задачах представляются как генерирующие источники с «неограниченным энергоресурсом». Это подразумевает, что в отдельно взятый момент времени любая мощность станции, естественно, в пределах допустимого диапазона ее работы будет обеспечена запасом энергетического ресурса вне зависимости от того, какую мощность станция несла в предшествующий момент времени. Это дает основание объединять все тепловые станции в одну эквивалентную с обязательным учетом всех технических ограничений. Гидравлические станции относятся к генерирующим источникам с «ограниченными энергоресурсами», так как его количество определяется гидрографом реки и конечной полезной ёмкостью водохранилища. Это говорит о том, что мощность ГЭС в данный момент времени зависит от того, с какой мощностью станция работала в предыдущий временной интервал. Поэтому



гидравлические станции эквивалентировать невозможно, так как каждая из них уникальна с учетом вышеперечисленных условий.

Дифференциальные расходные характеристики ГЭС и ТЭС имеют различную размерность, а именно:

$$b = \frac{dB}{dN}, \quad (2)$$

$$q = \frac{dQ}{dN}, \quad (3)$$

где dB – приращение расхода топлива (т.у.т/час); dQ – приращение расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$); dN – приращение мощности, МВт.

Коэффициент λ в выражении (1) выполняет роль переводного множителя и называется мерой эффективного использования гидроресурсов в ЭЭС. Поэтому приходится опытным путем подбирать значение коэффициента λ с учетом также и ограниченности гидроресурса на ГЭС. Количество итераций может составлять 5 и более, что требует больших затрат машинного времени, означает длительную сходимость методики и является ее явным минусом.

В разработанных ранее методиках существует два способа подбора множителя Лагранжа λ при наличии заданного графика нагрузки энергосистемы [7].

В международной практике для наивыгоднейшего распределения нагрузки между генерирующими объектами используется метод Паретто-оптимального множества [8], который переводит решение сложной пространственной задачи в двумерную плоскость и не позволяет учесть всей специфики и сложности работы мощных энергосистем, занимающих всю территорию Сибири, Урала, Дальнего Востока и т. д. Также применяют метод динамического программирования. Существенным недостатком этого метода является то, что его точность зависит от величины шага квантования, т. е. чем он меньше, тем выше точность расчетов. Это приводит к увеличению объема памяти, которая расходуется на запоминание энергетических характеристик. Поэтому этот метод затруднительно использовать в программных комплексах АСУ ТП, к которым предъявляются достаточно жесткие требования по объему памяти, а также быстроте получения решения. Другим используемым методом является принцип равенства относительных приростов расхода топлива, для которого также присущ недостаток трудности расчетов и длительной сходимости алгоритма с большими затратами машинного времени [8]. А для ценообразования применяют принцип маржинального ценообразования, что, по-нашему мнению, не является эффективным средством, поскольку цена при этом складывается, исходя из затрат замыкающего наименее выгодного производителя и оказывается довольно высокой [8]. В водно-хозяйственном комплексе России используется методика сведения водного баланса для оптимизации его режимов работы [9, 10]. Авторы статьи [11] предлагают анализ и классификацию чрезвычайных ситуаций на ГЭС с целью уменьшения рисков по воде для водно-хозяйственного комплекса. Как показывает зарубежный опыт, то предлагается наряду с соблюдением водного баланса выполнять предписания Европейской директивы 2018/851 об отходах [12]. При этом в источнике [13] особое внимание отводится методам борьбы с пластиком. Однако, ни одной попытки об оптимизации режимов ВХК на основе определения стоимости гидроресурса для всех участников ВХК так и не предпринималось.

Таким образом, как показывает патентно-ориентированный поиск не существует единой универсальной методики по определению стоимости гидроресурса и для ГЭС,



как инфраструктурных объектов, и для ВХК. В основном повсеместно используется налог на воду с той лишь разницей, что за рубежом он существенно выше российских значений.

В статье представлена математическая модель оценки стоимости гидроресурса в системе водно-хозяйственного комплекса (ВХК) и на гидроэлектростанции (ГЭС) при оптимизации режимов работы на основе комплексных критериев эколого-экономической эффективности [13]. Водный баланс является основой для управления ВХК. Водный баланс – это баланс притока, оттока и накопления воды за какой-либо интервал времени для бассейна реки или участка территории, для озера, болота или другого исследуемого объекта. Предлагается определять стоимость гидроресурса для каждой отрасли ВХК, исходя из водного баланса. При этом необходимо различать взаимоисключающие и взаимодополняющие отрасли. Это многокритериальная задача. В качестве критериев приняты надежность и эколого-экономическая эффективность.

При рассмотрении условий оптимизации в смешанной энергосистеме необходимо решить, будет ли напор на ГЭС постоянным или переменным [14]. Поскольку в течение суток напор на любой ГЭС изменяется незначительно, чаще всего эти изменения (при оперативном контроле) не учитываются при определении условий оптимизации [15].

Все тепловые электростанции могут быть представлены эквивалентными характеристиками: $Q = f(N)$; $b = f(N)$ – расходная характеристика эквивалентной ТЭС и эквивалентная характеристика относительного прироста расхода топлива соответственно. Более того, в данном случае имеется в виду, что эквивалентная ТЭС объединяет несколько ТЭЦ, которые характеризуются вынужденным теплофикационным режимом работы [6]. Это можно сделать, потому что ТЭЦ являются источниками с неограниченными ресурсами.

Следует отметить, что для определения относительного прироста расхода воды на ГЭС и расхода топлива на эквивалентных ТЭС используется метод неопределенных множителей Лагранжа с коэффициентом λ – мерой эффективности использования гидроресурсов в энергосистеме (ЭЭС), размерность т. у. т / (час; м³; с). С увеличением водопотребления гидроэлектростанции показатель энергоэффективности λ снижается [6, 7].

Следует также подчеркнуть, что дополнительный расход топлива на электростанциях расходуется на компенсацию потерь активной мощности, протекающей по сети от генерирующего источника к потребителю электроэнергии.

В контексте оптимального распределения нагрузки ЭЭС между станциями особый интерес представляет учет именно этой составляющей потерь, т. е. ΔP [6]. В данной работе потери в сетях не рассматриваются, поскольку все станции находятся на территории Новосибирской области.

Отличительной особенностью разработанной методики является то, что она позволяет сравнивать расход воды на ГЭС и расход топлива на эквивалентной ТЭЦ без использования коэффициента λ на основе теории предельной полезности, что экономит машинное время и значительно упрощает расчеты. Кроме того, он позволяет учесть изменение напора на ГЭС и рассчитать стоимость гидроресурса. Следует подчеркнуть, что до сих пор в мировой практике не создано единой универсальной методики определения стоимости гидроресурса с учетом эксплуатационных особенностей ГЭС.

В инструментарий модели входит сочетание оптимизационного метода множителей Лагранжа с теорией предельной полезности. Это позволяет определить стоимость гидроресурса для ГЭС на основе сравнения расхода воды на ГЭС и количества топлива, необходимого на теплоэлектростанции (ТЭЦ, разновидность ТЭС) для выработки 1 кВт мощности [16, 17]. Полученный результат позволяет не только эффективно и просто



составить оптимальный баланс мощности в энергосистеме, но и управлять всем водно-хозяйственным комплексом.

Причем необходимо отметить, что мы получаем новое правило перехода от относительного прироста расхода воды к относительному приросту расхода топлива: значение относительного прироста расхода воды на ГЭС q' , лежащее на кривой безразличия, будет равно соответствующему значению относительного прироста расхода топлива на ТЭС b' , лежащего на той же кривой. Это является явным преимуществом методики по сравнению с существующими аналогами при решении оптимизационных задач для смешанных энергосистем, состоящих из ГЭС и ТЭС, поскольку позволяет существенно сократить машинное время (требуется всего одно действие вместо пяти итераций) на решение не только поставленной задачи оперативного регулирования, но и оптимизационной задачи с целью обеспечения конкурентоспособности генерирующей компании на рынке.

Еще одним немаловажным преимуществом разработанной методики по сравнению с российскими и зарубежными аналогами является учет изменчивости напора в течение суток, что лучше позволяет учитывать технологические особенности функционирования ГЭС в отличие от ранее использованных методик [2, 6, 7]. На самом деле дифференциальная характеристика ГЭС представляет семейство графиков для различных значений напора [6].

Относительно определения стоимости гидроресурса, связанной с режимными особенностями работы ГЭС в ЭЭС, можно сказать, что эта задача хотя и решалась ранее, но так и не была решена, что подчеркивает уникальность методики. Именно этому вопросу и будет уделено основное внимание в дальнейшем изложении данного материала. Несмотря на то, что данная задача относится к краткосрочной оптимизации режимов работы станций в энергосистеме в силу ограниченности энергоресурсов на ГЭС (что и приводится в данной работе), она не может быть решена в отрыве от оптимизации долгосрочного режима работы ЭЭС (в дальнейших исследованиях планируется решение задачи применительно к более длительному временному интервалу). Здесь под краткосрочной оптимизацией понимается суточная оптимизация, а под долгосрочной – водно-энергетический режим работы гидростанции в течении года с детальным учетом сезонных режимов ГЭС.

Предлагаемый подход основывается, прежде всего, на корректном представлении дифференциальных характеристик (2) и (3). Действительно, данные характеристики должны быть производными не от расходов энергоресурсов, а от затрат (издержек), связанных с их использованием.

Разработанная авторами методика подходит и для объектов распределенной генерации с использованием технологий Smart Grid с применением сетевых сервисов TSO и DSO, которые могут создать резервное кольцо для централизованной энергосистемы применительно к российским условиям [8-10].

Поскольку в данной статье поднимаются такие важные вопросы, как возможность улучшения экологической обстановки и решение энергосберегающих задач во всем мире на основе бережного отношения к водным ресурсам путем оценки стоимости их использования для ГЭС и всего ВХК и сокращения использования органического топлива, то данная методика является актуальной и может быть использована не только для российских условий, но и предложена для широкого международного использования. Она носит универсальный характер и проста в расчетах по сравнению с существующими методиками, так как позволяет учесть экономическую составляющую, которая более полно отражает картину наивыгоднейшего распределения нагрузки в гидро-тепловой энергосистеме. Более того, авторами предложена математическая модель



для ее реализации и проведения оптимизации режимов работы ГЭС и всего ВХК на основе определения стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей ГЭС.

Статья имеет следующую структуру. Часть первая – введение и актуальность темы. Во второй части разработана математическая модель определения стоимости гидроресурса на ГЭС для управления ее режимами работы. Заключение представлено в третьей части.

Математическая модель определения стоимости гидроресурса для ГЭС на основе управления режимами работы ГЭС

Поскольку ГЭС является инфраструктурной отраслью среди всех отраслей водно-хозяйственного комплекса, то целесообразно начать рассматривать решение по определению стоимости воды для ВХК именно с нее.

Патентно-ориентированный поиск критериев оптимизации смешанных энергосистем

Использование прежнего критерия минимизации топливных издержек обеспечило несомненное повышение эффективности энергетического производства в условиях государственного управления отраслью. Однако в настоящее время разработана и реализуется стратегия реформирования электроэнергетической отрасли, которая подразумевает поэтапный переход к конкурентному рынку, где каждый хозяйствующий субъект самостоятельно будет определять объемы производства электрической и тепловой энергии и режимы функционирования. Среди характерных недостатков существующего принципа управления функционированием можно выделить следующие: несоответствие цели управления применительно к современным условиям, когда каждый хозяйствующий субъект будет заинтересован в увеличении собственной прибыли, неэффективность прежнего критерия управления, ориентированного на задание более высокими уровнями управления объемов выработки электрической и тепловой энергии.

Приватизация в энергетике, результатом которой стала организация Федерального оптового рынка (ФОРЭМ), привела к образованию вместо энергосистем самостоятельных субъектов рынка: АО-энерго, АО-электростанций и др. У субъектов оптового рынка электроэнергии появились свои коммерческие интересы, цель которых – получение максимальной прибыли. Более того, прежний критерий минимизации топливных издержек был пригоден лишь при условии задания объема и режима производства электрической и тепловой энергии. В условиях конкурентного рынка каждый объект стремится производить тот объем энергетической продукции и работать в том режиме, который выгоден именно для него.

Этот руководящий принцип максимизации прибыли называется правилом равенства предельных издержек предельным доходам. Графическая иллюстрация данного условия представлена на рис. 1.

Сформулированные задачи и этапы их реализации могут быть представлены на рис. 2.

В ходе научного исследования решались следующие общие задачи:

1. Разработан комплексный критерий определения стоимости водного ресурса для водохозяйственного комплекса, включающего в себя такие отрасли, как домашнее население, промышленный сектор, сельское хозяйство, рыболовство и судоходство; выполнен водно-энергетический расчет по регулированию стока с целью его перераспределения в заданный период времени.

2. Проведен анализ существующих российских и зарубежных методик оптимизации режимов работы гидротепловых энергосистем.



3. Выполнен патентно-ориентированный поиск ранее созданных методик по оптимизации режимов работы водно-хозяйственного комплекса.

4. Создана методика синергетической оценки стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей функционирования ГЭС в составе смешанной энергосистемы.

5. Разработан подход для оптимизации режимов работы ГЭС в составе смешанной энергосистемы.

6. Предложена методика для определения стоимости гидроресурса для всех участников водно-хозяйственного комплекса на основе определения стоимости воды для ГЭС в современных условиях.

7. Осуществлена практическая реализация разработанных принципов и методик на основе конкретного энергетического объекта.

8. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с ранее разработанными методиками.

В современных условиях, когда число вредных воздействий на окружающую среду неумолимо возрастает, улучшение экологической обстановки является актуальным направлением исследований [18]. В данной работе предлагается увеличивать роль возобновляемых источников энергии на примере ГЭС и тщательно подходить к оценке и возможностям использования гидроресурса без нанесения урона природе всеми участниками водно-хозяйственного комплекса.

Разработанная авторами методика оптимизации режимов работы ГЭС в составе смешанных энергосистем на основе определения стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей работы ГЭС основана на сочетании теории предельной полезности и оптимизационной модели [19]. Поскольку энергетика является инфраструктурной отраслью, то оптимизация режимов ее работы позволит оптимизировать работу всего водно-хозяйственного комплекса стран, что позволит реализовать энергосберегающую политику за счет более бережного отношения к природным ресурсам.

Прежде, чем создавать новую методику оптимизации необходимо проанализировать в деталях ранее созданные оптимизационные модели [6, 7].

При рассмотрении условий оптимизации в смешанной энергосистеме необходимо решить вопрос, будет ли на ГЭС напор постоянным или переменным.

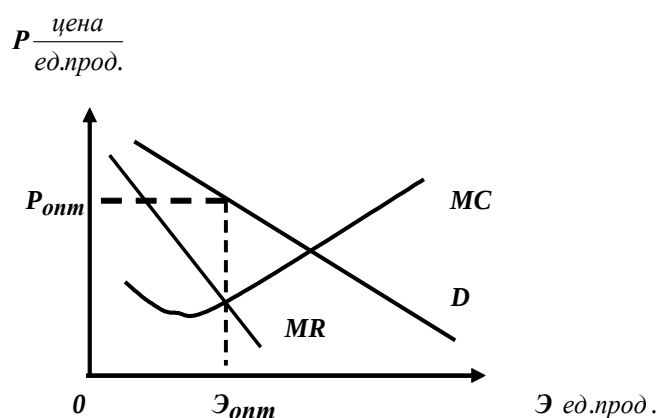


Рис. 1. Определение оптимального объема выпуска продукции:

D – спрос на производимую энергию за определенный временной период; $\mathcal{E}_{\text{опт}}$ – оптимальная величина выработки за период; $P_{\text{опт}}$ – цена продажи, соответствующая оптимальному объему производства; MR – предельный доход; MC – предельные издержки.



Гибкий рынок электроэнергетики

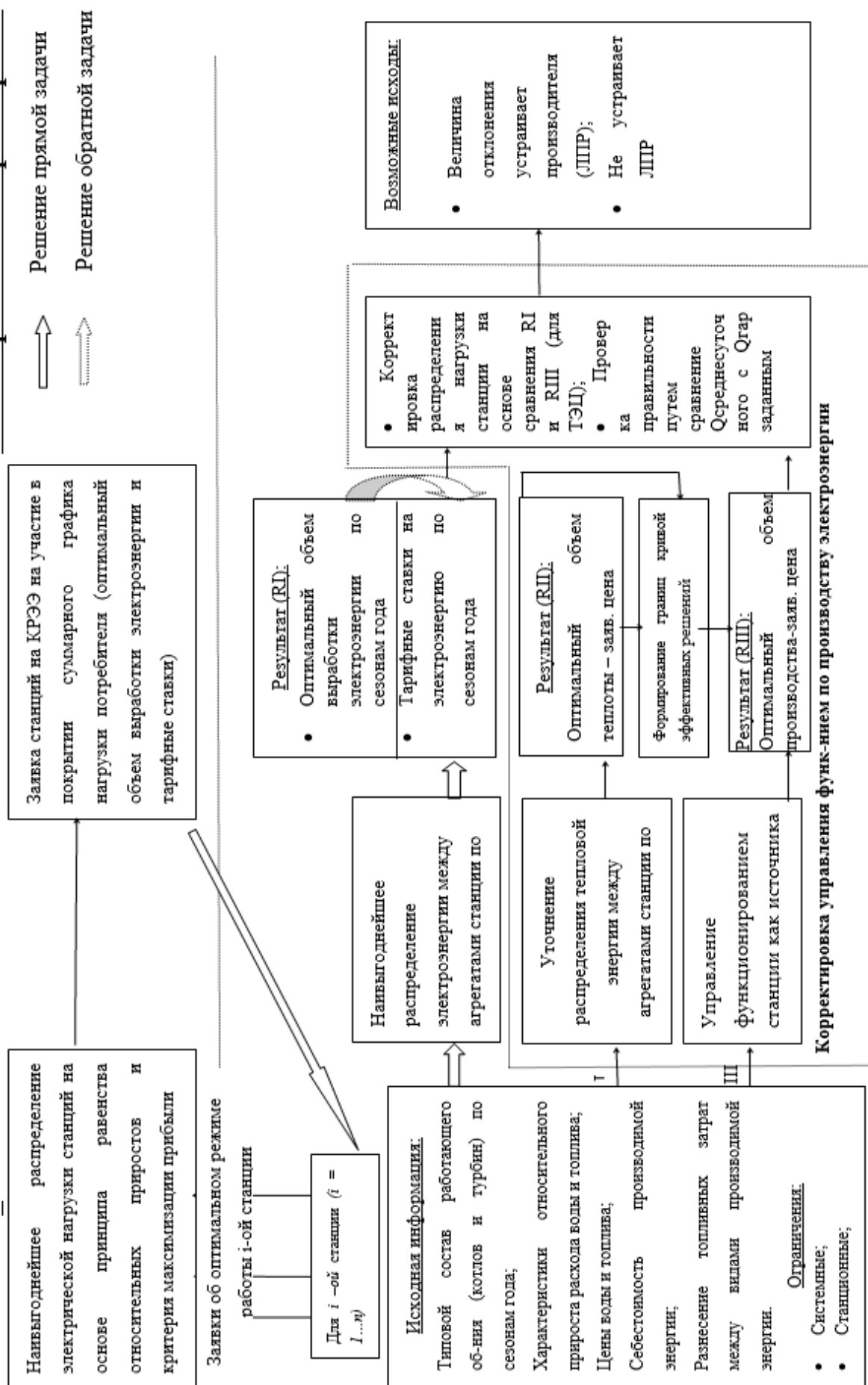


Рис. 2. Блок-схема управления функционированием станциями в условиях гибкого рынка



На средне- и низконапорных станциях колебания напора более существенно, чем на высоконапорных станциях.

Однако в течение суток напор на любых ГЭС изменяется незначительно. Поэтому при выводе условий оптимизации, чаще всего, изменение напора в течении суток (при оперативном управлении) не учитывают.

Исходя из этого, получают окончательное условие оптимизации (1) [6, 7].

Коэффициент λ в этом условии зависит от параметров ГЭС: от напора H , от расхода Q , т. е. $\lambda = f(H, Q)$. Как показывают исследования, при увеличении напора на ГЭС мера эффективности λ увеличивается. Диапазон изменения λ заключен в примерном диапазоне $[0,03-0,3]$. Поэтому коэффициент λ в выражении выполняет роль переводного множителя и называется мерой эффективного использования гидроресурсов в ЭЭС. Поэтому приходится опытным путем подбирать значение коэффициента λ с учетом также и ограниченности гидроресурса на ГЭС. При этом число итераций может составлять от пяти и более до тех пор, пока не будет выполнено условие (1). Эти обстоятельства приводят к серьезному усложнению расчетов, связанных, прежде всего, с увеличением количества итерационных процедур, а значит и машинного времени решения и сходимостью данного процесса.

Делают допущение, что на гидростанции в течение периода оптимизации напор не меняется, хотя станция и ведет регулирование. Допущение о постоянстве напора ГЭС существенно упрощает алгоритм решения задачи. При этом 1 м^3 воды для всего периода оптимизации обладает практически одинаковой энергией.

Эквивалентировать все ТЭС возможно благодаря тому, что ТЭС в оптимизационных задачах представляются как генерирующие источники с «неограниченным энергоресурсом», т. е. в отдельно взятый момент времени любая мощность станции, естественно, в пределах допустимого диапазона ее работы будет обеспечена запасом энергетического ресурса вне зависимости от того, какую мощность станция несла в предшествующий момент времени. При этом должны быть учтены все технические ограничения.

Гидравлические станции относятся к генерирующим источникам с «ограниченными энергоресурсами», так как его количество определяется гидрографом реки и конечной полезной ёмкостью водохранилища. Поэтому мощность ГЭС в данный момент времени зависит от значения мощности за предыдущий временной интервал. В силу сказанного, эквивалентную характеристику гидравлических станций построить невозможно.

Для смешанной энергосистемы задача наивыгоднейшего распределения нагрузки подразделяется на две различные задачи.

Первая - оптимизация длительных режимов системы. В этой задаче для всего цикла регулирования ГЭС находится наивыгоднейшее распределение нагрузки между станциями системы и определяется режим использования водно-энергетических ресурсов водохранилищ. Определяются календарные график сработки и заполнения водохранилищ всех гидростанций системы. На основе таких расчетов регламентируются гидроресурсы для краткосрочных циклов. Например, если станция имеет годовое регулирование стока, то будут определены ограничения по ресурсам (стоку) за месяц, неделю, сутки.

Вторая - оптимизация краткосрочных режимов.

При этом при оптимизации смешанных энергосистем необходимо для каждого момента времени обеспечить равенство приведенных к ТЭС относительных приростов расхода воды на ГЭС и относительных приростов расхода топлива на эквивалентной ТЭС.



Конечно, краткосрочные и долгосрочные режимы ГЭС тесно связаны, но алгоритмические и вычислительные трудности не позволяют рассматривать эти задачи в едином алгоритме. Основанием для такого деления является также и различие в полноте и достоверности исходной информации. Для суточного, а иногда и для недельного периода информация имеет достаточную для практических целей достоверность. Можно довольно точно предсказать приточность рек, нагрузки системы, состав агрегатов электростанций и др. Для длительных же циклов информация имеет вероятностную либо неопределенную форму. Кроме того, объединение этих задач сопряжено с резким усложнением оптимизационных алгоритмов.

Предполагается, что на гидростанции в течение периода оптимизации напор не меняется, хотя станция и ведет регулирование. Такие случаи встречаются для высоконапорных и средненапорных ГЭС, когда изменение напоров за счет колебания бьефов не вносит существенной погрешности в энергетические показатели станции.

Изменение напора ГЭС может вызываться непостоянством уровней верхнего и нижнего бьефов в течение периода оптимизации. На приплотинных ГЭС с большими водохранилищами уровень верхнего бьефа за сутки меняется мало, а уровень нижнего бьефа достаточно сильно. На деривационных ГЭС на несколько метров может меняться напор за счет изменения уровня напорного бассейна.

Изменение напора вызывает эффект последствий, т. е. влияние режима ГЭС на текущем интервале на последующие. Это усложняет оптимизацию.

Проводить оптимизацию с учетом изменения напора за счет нижнего бьефа можно только при сочетании программы расчета неустановившегося режима расходов и уровней нижнего бьефа с программой оптимизации, что вызывает большие алгоритмические трудности. Схема комплекса программ расчетов предполагает: прогнозы (графиков нагрузок ЭЭС, гидрологические прогнозы стока рек); каскады (гидроэнергетический расчет каскадов); изменение напора (расчет неустановившегося режима в нижних бьефах ГЭС); оптимальное распределение нагрузки в ЭЭС.

Для чего предлагается использовать такие программные продукты как RASTR, Excel.

Поэтому чаще всего режим рассчитывают при постоянных (средних за сутки) напорах.

В такой постановке b и q имеют различную размерность. Поэтому приходится опытным путем подбирать значение коэффициента λ с учетом также и ограниченности гидроресурса на ГЭС. Эти обстоятельства приводят к серьезному усложнению расчетов, связанных, прежде всего, с увеличением количества итерационных процедур и сходимостью данного процесса.

Учитывая все вышеприведенные недостатки существующей модели, можно заключить, что требуется разработка принципиально новой оптимизационной методики при ведении режимов гидротепловой энергосистемы без использования коэффициента неопределенных множителей Лагранжа и с учетом переменного напора, но простую в случае ее практической реализации. Именно этим вопросам и будет посвящена работа.

Методика оптимизации режимов работы ГЭС на основе определения синергетической стоимости гидроресурса

При этом за основу предлагается взять теорию предельной полезности, которая в сочетании с оптимизационными моделями позволит создать подобную методику. Применительно к нашей задаче в качестве продуктов будем рассматривать воду и топливо, используемые для выработки одинакового объема электроэнергии.

Предельная полезность — это увеличение общей полезности при потреблении одной дополнительной единицы блага:



$$MU = \frac{\partial U}{\partial Q} \quad (4)$$

где MU – функция предельной полезности; U – функция полезности; Q — количество потребляемого блага.

Отношение людей к риску может быть объяснено анализом полезности.

Люди часто должны или могут выбирать среди альтернатив, отличающихся помимо прочего, степенью риска, которому человек будет подвержен.

Допустим, что в данный момент времени нам дана функция полезности, то есть нам известна величина полезности, которую данный индивидуум мог бы извлечь из какого-то данного количества товара на рынке. Тогда мы можем вывести из этой функции шкалу предпочтений, причем мы можем говорить о любых двух товарах независимо от того, предпочтет ли он один другому, или же они будут ему безразличны. Если имеется только два вида товара, то шкала предпочтений может быть выражена диаграммой кривых безразличия.

Очевидно, что это предельная норма замены является не чем иным, как тем, что обычно мы называем меновым отношением полезности товара X к предельной полезности товара Y . Это и называется относительной предельной полезностью.

Если количества X и Y представить на диаграмме безразличия (количества всех других товаров полагая заданными), предельная норма замены между X и Y будет измеряться наклоном кривой безразличия, которая пройдет через точку, на которой находится индивидуум. Она попросту зависит от системы кривых безразличия; на данной карте безразличия мы можем непосредственно определить наклон в любой точке; а если даны наклоны во всех точках внутри области, мы можем воссоздать карту безразличия для данной области.

Применительно к нашей задаче в качестве продуктов будем рассматривать количество воды и топлива, используемые для выработки заданного объема электроэнергии.

В разработанной авторами методике предлагается вместо физических величин характеристик относительных приростов расхода воды на ГЭС и топлива на эквивалентной ТЭС использовать их денежные эквиваленты, а именно предельные издержки по воде и топливу согласно выражениям (29 и 30). Это позволит более комплексно и правильно отразить физическую картину при оптимизации режимов работы смешанной энергосистемы:

$$U_B = C_B B \quad (5)$$

$$U_Q = C_Q Q \quad (6)$$

где C_B и C_Q – цена на топливо и гидроресурс на ТЭЦ и ГЭС соответственно.

Более подробно выражения (29) и (30) могут быть переписаны в следующем виде:

$$b^* = C_B \frac{dB}{dQ} \quad (7)$$

$$q^* = C_Q \frac{dQ}{dN} \quad (8)$$



Цена топлива отличается по сезонам года и зависит от марки угля, его зольности, калорийности, влажности и т. д. и является величиной известной [12]. Стоимость гидроресурса с учетом режимных особенностей работы ГЭС в смешанной энергосистеме до сих пор не была определена, хотя и предпринимались попытки. Как показывает российский и зарубежный опыт, используют лишь налог на воду, в том числе за затопляемые земли и т. д.

Поэтому можно сказать, что в данной работе предложен принципиально новый подход к переходу от относительного прироста расхода топлива на эквивалентной ТЭС к характеристике относительных приростов расхода воды на ГЭС при оптимизации режимов работы смешанных энергосистем на основе определения стоимости гидроресурса, что может быть использовано при оптимизации водного баланса всего воднохозяйственного комплекса страны. Именно этому вопросу и посвящена работа.

Таким образом, условие оптимального распределения нагрузки в гидротепловой энергосистеме в новой постановке можно представить в другом виде (9). Причем необходимо отметить, что поскольку в данной статье рассматриваются только генерирующие источники, то потерями мощности в сетях пренебрегают:

$$\begin{aligned}
 b^* &= q^* = \text{idem}; \\
 H &= \text{const}; \\
 NH &= N_{\text{ТЭС}} + N_{\text{ГЭС}}; \\
 N_{\text{ТЭС min}} &\leq N_{\text{ТЭС}} \leq N_{\text{ТЭС max}}; \\
 N_{\text{ГЭС min}} &\leq N_{\text{ГЭС}} \leq N_{\text{ГЭС max}}; \\
 N_{\text{набл}} &= \frac{U_1 * U_2}{Z_c \sin \alpha_0 L}
 \end{aligned} \tag{9}$$

где U_1 – модуль напряжения в начале линии; U_2 – модуль напряжения в конце линии; Z_c – волновое сопротивление линии; $\alpha_0 L$ – волновая длина линии.

В условии (9) параметры b^* и q^* определяются по (7) и (8) и представляют из себя производные от издержек, связанных с использованием топлива на ТЭС и воды на ГЭС соответственно. При этом необходимо отметить, что на характеристику предельных издержек для ГЭС накладываются ограничения по пропускной способности турбины и мощности генератора, а также по стоку, который может использоваться из водохранилища за определенный период T .

Для определения стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей ГЭС для оптимального покрытия баланса ЭЭС построим математическую модель. Любая математическая модель состоит из пяти уравнений, которые рассмотрим ниже.

1. Первое - уравнение цели:

$$\frac{1 - \sigma}{b} = \frac{1 - \sigma}{q} \text{ при } U = \text{const}, \tag{10}$$

где U – кривая безразличия.

Для нахождения значений b и q в выражении (10) и используемым при построении кривой безразличия, необходимо использовать значение гарантированной мощности ($N_{\text{гар}}$), которое получают по итогам выполнения водно-энергетического расчета.



Значение гарантированной мощности должно соответствовать расчетной обеспеченности года.

После чего для найденного значения $N_{\text{гар}}$ находят значение расхода воды Q :

$$N_{\text{гар}}^a(\mathcal{E}_{\text{мес}}) \rightarrow Q \quad (11)$$

при $N_{\text{гар}} = \text{const}$.

Затем определяют значение относительного прироста расхода воды (q) по дифференциальной характеристике расхода воды.

$$q = \frac{dQ_{\text{ГЭС}}}{dN_{\text{гар}}}; \quad Q_{\text{ГЭС}} \geq Q_{\text{гар}}.$$

Уравнения балансовых ограничений могут быть представлены выражением (36):

$$N_c^a = N_{\text{гар}}^a + N_{\text{ТЭС}}^a \quad (12)$$

2. Далее необходимо построить уравнение связи. Оно будет отражать выполнение такого требования, как соблюдение энергетического баланса энергосистемы.

$$B = f(N_{\text{ТЭС}}),$$

$$Q_{\text{ГЭС}} = f(N_{\text{ГЭС}}, H_{\text{ГЭС}}).$$

Затем из уравнения (12) определяют значение мощности эквивалентной ТЭС

$$N_c^a - N_{\text{гар}}^a = N_{\text{ТЭС}}^a \quad (13)$$

После чего по характеристике относительного прироста расхода топлива на эквивалентной ТЭС находят соответствующее значение ее относительного прироста

$$b = \frac{db}{dN_{\text{ТЭС}}}, \quad (14)$$

При этом важным замечанием является тот факт, что текущие значения относительных приростов расхода воды на ГЭС и топлива на ТЭС делились на средние значения относительного прироста расхода воды и топлива соответственно с целью получения графиков относительных расходов энергоресурсов на станциях.

3. Далее по полученным значениям была построена кривая предельной полезности или безразличия (рис. 3).

Авторами разработанной методики было получено новое правило перехода от значений относительного прироста расхода воды к относительному приросту расхода топлива: при этом значение относительного прироста расхода воды на ГЭС q' , лежащее на кривой безразличия (см. рис. 3) равно соответствующему значению относительного прироста расхода топлива на ТЭС b' , которое принадлежит той же кривой безразличия.



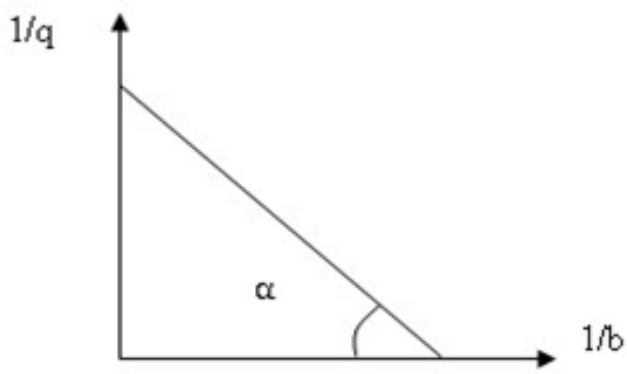


Рис. 3. График кривой безразличия

При решении оптимизационных задач для гидротепловых энергосистем, состоящих из ГЭС и ТЭЦ, это является явным плюсом методики, так как существенно сокращает машинное время на реализацию поставленной задачи, заменяя пять итераций одним действием.

Также необходимо отметить, что показатели мощности для определенного часа суточного графика нагрузки принадлежат данной кривой безразличия в рамках определенного месяца [13].

По значениям $N_{\text{гпр}}$ для ГЭС и показателю общей мощности энергосистемы для определенного часа суток находим мощность эквивалентной ТЭС на основе характеристики равенства относительных приростов расхода топлива (рис. 5).

4. Также необходимо рассмотреть ограничения следующего вида:

$$\begin{aligned} N_{TЭС \min} &\leq N_{TЭС} \leq N_{TЭС \max} \\ N_{ГЭС \min} &\leq N_{TЭС} \leq N_{ГЭС \max} \end{aligned} \quad (15)$$

Для учета ограничений вида $N_i^{\text{MAX}} \geq N_i \geq N_i^{\text{MIN}}$ используют наложение штрафов на зоны нежелательной работы, т. е. на максимальную N_i^{MAX} и минимальную N_i^{MIN} мощности электростанций (рис. 5 и рис. 6). Такие же ограничения накладываются и на предельные издержки по топливу и воде.

5. После этого строим оптимизационное уравнение равенства предельных издержек предельному доходу согласно критерию максимизации прибыли. С целью построения кривой предельных издержек определяют стоимость гидроресурса с учетом режимных особенностей ГЭС и вынужденного теплофикационного режима эквивалентной ТЭС, используя предложенный авторами критерий эколого-экономической эффективности.

Для определения стоимости гидроресурса на ГЭС применяют следующую последовательность действий.

При переходе от физических показателей относительного прироста расхода топлива на ТЭС и воды на ГЭС на кривой безразличия к аналогичному графику по предельным издержкам необходимо сказать, что угол наклона кривой безразличия (α) остается точно таким же, как и на рис. 3.

Далее на основе кривой безразличия (см. рис. 7) по предельным издержкам находим стоимость гидроресурса на ГЭС, работающей в гидротепловой энергосистеме.

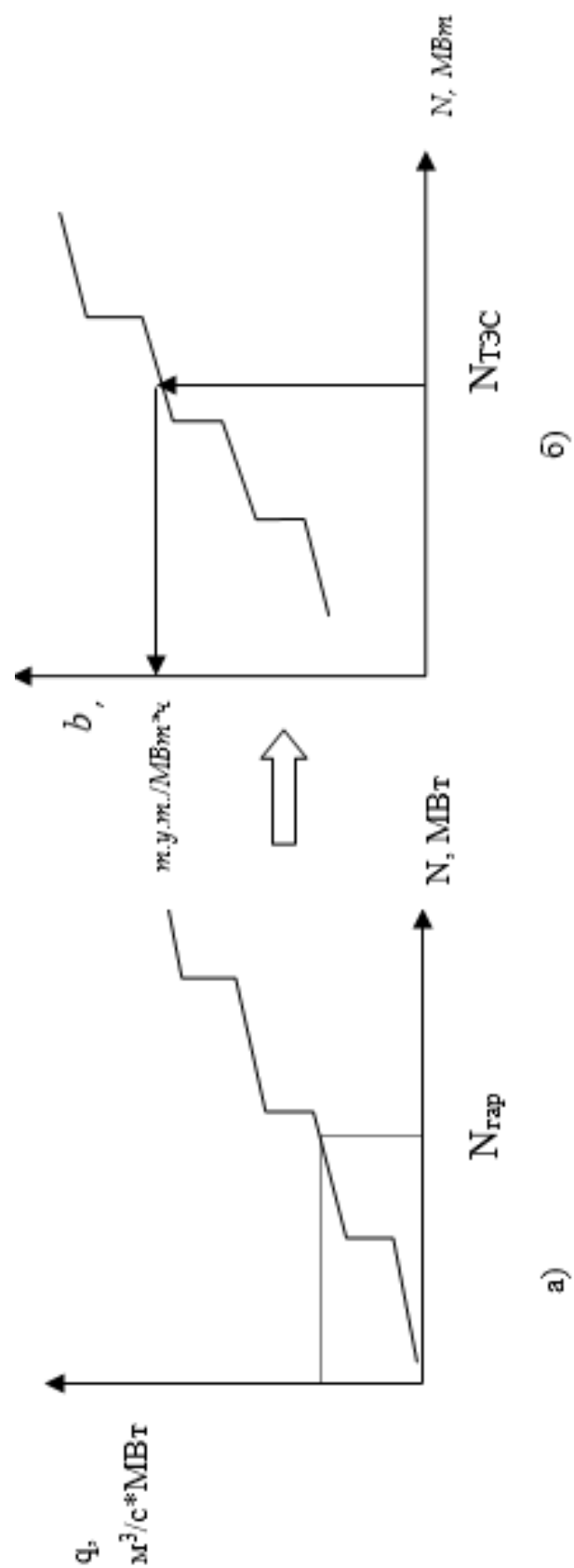


Рис. 6. Характеристики относительного прироста расхода воды на ГЭС (а) и топлива на эквивалентной ТЭС (б)



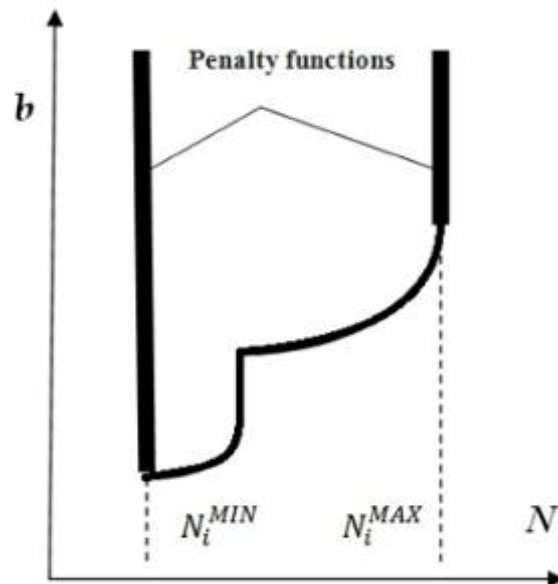


Рис. 5. Штрафные функции для ТЭЦ

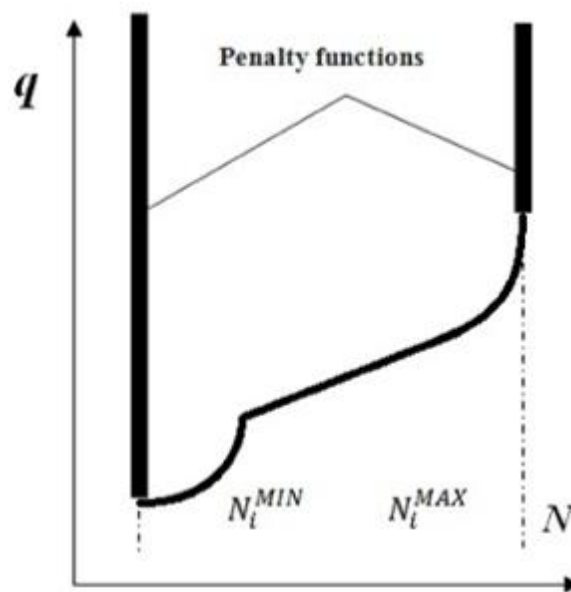


Рис. 6. Штрафные функции для ГЭС

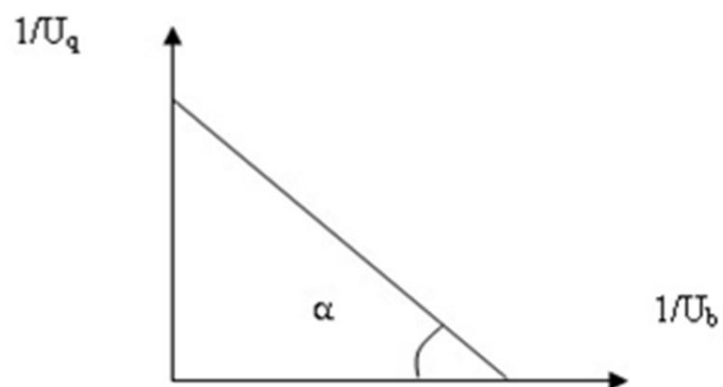


Рис. 7. Кривая безразличия по предельным издержкам

Стоимость гидроресурса для ГЭС определяется следующим образом:

$$U_q = u * q, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{1/q}{1/b}, \quad u_{\text{воды}} = \operatorname{tg} \alpha * \frac{U_b}{u_m} \quad (16)$$

Тогда предельные издержки для ГЭС определяют следующим образом

$$MC = u_{\text{воды}} * q \quad (17)$$

Для нахождения оптимальных значений вырабатываемой мощности по сезонам года необходимо решить систему из уравнений, описывающих предельные издержки и предельный доход станции:

$$N_{\text{опт}} = \mathcal{E}_{\text{опт}} / t_{\text{мес}} \quad (18)$$

где $t_{\text{мес}}$ – среднее число часов работы оборудования за месяц (720 ч).

Поскольку при построении дифференциальной характеристики ГЭС (q^*) учтена мощность, с которой работает ГЭС в определенный период года, а соответственно напор и расход воды, то проверка равенства заданного расхода по ВЭР в годовом разрезе среднесуточному расходу воды на ГЭС отсутствует. В силу этого отпадает необходимость в проверке равенства заданного расхода среднесуточному расходу воды на ГЭС. Более того, расчет выполняется в одно действие взамен пяти и более итерациям согласно существующему методу равенства относительных приростов расхода топлива, что существенно улучшает сходимость метода и экономит машинное время. Это является важным преимуществом предложенной методики.

Более того, при использовании теории предельной полезности отпадает необходимость в определении коэффициента эффективности использования энергетических ресурсов λ . Поскольку авторами разработано новое правило перехода от относительно прироста расхода воды на ГЭС к относительному приросту расхода топлива на ТЭС, которые лежат на одной линии безразличия. Более того, ими предложено использовать вместо физических величин их денежные эквиваленты (предельные издержки), что лучше позволяет отразить технико-экономическую природу процесса оптимизации.

Также, необходимо отметить, что разработанная авторами методика позволяет учесть изменение давления и напора в течение суток, что не позволяет реализовать традиционный метод неопределенных множителей Лагранжа. Это позволяет учесть разную энергетическую ценность 1 м³ воды на протяжении различных временных интервалов всего оптимизационного периода.

И как одно из самых важных преимуществ методики можно отметить, что появляется возможность в реальном определении стоимости гидроресурса с учетом режимных особенностей ГЭС для соблюдения условия энергетического баланса генерирующих компаний.

Более того, необходимо отметить, что стоимость воды на Новосибирской ГЭС, которая может рассчитана с применением выражения (16) сопоставима со стоимостью топлива на ТЭС, что свидетельствует о правильности проведенных расчетов.

Так стоимость воды на НГЭС для периода сработки – 0,1583 руб/м³/с. Если перевести ее в часы, то получим, что 0,1583·3600 = 569 руб/м³, что сопоставимо с ценой 1 тонны бурого угля, равной 690-980 руб за тонну в зависимости от сезона года.



Если рассчитать стоимость для Кузнецкого угля на ТЭЦ, то получим, что для периода сработки на НГЭС – $0,1583 \cdot 3600 = 569$ руб/м³, что в два раза меньше стоимости 1 тонны кузнецкого угля, равной 1200 руб за тонну. Это говорит об энергоэффективности разработанной модели, поскольку позволит вытеснить менее экологичную и экономичную ТЭЦ ГЭС.

Таким образом, стоимость гидроресурса позволит компенсировать нанесенный ущерб природе (площадь затопляемых земель и т.д.) и обеспечить бережный и экологичный подход к решению многих технологических вопросов.

В рыночной экономике, исследуя поведение отдельных фирм, исходят из предположения, что фирмы определяют оптимальный объем выпуска продукции из условия максимизации прибыли.

Для этого при назначении оптимальных режимов работы станции, то есть определении объемов выработки энергии, необходимо определить и сравнить суммы, которые каждая дополнительная единица продукции будет добавлять к валовому доходу, с одной стороны, и к валовым издержкам – с другой.

Таким образом, новым критерием оптимизации режимов работы энергосистем является принцип максимизации прибыли:

$$MR = MC \quad (19)$$

Используя данный критерий и данные, которые взяты из статей [18], переходим к построению графика максимизации прибыли и определению оптимальной выработке мощности и цене продаж для января. Данный график будет приведен ниже на рис. 8.

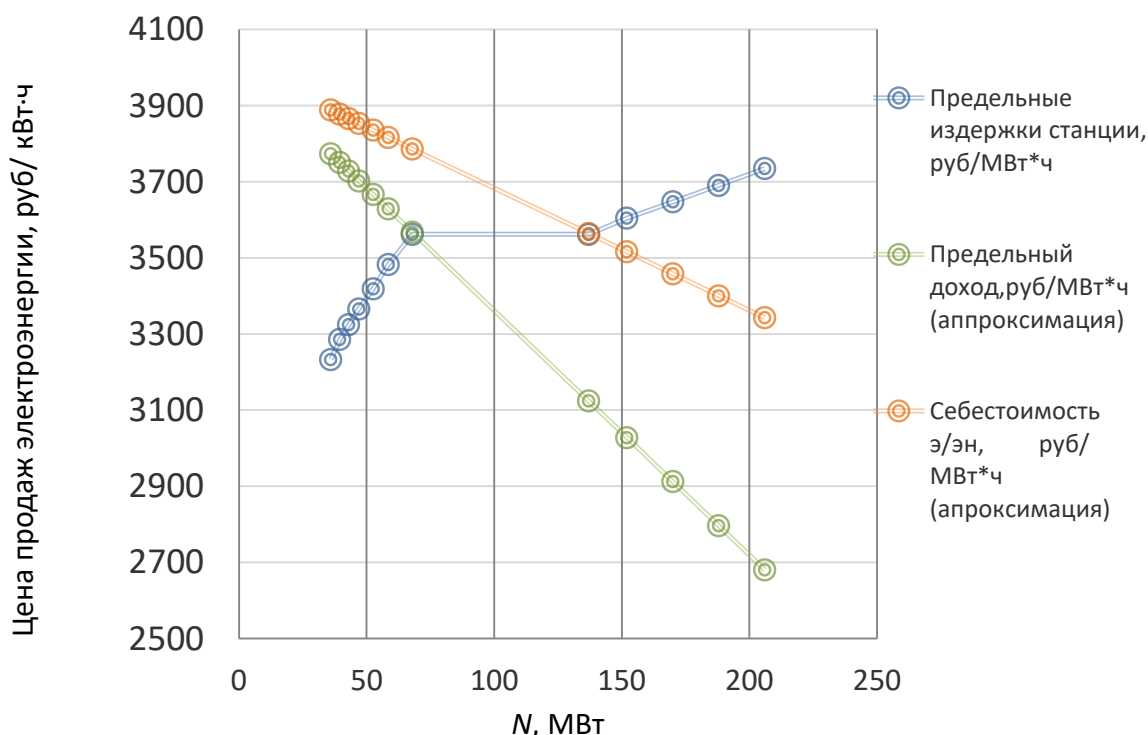


Рис. 8. График максимизации прибыли НГЭС для периода межени

Оптимальные режимы работы НГЭС по сезонам года приведены в табл. 1.



Таблица 1

**Определение стоимости гидроресурса для Новосибирской ГЭС
с учетом режимных особенностей ее функционирования.**

Сезон года	Режим работы ГЭС при напоре:		
	$H = 14,05$ м	$H = 17,5$ м	$H = 17,9$ м
Норма прибыли	0%	0%	0%
Мощность, МВт	305	70	124
Электроэнергия, МВт·ч	219600	50400	89280
Заявленная цена, руб/ МВт·ч	3600	3786	3700
Доход, руб	2371680000	1335700800	660672000

Следует отметить, что только реализация комплекса природоохранных мероприятий позволит снизить остроту проблемы с водой и обеспечить развитие всех хозяйственных комплексов на перспективное будущее и, в конечном счете, обеспечить гармонию с природой.

Все это делает разработанную авторами методику конкурентноспособной и адекватной требованиям гибкого энергетического рынка, когда возрастает роль возобновляемых источников энергии, что позволяет улучшить экологическую обстановку в мире в целом, а также решить важные задачи по энергосбережению. Более того, она является энергоэффективной как с точки зрения управления режимами ГЭС, так и всего ВХК.

Выводы

По результатам проведенного научного исследования можно отметить следующее: был разработан комплексный критерий для определения стоимости гидроресурса для ГЭС с учетом ее режимных особенностей функционирования. При этом ограничениями при оптимизации режимов работы ГЭС в водно-энергетических расчетах служат потребности участников водохозяйственного комплекса (ВХК), таких как судостроение, ирригация и ирригация, рыболовство, водоснабжение крупных городов и предприятий; проведен критический анализ существующих критериев управления станцией, проведен анализ традиционного метода более оптимального распределения мощности в смешанной энергосистеме методом неопределенных множителей Лагранжа и выявлены его недостатки, связанные с кратностью итераций и длительностью процесса. Отдельно нужно сказать об условии $H = \text{const}$, которое имеет место в течение суток как допущение этого метода. Однако в течение дня напор на ГЭС непостоянен. При определении условий оптимизации, как правило, не учитывается изменение напора за сутки (при оперативном контроле); разработан новый подход к управлению и оптимизации режимов работы энергосистем смешанного типа; в разработанной модели вместо физических показателей относительного прироста расхода воды на ГЭС и топлива на эквивалентной ТЭС используют их денежные эквиваленты, а именно предельные издержки расхода воды и топлива соответственно. При этом лучше учитываются технологические и экономические особенности выработки электроэнергии на ГЭС за счет выработки нового правила перехода от относительных приростов расхода воды на ГЭС к расходу топлива на ТЭС. Также происходит улучшение сходимости процесса и сокращение вычислительных ресурсов за счет сокращения объема производимых итераций (решение получают за одно действие). У общества вырабатывается более бережное отношение к окружающей среде за счет увеличения доли ГЭС в энергобалансе регионов и



страны в целом. Все это является следствием проводимой на ГЭС и в ВХК оптимизации по предложенной авторами методике с использованием теории предельной полезности. Благодаря чему возможно решение задач по улучшению экологической обстановки в стране, а также реализация энергосберегающей политики. Так, доля Новосибирской ГЭС в покрытии энергобаланса региона выросла порядка 12%, а стоимость гидро-ресурса на ГЭС сопоставима с ценой топлива на эквивалентной ТЭЦ.

Средняя стоимость гидро-ресурса для периода паводка составляет 0,1583 руб/(м³/с), для межени – 0,0963 руб/(м³/с), для работы на бытовом стоке – 0,119 руб/(м³/с).

Таким образом, предложенная авторами математическая модель подходит для проведения оптимизации как режимов работы ГЭС на основе определения стоимости гидро-ресурса, так и всего ВХК в целом.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ПАО «РусГидро»- «Новосибирская ГЭС»

Acknowledgments

The work was carried out with the support of the PJSC "RusHydro" - "Novosibirskaya HPP".

Библиографический список

1. Mitrofanov S.V., Sekretarev Y.A. Preventive control taking into account of an operational condition power equipment and flowing path of hydropower plant [Превентивное управление эксплуатационным состоянием основного силового оборудования и проточного тракта ГЭС] // Journal of the Siberian Federal University. 2013. № 1. P. 3-14.
EDN: [PXQQZJ](#)
2. Simulation Model of Cascaded Hydro Power Plants in Pamir / A. Rusina, S. Mitrofanov, A. Arestova, N. Terlyga // The 13 International forum on strategic technology (IFOST 2018), Proc. Harbin: IEEE, 2018. P. 889-892. URL: https://www.researchgate.net/publication/363103005_Simulation_Model_of_Cascaded_Hydro_Power_Plants_in_Pamir
3. Макконнелл К.Р., Брю С.Л., Флинн Ш.М. Экономикс: принципы, проблемы и политика: учебник; пер. с англ. 21-е изд. М.: ИНФРА-М, 2023. 1152 с.
4. Гальперин В.М. Теория потребительского поведения и спроса. СПб: Экономическая школа, 1993. 380 с.
5. Гидроэнергетика / Т.А. Филиппова, М.Ш. Мисриханов, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина. Новосибирск: НГТУ, 2011. 640 с.
6. Transmission Grid Resiliency Investment Optimization Model with SOCP Recovery Planning / K. Garifi, E.S. Johnson, B. Arguello, B.J. Pierre // IEEE Transactions on Power Systems. 2022. Vol. 37, Issue 1. P. 26-37.
DOI: [10.1109/TPWRS.2021.3091538](#)
7. Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters / W. Yuan, J. Wang, F. Qiu et al. // IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. Vol. 7, Issue 6. P. 2817–2826. DOI: [10.1109/TSG.2015.2513048](#)
8. A scalable mixed-integer decomposition approach for optimal power system restoration [Electronic resource] / I. Aravena, D. Rajan, G. Patsakis et al. // Oak Ridge: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information. 8 p. URL: <https://www.osti.gov/biblio/1642361> (дата обращения: 15.06.2023).
9. The classification of accidental situations scenarios on hydropower plants / O. Skvortsova, A. Dashkina, E. Petrovskaya et al. // MATEC Web of Conferences. EDP Science. 2016, Vol. 53. P. 01014.
EDN: [VWROZF](#)
DOI: [10.1051/mateconf/20165301014](#)



10. Effects of different deuterium concentrations of the media on the bacterial growth and mutagenesis / G. Török, M. Csík, A. Pintér, A. Surján // *Egészségtudomány*. 2000. Vol. 4. P. 331-338.
11. Technologies for reducing sludge production in wastewater treatment plants: state of the art / Q. Wang, W. Wei, Y. Gong et al. // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 587-588. P. 510-521. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.02.203](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.203)
12. What Advanced Treatments Can Be Used to Minimize the Production of Sewage Sludge in WWTPs? / M.C. Collivignarelli, A. Abbà, M.C. Miino, V. Torretta // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, Issue 13. P. 2650. DOI: [10.3390/app9132650](https://doi.org/10.3390/app9132650)
13. Ivanova E.V., Balobanova A.G. Assessment of opportunity of placement the renewable energy sources on the territory of the Novosibirsk HPP // *Aspire to Science: материалы междунар. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Новосибирск, 18 апр. 2019 г.* Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. С. 87–91. EDN: [KWLBI](https://www.edn.net/KWLBI)
14. Разработка имитационной модели работы каскада ГЭС/ С.В. Митрофанов, А.Ю. Арестова, А.Г. Русина, А.Е. Калинин // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2019. Т. 11, № 2 (42). С. 116–126. EDN: [ZFACHZ](https://www.edn.net/ZFACHZ)
15. Mitrofanov S.V., Sekretarev Y.A. Decision support system for hydro unit commitment // 2 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). Proc. Chelyabinsk: IEEE, 2016. P. 1-4. EDN: [XNFIWB](https://www.edn.net/XNFIWB) DOI: [10.1109/ICIEAM.2016.7911424](https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911424)
16. Behavioral simulation and optimization of generation companies in electricity markets by fuzzy cognitive map / S.F. Ghaderi, A. Azadeh, B.P. Nokhandan, E. Fathi // *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39. P. 4635–4646. DOI: [10.1016/j.eswa.2011.08.097](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.097)
17. Гальперин В.М., Игнатьев С.М., Моргунов В.И. Микроэкономика. СПб: Экономическая школа. 1997. 348 с.
18. Sekretarev Y.A., Myateg T.V., Gorshin A.V. Justification of the water price at hydropower plants based on its operational features according to the maximization profit criteria // International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon). Proc. Vladivostok: IEEE, 2020, P. 1-6. EDN: [OMEULL](https://www.edn.net/OMEULL) DOI: [10.1109/FarEastCon50210.2020.9271220](https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271220)
19. Sekretarev Y.A., Chekalina T.V., Malosemov B.V. Administration Functioning Power Generation Companies by Criterion of Maximization Profit // Symposium of papers the 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2011). Harbin: IEEE, 2011. P. 491-494. EDN: [PEBSND](https://www.edn.net/PEBSND) DOI: [10.1109/IFOST.2011.6021070](https://doi.org/10.1109/IFOST.2011.6021070)

References

1. Mitrofanov, S. V., & Sekretarev, Y. A. (2013). Preventive control taking into account of an operational condition power equipment and flowing path of hydropower plant. *Journal of the Siberian Federal University*, 1, 3-14.
2. Rusina, A., Mitrofanov, S., Arestova, A., & Terlyga N. (2018). Simulation model of cascaded HPPs in Pamir. In *Proc The 13 International forum on strategic technology (IFOST 2018)*. (pp. 889-892). IEEE. https://www.researchgate.net/publication/363103005_Simulation_Model_of_Cascaded_Hydro_Power_Plants_in_Pamir
3. McConnell, C., Brue, S., & Flynn, S. (2023). *Economics: principles, problems and politics* (21th ed.). McGraw Hill.
4. Gal'perin V. M. (1993). *Teoriya potrebitel'skogo povedeniya i sprosa* [Theory of consumer behavior and demand]. Ekonomicheskaya shkola. [In Russian]



5. Filippova, T. A., Misrihanov, M. Sh., Sidorkin, Yu. M., & Rusina, A. G. (2011). *Gidroenergetika* [Hydropower]. Izd-vo NGTU. [In Russian]
6. Garifi, K., Johnson, E. S., Arguello, B., & Pierre B. J. (2022). Transmission Grid Resiliency Investment Optimization Model with SOCP Recovery Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 37, 26-37. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3091538>
7. Yuan, W., Wang, J., Qiu, F., Chen, C., Kang, C., & Zeng, B. (2016). Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(6), 2817-2826. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2513048>
8. Aravena, I., Rajan, D., Patsakis, G., Oren, S. S., & Rios, J. (2019). *A scalable mixed-integer decomposition approach for optimal power system restoration*. Retrieved June 20, 2023, from <https://www.osti.gov/biblio/1642361>.
9. Skvortsova, O., Dashkina, A., Petrovskaya, E., Terleev, V., Nikonorov, A., Badenko, V., Volkova, Y., & Pavlov, S. (2016). The classification of accidental situations scenarios on hydropower plants. *MATEC Web of Conferences*, 53, 01014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165301014>
10. Török, G., Csík, M., Pintér, A., & Surján, A. (2000). Effects of different deuterium concentrations of the media on the bacterial growth and mutagenesis. *Egészségtudomány*, 44, 331-338.
11. Wang, Q., Wei, W., Gong, Y., Yu, Q., Li, Q., Sun, J., & Yuan, Z. (2017). Technologies for reducing sludge production in wastewater treatment plants: state of the art. *Science of the Total Environment*. 587-588, 510-521. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.203>
12. Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Miino, M. C., & Torretta, V. (2019). What Advanced Treatments Can Be Used to Minimize the Production of Sewage Sludge in WWTPs?. *Applied Sciences*, 9(13), 2650. <http://dx.doi.org/10.3390/app9132650>
13. Ivanova, E. V. (2019). Assessment of opportunity of placement the renewable energy sources on the territory of the Novosibirsk HPP. In *Proc Aspire to Science* (pp.87-91). NSTU.
14. Mitrofanov, S. V., Arestova, A. Y., Rusina, A. G., & Kalinin, A. E. (2019). Razrabotka imitacionnoj modeli raboty kaskada GES [Development of a simulation model for the operation of a HPP cascade]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 11(2), 116–126. [In Russian]
15. Mitrofanov, S. V., & Sekretarev, Y. A. (2016). Decision support system for hydro unit commitment. In *Proc 2 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*. (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911424>
16. Ghaderi, S. F., Azadeh, A., Nokhandan, B. P., & Fathi, E. (2012). Behavioral simulation and optimization of generation companies in electricity markets by fuzzy cognitive map. *Expert Systems with Applications*, 39, 4635–4646. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.097>
17. Gal'perin, V. M., Ignat'ev, S. M., & Morgunov, V. I. (1997). *Mikroekonomika* [Microeconomics]. Ekonomicheskaya shkola. [In Russian]
18. Sekretarev, Y. A., Myateg, T. V., & Gorshin, A. V. (2020). Justification of the water price at hydropower plants based on its operational features according to the maximization profit criteria. In *Proc International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon)*. (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271220>
19. Sekretarev, Y. A., Chekalina, T. V., Malosemov, B. V. (2011). Administration Functioning Power Generation Companies by Criterion of Maximization Profit. In *Proc Symposium of papers the 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2011)*. (Vol. 1, pp. 491-494). Harbin University of Science and Technology. <http://dx.doi.org/10.1109/IFOST.2011.6021070>



Сведения об авторах

Секретарев Юрий Анатольевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Систем электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет.

Мятеж Татьяна Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Систем электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет.

ORCID: [0000-0002-8312-9429](https://orcid.org/0000-0002-8312-9429)

E-mail: tatianamyateg@mail.ru

Безменов Степан Викторович – магистр кафедры «Систем электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет.

Authors about

Sekretarev Yuri Anatolyevich – Doctor of Engineering. in Science, Professor of the Department of Power Supply Systems for Enterprises, Novosibirsk State Technical University.

Myatezh Tatyana Vladimirovna – Ph. D. tech. Sci., Associate Professor, Department of Power Supply Systems for Enterprises, Novosibirsk State Technical University.

ORCID: [0000-0002-8312-9429](https://orcid.org/0000-0002-8312-9429)

E-mail: tatianamyateg@mail.ru

Bezmenov Stepan Viktorovich - Master of the Department of Power Supply Systems for Enterprises, Novosibirsk State Technical University.



ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

HEAT AND POWER ENGINEERING



ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОРМАЛИЗОВАННОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА В КОНКРЕТНЫХ УСЛОВИЯХ

Бирюков А.Б., Гнитиёв П.А.

ДонНТУ, г. Донецк

Аннотация

При сравнении к.п.д. брутто одинаковых агрегатов, работающих в разных условиях или одного и того же агрегата за различные периоды времени зачастую не учитывается, что эти значения получены в различных условиях. Общеизвестно, что к.п.д. котельного агрегата зависит от тепловой нагрузки котла. Как правило, значение к.п.д. максимально при умеренных нагрузках котельного агрегата и далее с ростом тепловой нагрузки плавно уменьшается по закону близкому к линейному. Таким образом, возможен случай, когда для агрегата, имеющего лучшее техническое состояние будет получено значение к.п.д., меньшее, чем у другого агрегата, работающего в более благоприятных условиях. Также существует неоднозначность при представлении зависимости к.п.д. котельного агрегата от тепловой нагрузки. В работе проведено исследование вопроса об особенностях использования нормализованной тепловой нагрузки для определения уровня энергоэффективности котельного агрегата на базе котла ТВГ-4р небольшой квартальной котельной. Показано, что особенностью использования приведенного к.п.д., определенного в зависимости от нормализованной тепловой нагрузки, является то, что этот показатель характеризует не только реальное техническое состояние котельного агрегата, но и эффективность его регулирования с учетом изменений температуры наружного воздуха.

Ключевые слова: котельный агрегат, к.п.д. нетто, к.п.д. брутто, тепловая нагрузка, приведенный к.п.д., энергоэффективность котла.

STUDY OF THE PECULIARITIES OF USING THE NORMALIZED THERMAL LOAD TO DETERMINE THE LEVEL OF ENERGY EFFICIENCY OF THE BOILER UNIT UNDER SPECIFIC CONDITIONS

Biryukov A.B., Gnitiev P.A.

Donetsk National Technical University, Donetsk

Abstract

When comparing the efficiency gross of the same units operating under different conditions, or the same unit for different periods of time, often does not take into account that these values are obtained under different conditions. It is well known that the efficiency of the boiler unit depends on the heat load of the boiler. As a rule, the value of efficiency maximum at moderate loads of the boiler unit and then with increasing heat load gradually decreases according to a law close to linear. Thus, it is possible that for a unit with a better technical condition, an efficiency value will be obtained that is lower than that of another unit operating in more favorable conditions. There is also ambiguity in the presentation of the efficiency dependence. boiler unit from heat load. The paper studies the issue of the features of using the normalized heat load to determine the level of energy efficiency of a boiler unit based on the TVG-4r boiler of a small quarterly boiler house. It is shown that a feature of using the reduced efficiency, which is determined depending on the normalized heat load, is that this indicator characterizes not only the actual technical condition of the boiler unit, but also the efficiency of its regulation, taking into account changes outside air temperature.

Keywords: boiler unit, efficiency net, efficiency gross, heat load, reduced efficiency, boiler energy efficiency.



Постановка проблемы

При сравнении эффективности котельных агрегатов, работающих в разных условиях или одного и того же агрегата за различные периоды времени зачастую не учитывается, что значения показателей эффективности получены в различных условиях [1-2]. Общеизвестно, что к.п.д. котельного агрегата (далее – КА) зависит от тепловой нагрузки котла. Таким образом, возможен случай, когда для агрегата, имеющего лучшее техническое состояние будет получено значение к.п.д., меньшее, чем у другого агрегата, работающего в более благоприятных условиях. Также существует неоднозначность при представлении зависимости к.п.д. КА от тепловой нагрузки [3]. Еще одним важным вопросом является тот факт, что на величину к.п.д. нетто влияет как совершенство использования вспомогательного оборудования, так и степень рациональности использования теплоты на собственные нужды.

Система централизованного теплоснабжения состоит из трех элементов: источник теплоты, тепловая сеть, потребители теплоты. Показатели эффективности каждого из элементов оказывают взаимное влияние друг на друга и определяют общую эффективность всей системы. Но для анализа энергоэффективности каждого из элементов необходимо объективно оценить степень совершенства процессов, протекающих именно в нем. Так, например, при ухудшении свойств теплоизоляции элементов тепловой сети увеличиваются теплопотери в прямой линии, что приводит к необходимости некоторого перегрева теплоносителя и понижается температура обратной воды, поступающей в КА [4-5]. Низкий уровень автоматизации процессов регулирования работы КА может привести к повышению инерционности процессов регулирования нагрузки. Все это приводит к повышению расхода топлива. Однако эти факторы сами по себе характеризуют снижение энергетической эффективности тепловой сети, но не дают информации о техническом состоянии КА. В связи с этим, существует необходимость создания методики, позволяющей провести анализ эффективности КА в реальных условиях эксплуатации.

Традиционно для оценки эффективности работы котельных агрегатов, в частности используемых в системе теплоснабжения, используются к.п.д. нетто и брутто [6]. Величина к.п.д. характеризует уровень энергоэффективности котельного агрегата. Паспортное значение к.п.д. КА позволяет оценить степень технического совершенства конструкции. Реальное значение к.п.д. агрегата отражает его текущее техническое состояние, степень рациональности технологических параметров эксплуатации и эффективности алгоритмов управления.

Для определения к.п.д. брутто и к.п.д. нетто КА используются следующие зависимости:

$$\eta_{\text{БРУТТО}} = \frac{Q_{\text{КА}}}{Q_{\text{ХТ}}} = \frac{Q_{\text{КА}}}{V_{\text{Т}} \cdot Q_{\text{НР}}} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{НЕТТО}} = \frac{Q_{\text{КА}} - Q_{\text{В.СН}}}{Q_{\text{ХТ}} + Q_{\text{Э}}} = \frac{Q_{\text{КА}} - Q_{\text{В.СН}}}{V_{\text{Т}} \cdot Q_{\text{НР}} + Q_{\text{Э}}} \quad (2)$$

где $Q_{\text{КА}}$ – тепловая мощность, передаваемая теплоносителю (воде) в котельном агрегате, Вт; $Q_{\text{ХТ}}$ – тепловая мощность, выделяющаяся в котельном агрегате при полном сжигании подаваемого топлива, Вт; $V_{\text{Т}}$ – расход топлива (газообразного), м³/с; $Q_{\text{НР}}$ – теплота сгорания топлива, Дж/м³; $Q_{\text{В.СН}}$ – тепловая мощность, расходуемая на собственные нужды котельной, Вт; $Q_{\text{Э}}$ – электрическая мощность, расходуемая на обеспечение работы котельного агрегата, Вт.

Определенные значения к.п.д. используются для оценки уровня энергоэффективности процесса выработки теплоты:



– к.п.д. брутто характеризует уровень технического совершенства и реальное состояние КА;

– к.п.д. нетто дополнительно к эффективности КА учитывает уровень энергоэффективности вспомогательного электрооборудования, задействованного в процессе подготовки и нагрева теплоносителя в КА, а также степень рациональности расходования теплоты на собственные нужды котельной.

При определении к.п.д. брутто (далее – η) и к.п.д. нетто в качестве $Q_{КА}$ используется значение, определенное как:

$$Q_{КА} = G \cdot c_v \cdot \Delta t \quad (3)$$

где G_v – расход воды, циркулирующий через котельный агрегат, кг/с; c_v – теплоемкость воды, Дж/(кг·К); Δt – повышение температуры теплоносителя в КА, °С.

Для большого количества котельных отсутствует возможность постоянной фиксации показаний теплового счетчика. В этом случае при определении величин к.п.д. в качестве полезной тепловой нагрузки котла приходится использовать не комплекс $G \cdot c \cdot \Delta t$, а значение нормализованной нагрузки (соответствующей температуре наружного воздуха и температурному графику).

Цель исследования

Целью данной работы является исследование вопроса об особенностях использования нормализованной тепловой нагрузки для определения уровня энергоэффективности КА в конкретных условиях.

Основной материал исследования

Значение к.п.д. определенное с использованием нормализованной тепловой нагрузки вместо реальной ($G \cdot c \cdot \Delta t$) предложено назвать приведенным к.п.д. КА (η_n).

Исследование проведено на базе котельного агрегата ТВГ-4р небольшой квартальной котельной (постоянно в работе находится один котел). Основные технические характеристики котельного агрегата представлены в табл. 1, температурный график представлен на рис. 1. Регулирование нагрузки котельного агрегата ТВГ-4р происходит с помощью изменения подачи газа на горелки, либо изменением числа работающих горелок.

Таблица 1

Основные технические характеристики котла ТВГ-4р

Показатель	Значение
Теплопроизводительность, МВт	4,3
Температура воды на входе/выходе, °С	70/150
Давление воды, МПа	1,4
Расчетное топливо	Газ
КПД	0,91

В табл. 2 представлены данные по фактическому потреблению газа КА за период с 01.12.2019 по 29.02.2020, суточные температуры наружного воздуха за исследуемые период, а также тепловая нагрузка КА, определенная согласно (3), температурного графика (рис. 1) и фактических температур наружного воздуха. Далее в табл. 2 представлены расчетные значения потребления природного газа согласно (1) и нормативных технических характеристик КА, а также значения приведенного КПД. Именно значение приведенного КПД котла будет использовано для построения линии эффективности.



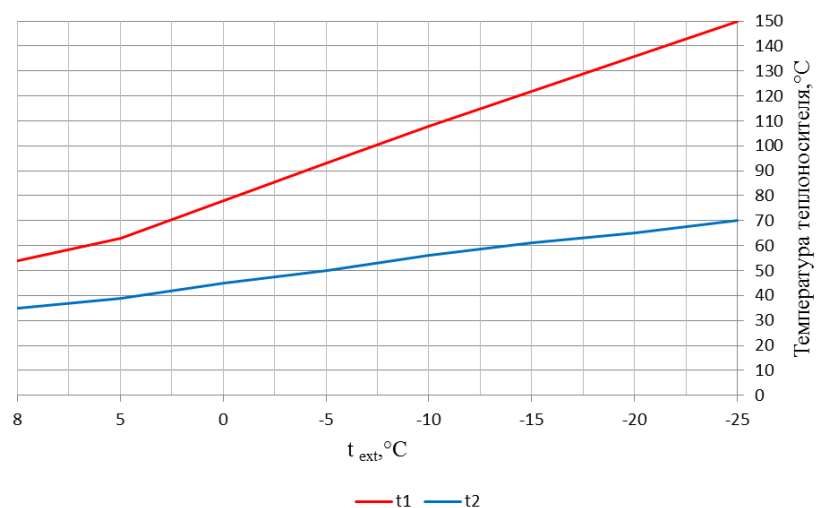


Рис. 1. Температурный график

На рис. 2 показано изменение температуры наружного воздуха за исследуемый период [7]. На рис. 3 и 4, соответственно, показано изменение фактического и нормализованного расхода газа и приведенного/нормативного η .

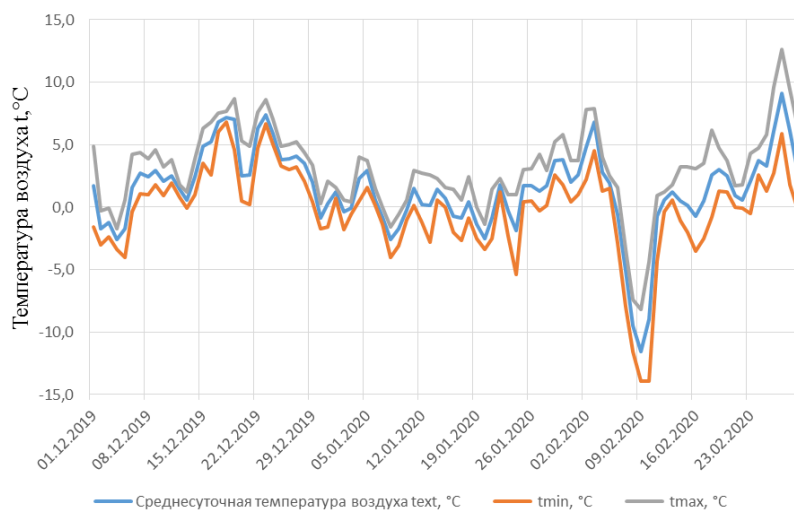


Рис. 2. Температуры наружного воздуха за исследуемый период

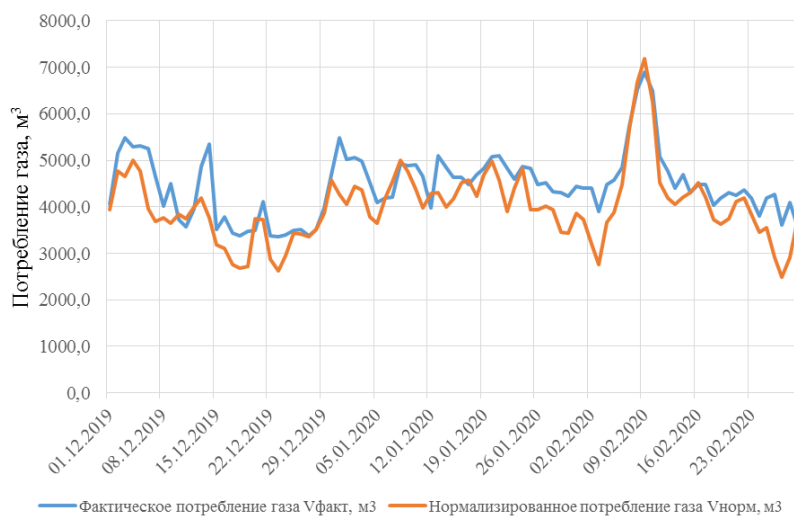


Рис. 3. Потребление газа за исследуемый период



Таблица 2

Фактические и нормализованные параметры работы котельного агрегата

Дата	Фактическое потребление газа $V_{\text{факт}}$, м ³	Температура воздуха t_{ext} , °C	t_{min} , °C	t_{max} , °C	Температура теплоносителя (подача) $t_{\text{под}}$, °C	Температура теплоносителя (обратка) $t_{\text{обр}}$, °C	Нормализованная суточная нагрузка $Q_{\text{норм}}$, °C	Нормализованное потребление газа $V_{\text{норм}}$, м ³	Приведенный КПД, $\eta_{\text{п}}$
01.12.2019	4052,7	1,7	-1,6	4,9	73,2	43,1	126908,8	3928,5	0,83
02.12.2019	5148,2	-1,7	-3,0	-0,3	83,4	46,8	154211,9	4773,6	0,77
03.12.2019	5487,8	-1,2	-2,4	-0,1	81,9	46,3	149998,5	4643,2	0,79
04.12.2019	5291,8	-2,6	-3,4	-1,7	86,1	47,7	161796,1	5008,4	0,86
05.12.2019	5305,0	-1,7	-4,0	0,6	83,4	46,8	154211,9	4773,6	0,82
06.12.2019	5246,4	1,6	-0,4	4,2	73,5	43,2	127667,2	3951,9	0,69
07.12.2019	4643,1	2,7	1,1	4,4	70,2	41,9	119324,6	3693,7	0,82
08.12.2019	4015,5	2,4	1,0	3,9	71,1	42,2	121599,9	3764,1	0,74
09.12.2019	4489,2	2,9	1,8	4,6	69,6	41,6	117807,8	3646,7	0,88
10.12.2019	3722,8	2,1	0,9	3,2	72,0	42,6	123875,1	3834,5	0,94
...									
21.02.2020	4241,1	0,9	0,0	1,7	75,6	44,0	132976,2	4116,3	0,87
22.02.2020	4359,2	0,6	-0,1	1,8	76,5	44,4	135251,4	4186,7	0,89
23.02.2020	4194,4	2,1	-0,5	4,3	72,0	42,6	123875,1	3834,5	0,97
24.02.2020	3804,4	3,7	2,6	4,7	67,2	40,7	111740,4	3458,9	0,71
25.02.2020	4193,8	3,3	1,3	5,8	68,4	41,2	114774,1	3552,8	0,75
26.02.2020	4262,2	6,1	2,7	9,6	60,0	37,7	94100,2	2912,9	0,66
27.02.2020	3608,3	9,1	5,9	12,6	54,0	35,0	80055,4	2478,1	0,63
28.02.2020	4086,7	6,1	1,8	9,4	60,0	37,7	94100,2	2912,9	0,64
29.02.2020	3601,0	2,8	-0,2	6,4	69,9	41,8	118566,2	3670,2	0,87
Средний приведенный КПД котла за исследуемый период, η									
									0,82



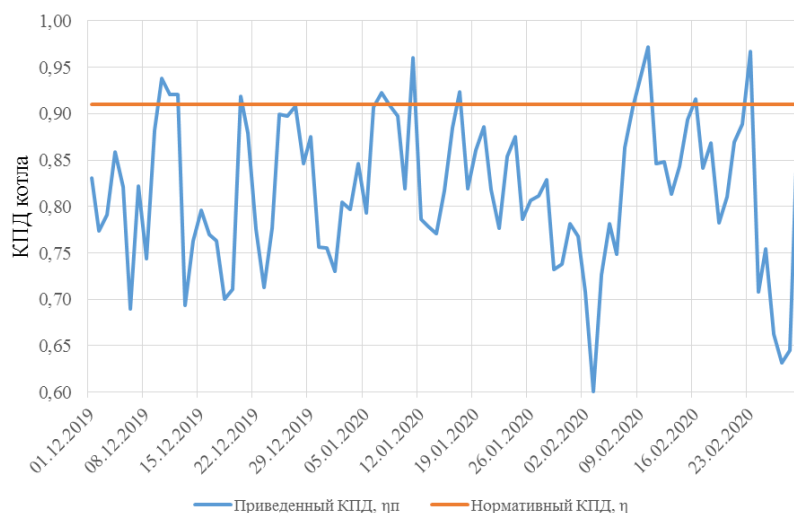


Рис. 4. Изменение η за исследуемый период

На рис. 5 одновременно показано изменение среднесуточной температуры воздуха и приведенного КПД котельного агрегата. На рис. 6 показана линия эффективности рассматриваемого котла ТВГ-4р как зависимость приведенного КПД котельного агрегата от доли нагрузки.

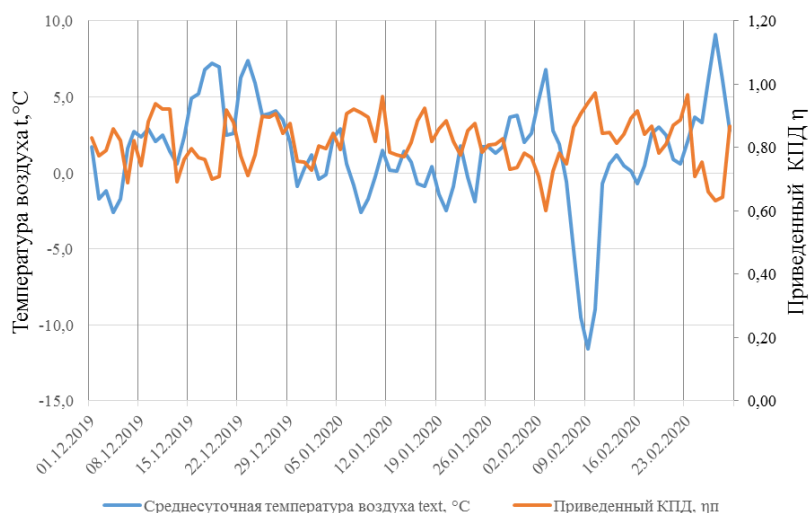


Рис. 5. Изменение приведенного η_p и наружной температуры воздуха

Анализ полученных данных и графических зависимостей говорит о существенных нарушениях в работе исследуемого котельного агрегата и снижении его фактической энергоэффективности. Данные табл. 2 и рис. 3 и 4 говорят о том, что за весь исследуемый период фактическое потребление газа превышает расчетное базовое нормализованное потребление. Приведенный КПД существенно ниже нормативного. Данные табл. 2 и рис. 5 позволяют говорить о некоторых причинах низкой эффективности котельного агрегата. В частности, графические зависимости приведенного КПД и среднесуточной температуры воздуха показывают, что в периоды перепадов температуры воздуха (как плавных, так и резких) происходят существенные изменения эффективности работы котельного агрегата. Рис. 6 отображает линию эффективности котельного агрегата как зависимость приведенного КПД от доли нагрузки и показывает, что несмотря на нестабильность эффективности работы КА, существует зависимость приведенного КПД от нагрузки.



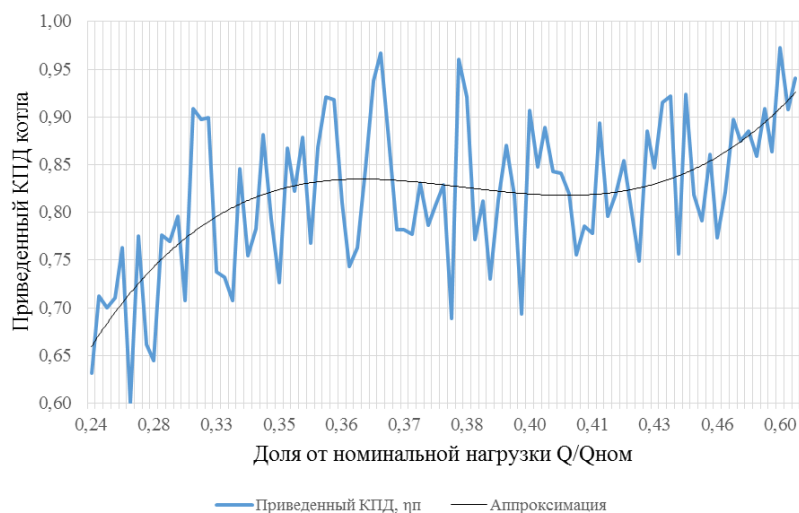


Рис. 6. Линия эффективности котельного агрегата

Таким образом, можно выделить следующие возможные причины низкой эффективности КА:

- низкая эффективность и инерционность регулирования тепловой нагрузки котельного агрегата, что возможно из-за низкого уровня автоматизации процессов работы КА;
- ухудшение параметров горения топлива в периоды с положительными температурами наружного воздуха и низкой нагрузкой КА;
- низкая эффективность процессов нагрева теплоносителя, что возможно из-за неудовлетворительного состояния топочных экранов и проточной части трубной системы.

Особенностью использования приведенного к.п.д., определенного в зависимости от нормализованной тепловой нагрузки, является то, что этот показатель характеризует не только реальное техническое состояние КА, но и эффективность его регулирования с учетом изменений температуры наружного воздуха. В ряде случаев это может затруднять восприятие информации. Так, например, на рис. 4 в течение недели видим превышение приведенного к.п.д. над паспортным значением, что сложно объяснить, исходя из общего пониженного уровня к.п.д. Анализ этой информации совместно с данными об изменении температуры наружного позволяет пояснить эту неожиданную закономерность: при понижении температуры наружного воздуха имело место недорегулирование КА, т.е. температура выдаваемого в прямую линию теплоносителя не соответствовала температурному графику (имела более низкое значение), в то время как для определения к.п.д. использовалось нормализованное значение.

Несмотря на это, сравнение приведенного к.п.д. с нормативным значением дает представление об уровне энергоэффективности КА.

В то же время очевидно, что при эффективном погодном регулировании отличие между приведенным и реальным к.п.д. может быть незначительным.

Выводы

В работе проведено исследование вопроса об особенностях использования нормализованной тепловой нагрузки для определения уровня энергоэффективности КА в конкретных условиях. Показано, что Особенностью использования приведенного к.п.д., определенного в зависимости от нормализованной тепловой нагрузки, является то, что этот показатель характеризует не только реальное техническое состояние КА, но и эффективность его регулирования с учетом изменений температуры наружного возду-



ха. Однако сравнение приведенного к.п.д. с нормативным значением дает представление об уровне энергоэффективности КА и при эффективном погодном регулировании отличие между приведенным и реальным к.п.д. может быть незначительным.

Информация о финансировании

Данная работа выполнена в рамках научной темы «Повышение энергоэффективности выработки, транспортировки и потребления тепловой энергии» код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией): FRRF-2023-0003 регистрационный номер: 1023031000013-2-2.2.3.

Библиографический список

1. Буланин В. А. Алгоритм анализа энергоэффективности источника теплоснабжения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 54-62. EDN: [VZACTJ](#). DOI: [10.34031/article_5da452a45dbf30.07663447](#)
2. Четвериков Д.С. Оптимизация работы котельного оборудования // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова 30 апреля 2021 года. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. С. 4299-4303. EDN: [LPXMWT](#)
3. Житаренко В.М. Диаграммы оптимального распределения нагрузок между котлами ТЭЦ // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2014. № 28. С. 118-123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vpdy_2014_28_19
4. Варламов В.А. Теплоизоляционные материалы для тепловых трасс в России // Символ науки. 2017. Том 2, № 1, С. 54-56. EDN: [YGWNXL](#)
5. Влияние изменения теплопроводности теплоизоляционных материалов на тепловые потери магистральных трубопроводов / Т.Н. Немова, Ю.А. Лежнева, Н.А. Цветков, Е.Г. Алексеева // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 5 (58). С. 151-160. EDN: [WVPYGB](#)
6. Ибрагимов Е.С., Гальтяев Е.В. Повышение эффективности и надежности работы котлов электростанций // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2019. Том 19, № 2. С. 31-38. EDN: [GHPGUZ](#). DOI: [10.14529/power190204](#)
7. Донецк. История погоды. [Сайт]: Meteostat. URL: <https://meteostat.net/ru/place/ua/donetsk?s=34519&t=2019-10-15/2020-04-15> (дата обращения: 19.06.2023).

Библиографический список

1. Bulanin, V. A. (2019). Algorithm analiza energoeffektivnosti istochnika teplosnabzheniya [Algorithm for analyzing the energy efficiency of a heat supply source]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*, 9, 54-62. https://doi.org/10.34031/article_5da452a45dbf30.07663447 [In Russian]
2. Chetverikov, D. S. (2021). Optimizaciya raboty kotel'nogo oborudovaniya [Optimization of the operation of boiler equipment] In *Proc. of the "International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU. V.G. Shukhova"* (pp. 4299-4303). BSTU named after V.G. Shukhov. <https://www.elibrary.ru/lpxmwt> [In Russian]
3. Zhitarenko, V. M. (2014). Diagrammy optimal'nogo raspredeleniya nagruzok mezhdru kotlami TEC [Diagrams of the optimal distribution of loads between the boilers of the thermal power plant]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 28, 118-123. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vpdy_2014_28_19 [In Russian]
4. Varlamov, V. A. (2017). Teploizolyacionnye materialy dlya teplovyh trass v Rossii [Heat-insulating materials for thermal routes in Russia]. *Symbol of Science*, 2(1), 54-56. <https://os-russia.com/SBORNIKI/SN-2017-02-1.pdf> [In Russian]
5. Nemova, T. N., Lezhneva, Yu. A., Tsvetkov, N. A., & Alekseeva, E.G. (2016). Vliyanie izmeneniya teploprovodnosti teploizolyacionnyh materialov na teplovye poteri magistral'nyh truboprovodov [Influence of changes in the thermal conductivity of heat-insulating materials on the heat losses



- of main pipelines]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 5(58), 151-160. <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/231> [In Russian]
6. Ibragimov, E. S., & Galtayev, E. V. (2019). Povyshenie effektivnosti i nadezhnosti raboty kotlov elektrostancij [Improving the efficiency and reliability of power plant boilers]. *Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 19(2), 31-38. <https://vestnik.susu.ru/power/article/view/8959> [In Russian]
7. Meteostat (n.d.). *Donetsk Istoriya pogody. Meteostat* [Donetsk Weather history. Meteostat]. Retrieved June 19, 2023 from <https://meteostat.net/ru/place/ua/donetsk?s=34519&t=2019-10-15/2020-04-15>. [In Russian]

Сведения об авторах

Бирюков Алексей Борисович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», проректор, заведующий кафедрой технической теплофизики, birukov.ttf@gmail.com, ORCID [0000-0002-8146-2017](https://orcid.org/0000-0002-8146-2017).

Гнитиёв Павел Александрович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», доцент кафедры технической теплофизики, gnitiev.pavel@gmail.com, ORCID [0000-0001-9266-7969](https://orcid.org/0000-0001-9266-7969).

Authors about

Alexey Borisovich Biryukov, Dr. of Tech. Sciences, Professor, Donetsk National Technical University, Vice-Rector, Head of the Department of Technical Thermal Physics, birukov.ttf@gmail.com, ORCID [0000-0002-8146-2017](https://orcid.org/0000-0002-8146-2017).

Pavel Aleksandrovich Gnitiev, Cand. of Tech. Sciences, Associate Professor, Donetsk National Technical University, Associate Professor of the Department of Technical Thermal Physics, gnitiev.pavel@gmail.com, ORCID [0000-0001-9266-7969](https://orcid.org/0000-0001-9266-7969).



ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПО ИСКУССТВЕННЫМ ДАННЫМ

Дерябин Г.А., Панкрашин С.М., Блинов В.Л.

УрФУ им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Аннотация

Постоянный мониторинг технического состояния газотурбинных установок, выявление дефектов, предотвращение отказов и оптимизация процессов эксплуатации, обслуживания и ремонта являются актуальными задачами для эксплуатантов данного оборудования. В решении этих задач могут помочь различные методы машинного обучения, которые уже применяются в сфере газотурбинных установок. Ограничивающим фактором в этом выступает недостаток реальных данных из эксплуатации. В данной работе рассматривается возможность использования искусственных данных для обучения и тестирования моделей машинного обучения с целью определения уровня технического состояния газотурбинной установки. Для анализа был выбран открытый набор данных, созданный другими исследователями при помощи математической модели судового газотурбинного двигателя. В результате исследования приведены полученные значения точности моделей машинного обучения, оцененные различными способами. Наилучший результат показала модель случайного леса. Установлено, что при разработке решений на основе машинного обучения для решения инженерных задач требуется использование дополнительных способов оценки точности предсказаний. Развитие работы связано с разработкой собственной математической модели газотурбинной установки, способной учитывать влияние конкретных дефектов, для создания наборов данных для анализа и дальнейшего исследования.

Ключевые слова: газотурбинная установка, техническое состояние, машинное обучение, случайный лес, прогнозирование, предиктивное обслуживание

EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF A GAS TURBINE PLANT USING MACHINE LEARNING METHODS FROM ARTIFICIAL DATA ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF A GAS TURBINE USING MACHINE LEARNING METHODS WITH ARTIFICIAL DATA

Gleb Deryabin, Svyatoslav Pankrashin, Vitalii Blinov

Ural Federal University named after B.N. Yeltsin, Ekaterinburg

Abstract

Continuous monitoring of the technical condition of gas turbines, defect identification, failure prevention, and optimization of operation, maintenance, and repair processes are relevant tasks for the operators of this equipment. Various machine learning methods that are already being used in the field of gas turbines can help solve these tasks. The limiting factor in this regard is the lack of real operational data. This study examines the possibility of using synthetic data for training and testing machine learning models to determine the level of technical condition of a gas turbine installation. An open dataset created by other researchers using a mathematical model of a marine gas turbine engine was selected for analysis. The research presents the accuracy values obtained by different methods of evaluating machine learning models. The random forest model demonstrated the best results. It was found that when developing machine learning-based solutions for engineer-



ing tasks, additional methods for assessing the accuracy of predictions are required. The further development of this work is associated with the development of a proprietary mathematical model of a gas turbine installation capable of considering the influence of specific defects to create datasets for analysis and further research.

Keywords: *gas turbine, technical condition, machine learning, random forest, forecasting, predictive maintenance*

Введение

Газотурбинные установки (ГТУ) давно признаны высокоэффективной и универсальной технологией преобразования энергии, предлагающей ряд преимуществ, таких как быстрый запуск, высокая удельная мощность и эксплуатационная гибкость. Вследствие своих преимуществ ГТУ играют ключевую роль в различных отраслях промышленности, включая производство электроэнергии, авиацию и нефтегазовую промышленность. Повышение их эффективности, надежности и срока службы имеет первостепенное значение для удовлетворения потребностей в энергии и приводе при одновременном снижении воздействия на окружающую среду.

Однако оптимизация работы газовых турбин в условиях эксплуатации и в режиме реального времени, управление техническим состоянием и обнаружение аномалий с предупреждением отказов остаются серьезными проблемами. Техническое состояние газотурбинных установок играет важную роль в обеспечении надежности и безопасности производственной деятельности [1]. Традиционно, подобный анализ проводится с использованием классических уравнений и зависимостей, которые определяют соответствующие взаимосвязи между параметрами. Однако, такой подход имеет свои ограничения и не охватывает все нюансы взаимосвязей между параметрами. Традиционные уравнения и зависимости, используемые в мониторинге технического состояния ГТУ, часто имеют ограничения и основаны на предположениях. Например, они могут не учитывать некоторые факторы, которые могут повлиять на работу системы, или быть недостаточно точными при анализе сложной нелинейной динамики ГТУ.

Развитие методов машинного обучения произвело революцию в различных областях распознавания изображений, обработке естественного языка и автономных транспортных средств [2]. Признавая их потенциал, исследователи и инженеры все чаще обращаются к методам машинного обучения, чтобы преодолеть ограничения традиционных подходов в области газовых турбин [3, 4]. Используя способность машинного обучения учиться на данных, эксплуатация ГТУ может быть улучшена за счет моделирования на основе данных, обнаружения аномалий, диагностики неисправностей и прогнозирования. Как следствие, повысится качество обслуживания, а также сократятся затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Исследователи уже рассматривают применение методов машинного обучения для улучшения процессов эксплуатации ГТУ. Так, в статье [5] авторы решали задачу улучшения условно-обслуживающего ремонта (UCM) на силовых установках морских судов с помощью методов машинного обучения. Для анализа состояния и прогнозирования отказов использовались данные, собранные несколько лет эксплуатации, включающие параметры технического состояния систем, информацию о проблемах, которые были замечены, а также данные о воздействии на оборудование. Авторы использовали модель решающих деревьев для определения факторов, приводящих к отказам и для прогнозирования вероятности отказа. При помощи этих моделей достигнута точность предсказания на уровне 95%. Выводы авторов заключаются в том, что применение методов машинного обучения для анализа и прогнозирования отказов является эффективным инструментом: эти методы могут помочь определить взаимосвязи между фак-



торами, приводящими к отказам, и прогнозировать возможные проблемы, что в свою очередь позволит более эффективно использовать ресурсы и временные затраты на условно-обслуживающий ремонт судов.

В статье [6] авторы решали задачу прогнозирования эффективности работы газовой турбины при различных режимах эксплуатации с помощью нейронных сетей. Для решения задачи использовались данные, полученные в ходе экспериментов на газовой турбине, включающие в себя параметры рабочего тела, воздуха, температуру и влажность. Авторы применили нейронные сети для прогнозирования показателей эффективности газовой турбины, а также использовали доверительные интервалы для оценки точности прогноза. При помощи моделей была достигнута точность предсказания на уровне 95%. Выводы авторов заключаются в том, что использование интервалов доверия вместе с нейронными сетями позволяет достичь более точных прогнозов эффективности работы газовых турбин. Статья подчеркивает значимость применения нейронных сетей и доверительных интервалов при прогнозировании эффективности работы газовых турбин, и демонстрирует их применение на практике для достижения высокой точности прогнозов при различных режимах эксплуатации турбины.

В статье [7] авторы решали задачу разработки моделей прогнозирования выбросов оксидов углерода и азота газовых турбин на основе генетических алгоритмов. В качестве исходных данных авторы использовали информацию о параметрах работы газовых турбин, включая частоту вращения и температуру рабочего тела. Для анализа выбросов использовались данные мониторинга окружающей среды, включая состав воздуха и выбранные уровни выбросов. Авторы использовали генетические алгоритмы для разработки моделей прогнозирования выбросов оксидов углерода и азота, основываясь на данных о работе газовой турбины. При помощи этих моделей достигнута точность предсказания на уровне 85%. Авторы читают, что создали важный инструмент для сокращения загрязнения окружающей среды и соблюдения нормативов. Также авторы представили методику, которая может быть применена для анализа и оптимизации работы газовых турбин с целью уменьшения их воздействия на окружающую среду.

В статье [8] авторы решали задачу использования машинного обучения для прогнозирования эффективного КПД газовой турбины при проектировании ее тепловой схемы. Для решения задачи были использованы данные о геометрических и термодинамических параметрах газовых турбин различных типов и мощностей. Были также учтены данные о топливе и параметрах внешней среды, как температура воздуха и давление. Авторы применили различные методы машинного обучения, такие как регрессионный анализ, метод опорных векторов (SVM), нейронные сети и генетические алгоритмы, для создания модели прогнозирования эффективного КПД газовой турбины. В результате достигнута точность на уровне 97%. Выводы авторов заключаются в том, что применение машинного обучения при проектировании тепловой схемы газовой турбины позволяет существенно повысить эффективность и точность ее работы, а также сокращает время и затраты на проектирование.

Таким образом, применение методов машинного обучения в решении задач оценки мощности и диагностики газотурбинных двигателей является важным предметом для изучения исследователями и инженерами.

Однако одной из серьезных проблем, возникающих при применении методов машинного обучения к ГТУ, является нехватка подходящих данных. Качественные данные — это жизненная сила алгоритмов машинного обучения. В случае с газовыми турбинами модели машинного обучения требуют исчерпывающих и репрезентативных наборов данных для точного отражения различных условий эксплуатации, динамики системы и рабочих характеристик. Такие данные бесценны для разработки моделей,



которые могут оптимизировать работу турбин, прогнозировать отказы и улучшать стратегии технического обслуживания. Несколько факторов способствуют отсутствию достаточных данных для машинного обучения в газовых турбинах:

1. Ограниченный доступ к эксплуатационным данным. Операторы ГТУ часто придерживаются строгой политики конфиденциальности, что не позволяет исследователям и специалистам по машинному обучению получать доступ к операционным данным, необходимым для разработки моделей.

2. Стоимость и сложность сбора данных. Сбор высококачественных данных из газотурбинных систем может быть ресурсоемкой задачей. Система сбора данных может потребовать установку дополнительных датчиков, инфраструктуры регистрации данных и приобретение специализированного оборудования.

3. Разреженные данные об отказах. Отказы ГТУ происходят относительно редко, что затрудняет получение достаточного количества случаев отказа для надежного обучения модели машинного обучения. Нехватка данных об отказах ограничивает возможность разработки точных прогностических моделей для обнаружения и прогнозирования отказов.

Одним из способов решения проблемы нехватки данных является генерация искусственных данных [9, 10]. В ситуациях, когда реальные рабочие данные ограничены, можно использовать методы генерации искусственных данных. Эти методы включают создание искусственных данных, имитирующих реальные условия работы, что позволяет обучать модели машинного обучения на более крупном и разнообразном наборе данных.

Цель данной работы – исследовать применимость методов машинного обучения для определения технического состояния ГТУ при работе с искусственным набором данных. В работе будут рассмотрены различные методы машинного обучения. Для достижения цели работы необходимо решить ряд промежуточных задач:

1. Поиск и описание исходных данных для анализа;
2. Выбор методов машинного обучения;
3. Создание моделей для предсказания технического состояния в ГТУ;
4. Оценка эффективности созданных моделей и их сравнение.

Решение этих задач позволят принять решение о том, какие методы наилучшим образом подходят для поставленной цели задачи и какие модели машинного обучения наиболее эффективны в предсказании технического состояния в ГТУ по синтетическим данным.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран газотурбинный двигатель General Electric LM2500 (рис. 1). LM2500 – двухвальная газовая турбина, разработана на базе авиационных двигателей GE TF39 и CF6-6. LM2500 – самая «опытная» высокоэффективная газовая турбина в классе мощности от 22 до 33 МВт. ГТУ имеет мощность до 40 МВт и может использоваться в различных сферах, включая энергетику, морскую промышленность, нефтегазовую отрасль и т.д. В основном применяется в качестве судового газотурбинного двигателя.

Выбор данной ГТУ обусловлен решением задачи по поиску исходных данных. Как было сказано во введении, в области газотурбинного оборудования наблюдается недостаток открытых наборов данных для исследования. В процессе поиска обнаружена работа исследователей, которые использовали математическую модель данной ГТУ для создания набора данных, характеризующих ее работу на разных режимах, условиях и техническом состоянии [11]. Авторы разместили созданный набор данных в открытом доступе, и его используют другие исследователи. При выборе модели и данных для



анализа учитывались их актуальность, достоверность и полнота, а также возможность их использования для достижения поставленной цели.

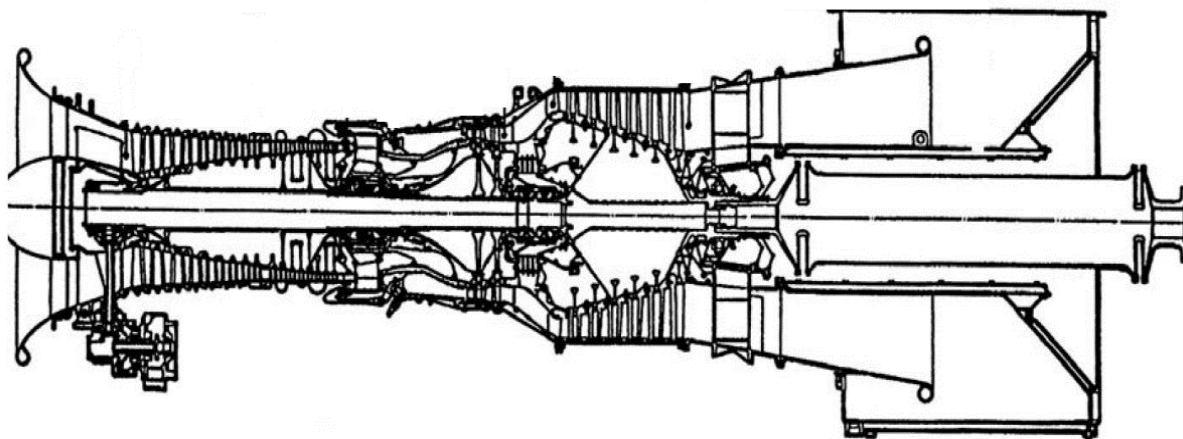


Рис. 1. Продольный разрез ГТУ GE LM2500

Математическая модель ГТУ LM2500+ DLE, использовавшаяся для создания дата-сета, была получена на основе анализа компонентов турбины, их взаимодействия и вариантов конструкции. Для создания модели использовались уравнения термодинамики, механики и гидродинамики. Кроме того, проводился анализ экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний турбины, что позволило уточнить и улучшить модель. Основные переменные, которые характеризуют модель, включают следующие:

- Расход воздуха;
- Давление на входе и выходе из камеры сгорания;
- Температура на входе и выходе из камеры сгорания;
- Скорость вращения ротора;
- Степень сжатия в ОК;
- Степень расширения в ГТ;
- Угол поворота лопаток компрессора и турбины;
- Расход топлива;
- Состав газов на входе и выходе из камеры сгорания;
- Эффективность работы турбины.

Эти переменные взаимодействуют друг с другом в рамках системы уравнений, которая описывает работу турбины. Модель разработана в среде MATLAB/Simulink и имеет модульную структуру. Каждый модуль относится к узлу ГТУ. Каждый из блоков содержит уравнения, описывающие динамику работы компонента, а также параметры, которые могут быть настроены для симуляции различных условий эксплуатации.

Для верификации математической модели газовой турбины LM2500+ DLE проводились испытания реальной ГТУ LM2500+ DLE в различных режимах работы. В ходе экспериментов были замерены различные параметры, которые затем сравнивались с результатами, полученными с помощью математической модели. Были проведены как стандартные испытания, так и эксперименты в экстремальных условиях, например, при изменении состава газов на входе и выходе из камеры сгорания, при изменении режимов работы турбины и т.д.

Сравнение результатов экспериментов с результатами, полученными с помощью математической модели, показало, что модель достаточно точно описывает работу газовой турбины LM2500+ DLE в различных условиях. Однако, в случае некоторых экс-

тремальных условий, различия между результатами экспериментов и результатами, полученными с помощью модели, могут наблюдаться, в связи с трудностями точного учета всех факторов, влияющих на работу турбины. При расчетных режимах работы газовой турбины погрешности имитатора составляют менее 0,8%, за исключением температур, прогнозируемых с погрешностями менее 2,0%. Что касается условий внепроектной нагрузки, то ошибки прогнозирования имитатора всегда составляют менее 5,0% во всем диапазоне условий эксплуатации.

Для моделирования технического состояния ГТУ в модель были введены два коэффициента деградации $K_{ГТ}$ и $K_{ОК}$, характеризующих техническое состояние газовой турбины и осевого компрессора. Оба коэффициента деградации выражаются в процентах и являются функцией, зависящей от наработки, мощности, температуры и других факторов, влияющих на работу турбины. Коэффициенты используются для определения снижения производительности ГТУ, которое происходит со временем, и для решения о проведении регулярного технического обслуживания и ремонта, чтобы увеличить срок ее эксплуатации и сохранить максимальное качество работы.

Чтобы их обозначить, для каждой зависимой функции нужно провести линию тренда, изменение наклона которой и будет указывать на ухудшение технического состояния. Критерий деградации введен для определения состояния ГТУ и анализа данных, полученных от модели и позволяющих связать параметры установки с ее состоянием. Коэффициент деградации компрессора описывает снижение степени сжатия в течение работы. Коэффициент деградации турбины описывает коэффициент снижения расхода газа за время работы. Введенные коэффициенты рассчитываются следующим образом:

$$K_{ГТ} = 1 - \frac{G_0 - G_1}{G_0},$$

где G_0 – расход продуктов сгорания через турбину расчетный, G_1 – расход через турбину в текущем техническом состоянии;

$$K_{ОК} = 1 - \frac{\Delta K_{y0} - \Delta K_{y1}}{\Delta K_{y0}},$$

где ΔK_y – коэффициент запаса устойчивой работы компрессора, рассчитывается по формуле

$$\Delta K_y = 100 \cdot \left(\frac{\pi_{к.г.}/G_{в.пр.г.}}{\pi_{к.г.}/G_{в.пр.р.}} - 1 \right),$$

где, в свою очередь, $\pi_{к.г.}$ – степень сжатия в компрессоре, граничное значение, $G_{в.пр.г.}$ – приведенный расход воздуха, граничное значение, $G_{в.пр.р.}$ – приведенный расход воздуха, расчетное значение.

При помощи модели ГТУ исследователями [5] создан набор данных, характеризующий работу ГТУ в разных условиях. Параметры, содержащиеся в наборе данных представлены в таблице 1. Набор данных состоит из 11 934 образцов, где: 459 образцов связаны исключительно со снижением технического состояния компрессора без деградации турбины, 234 образца связаны исключительно со снижением технического состояния турбины, а остальные образцы представляют собой комбинацию деградации как компрессора, так и турбины. В данной работе рассматривается весь набор данных с целью предсказания деградации системы независимо от того, вызвано ли оно деградацией компрессора, турбины или обоими факторами.

Ниже описаны модели машинного обучения, которые исследовались в данной работе.

Таблица 1



Описание набора данных

№	Название параметра	Единицы измерения	Диапазон значений
1	Положение рычага		1,138 - 9,300
2	Скорость корабля	узлы	3,0 - 27,0
3	Крутящий момент вала турбины	кН м	253,547 - 72784,872
4	Число оборотов турбины	Об/мин	1307,675 - 3560,741
5	Скорость оборотов газового генератора	Об/мин	6589,002 - 9797,103
6	Крутящий момент правого винта	кН	5,304 - 645,249
7	Крутящий момент левого винта	кН	5,304 - 645,249
8	Температура на выходе из турбины высокого давления	°С	442,364 - 1115,797
9	Температура воздуха на входе в компрессор	°С	288,0
10	Температура воздуха на выходе из компрессора	°С	540,442 - 789,094
11	Давления на выходе из турбины высокого давления	бар	1,093 - 4,560
12	Давление воздуха на входе в ОК	бар	0,998 - 0,998
13	Давление воздуха на выходе из ОК	бар	5,828 - 23,140
14	Давление выхлопных газов турбины	бар	1,019 - 1,052
15	Управление впрыском в турбину	%	0,000 - 92,556
16	Расход топлива	кг/с	0,068 - 1,832
17	Коэффициент деградации компрессора	-	0,95 - 1,00
18	Коэффициент деградации турбины	-	0,975 - 1,000

Случайный лес (рис. 2). Этот метод является набором из нескольких деревьев решений, каждое из которых обучается на случайном подмножестве выборки признаков. Принцип разделения наборов данных по ветвям — это один из основных принципов построения деревьев решений в машинном обучении. Суть принципа заключается в том, что каждый узел дерева представляет собой некоторый набор данных, который разделяется на две (или более) подгруппы на основе значения одного из признаков. Разделение наборов данных по ветвям продолжается до тех пор, пока не будет достигнут критерий остановки (например, достигнуто максимальное число уровней дерева или минимальное число объектов в узле). Принцип разделения наборов данных по ветвям является эффективным способом обучения моделей, так как позволяет строить простые и интерпретируемые модели, которые могут использоваться для анализа данных и принятия решений. Однако, деревья решений имеют свои недостатки, такие как склонность к переобучению и неустойчивость к изменениям в данных. Могут использоваться для решения задач регрессии.

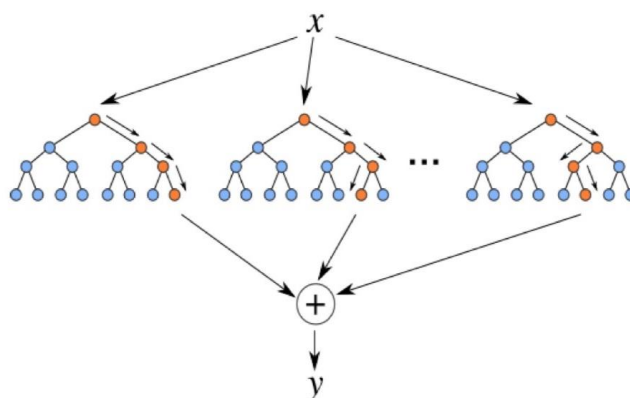


Рис. 2. Структура модели «Случайный лес»

Линейная регрессия — это один из наиболее популярных методов машинного обучения. Он основан на линейной зависимости между признаками и целевой переменной. Он используется для решения задачи регрессии и не требует настройки.

Градиентный бустинг (Gradient Boost) — это ансамбль моделей, который построен на основе деревьев решений. Он работает в два этапа: на первом этапе строится базовая модель, а на втором этапе улучшается с помощью метода градиентного спуска. Метод широко используется для решения задач классификации и регрессии.

Регрессия Гауссовского процесса (Gaussian Process Regressor) — это еще один метод, который используется для решения задачи регрессии. Он основан на байесовском подходе к машинному обучению и использует процесс Гаусса для моделирования зависимости между признаками и целевой переменной.

Регрессия с помощью дерева решений (Decision Tree Regressor) — это метод, который используется для решения задачи регрессии. Он строит дерево решений на основе входных данных и выбирает оптимальное разбиение данных на каждом узле дерева. Однако, модель чувствительна к выбросам в данных.

Ada Boost Regressor — это ансамбль моделей, который улучшает качество прогнозов путём комбинирования нескольких слабых регрессоров в один сильный. Слабые регрессоры улучшаются на каждой итерации, учитывая ошибки предыдущих регрессоров. Ada Boost хорошо работает на небольших и средних выборках.

Каждый из этих методов обладает своими особенностями и подходит для решения определенных задач машинного обучения. Выбор модели зависит от свойств данных и конкретной задачи, а также достигнутой точности.

Чтобы оценить качество модели использовался критерий mean absolute percentage error (MAPE) или средняя абсолютная ошибка, выраженная в процентах и коэффициент детерминации R^2 . MAPE — это метрика, используемая для оценки точности прогнозов на основе процентного отклонения, и часто используется в машинном обучении и инженерном деле. Эта метрика выражается в процентах и измеряет среднее отношение абсолютной ошибки к фактическому значению за все прогнозные точки. Среди недостатков следует ответить малую устойчивость к выбросам в данных, так как там, где фактическое значение равно нулю, значение MAPE неработоспособно. Вычисляется по формуле:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{y_i - y}{y_i} \right) * 100\%,$$

где n – размер выборки, y_i – фактические данные, y – прогнозируемые. Коэффициент детерминации, в свою очередь, рассчитывается по формуле:

$$R^2(y, y_i) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где $\bar{y}$ – среднее фактических значений.

В ходе исследования обнаружена особенность датасета: графическим методом не удалось выявить зависимости между параметрами. Тогда был проведен корреляционный анализ. В ходе этого анализа были определены степень корреляции между параметрами и удалены слабо коррелирующие параметры для улучшения обучения моделей. Это помогло уменьшить размер датасета, сохраняя при этом качество и достоверность данных.

Перечисленные методы позволили изучить применение методов машинного обучения для оценки технического состояния ГТУ по искусственным данным и существенно повысили точность моделей.



Результаты

В результате применения описанных выше методов к выбранному набору данных обучены модели, при помощи которых спрогнозированы значения $K_{ГТ}$ и $K_{ОК}$. Результаты показаны на графиках рассеивания (рис. 3 - 8) и в табл. 2.

В результате исследования удалось успешно применить методы машинного обучения к искусственным данным ГТУ для определения технического состояния осевого компрессора и газовой турбины. По критерию MAPE и R^2 наиболее точной моделью при определении технического состояния осевого компрессора и газовой турбины оказалась модель случайного леса и дерева решений. Худшей моделью оказалась Gaussian Process Regressor, применение которой не позволило определить значение технического состояния осевого компрессора и газовой турбины.

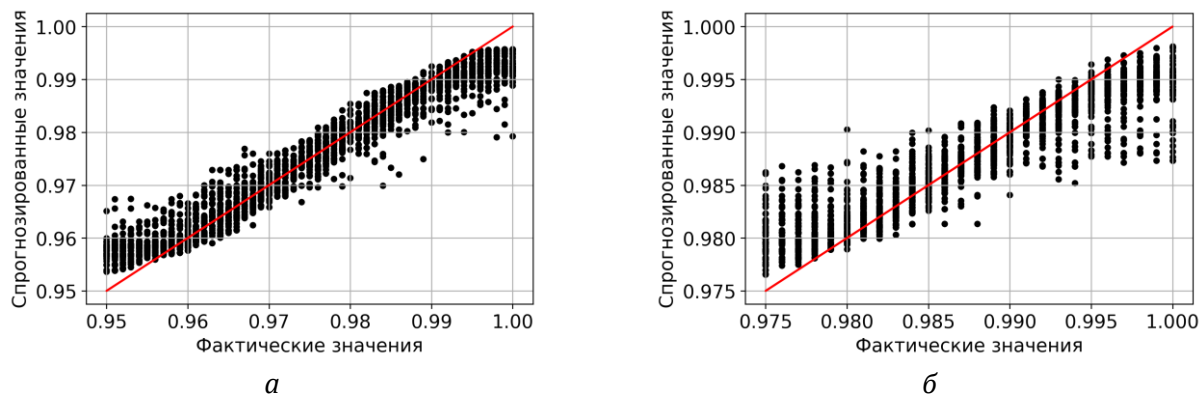


Рис. 3. График рассеивания для модели Gradient Boost:
а – к-т деградации компрессора; б – к-т деградации турбины

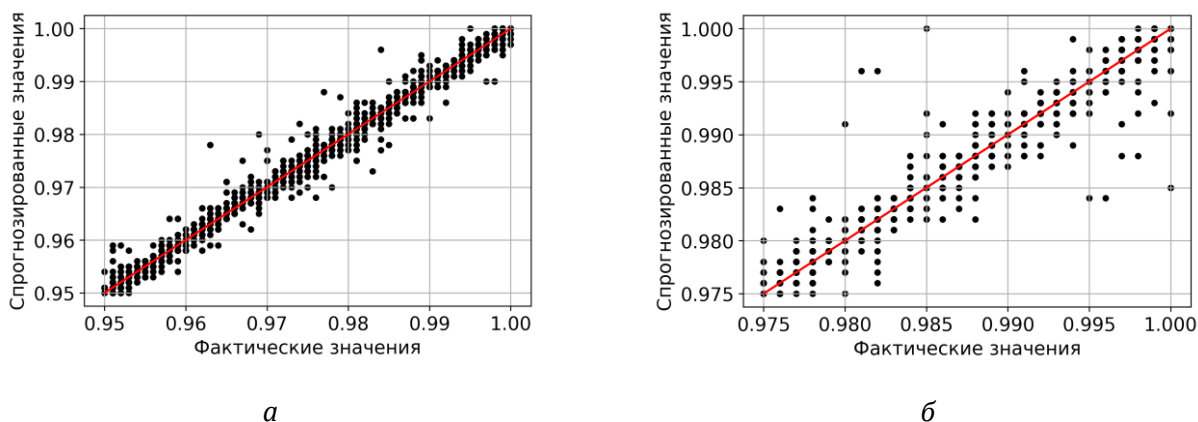


Рис. 4. График рассеивания для модели Decision Tree:
а – к-т деградации компрессора; б – к-т деградации турбины

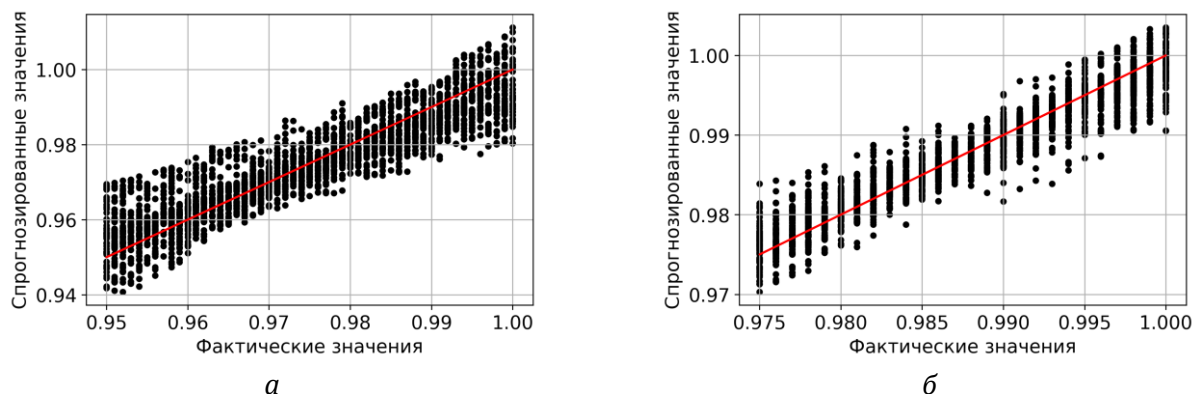
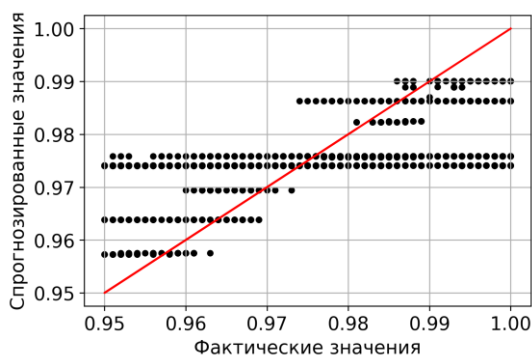
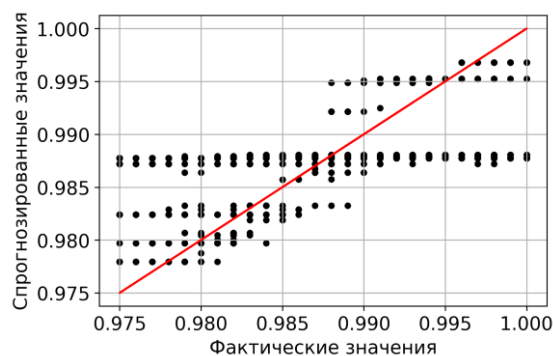


Рис. 5. График рассеивания для модели линейная регрессия:
а – к-т деградации компрессора; б – к-т деградации турбины





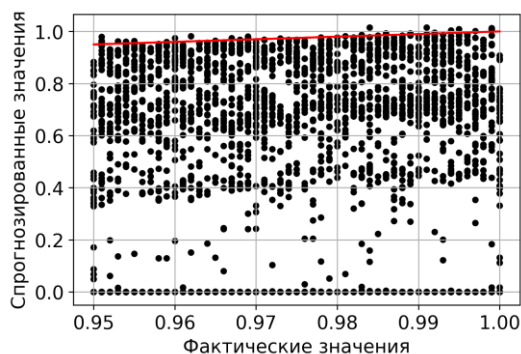
а



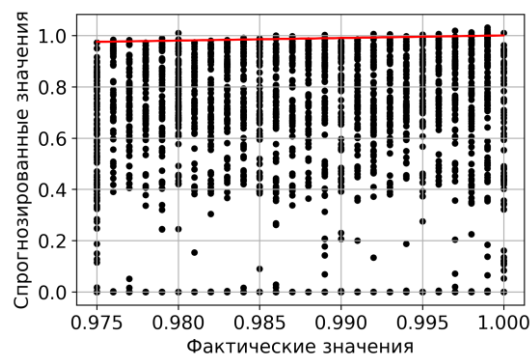
б

Рис. 6. График рассеивания для модели AdaBoost:

а – к-т деградации компрессора; б – к-т деградации турбины



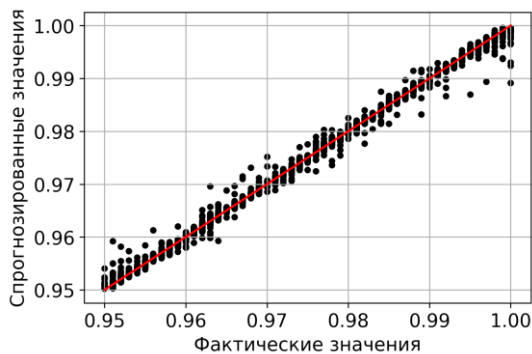
а



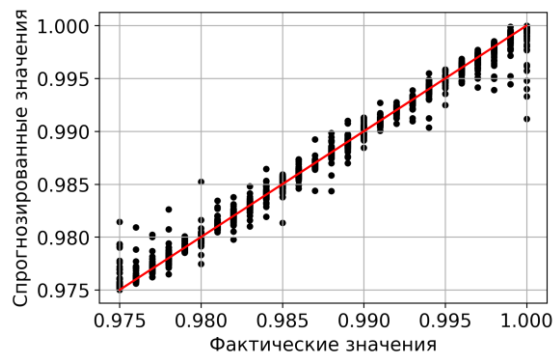
б

Рис. 7. График рассеивания для модели Gaussian Process Regressor:

а – к-т деградации компрессора; б – к-т деградации турбины



а



б

Рис. 8. График рассеивания для модели Random Forest:

а – к-т деградации компрессора; б – к-т деградации турбины

Таблица 2

Точность моделей

№	Модель	K_{OK}			K_{TT}		
		MAPE	R^2	Погрешность	MAPE	R^2	Погрешность
1	Gradient Boosting	0,003	0,931	1,184	0,002	0,839	0,885
2	Decision Tree	0,001	0,990	0,867	0,001	0,971	0,969
3	Linear Regression	0,005	0,841	2,236	0,002	0,911	1,127
4	AdaBoost	0,011	0,210	1,457	0,006	0,144	0,883
5	Gaussian Process Regressor	0,418	-1302,893	99,583	0,418	-5172,920	100,703
6	Random Forest	0,001	0,996	0,519	0,001	0,992	0,436



Обсуждение

В ходе исследования обнаружено, что классические методы оценки качества и точности моделей машинного обучения не дают понять уровень точности при прогнозировании уровня технического состояния. Несмотря на высокие показатели MAPE (0 – лучшее значение) и R^2 (1 – лучшее значение), из графиков рассеяния видно, что модели прогнозировали значения рядом с истинным. График рассеяния модели Gaussian Process Regressor подтверждает низкую точность, вывод о которой сделан из выбранных критериев. Кроме того, график рассеяния модели AdaBoost так же свидетельствует о том, что модель не смогла справиться с поставленной задачей и генерировала абсолютно неверные прогнозы. При этом величина MAPE модели лежит в области «хорошего» значения. Из этого сделан вывод, что при решении конкретной инженерной задачи нельзя полагаться только на распространенные метрики качества.

Также изучение графиков рассеяния показывает, что ошибочные прогнозы моделей распределены равномерно: в зоне минимальных у ошибочные прогнозы завышают уровень технического состояния, в зоне максимальных у – занижают, а в средних случаях распределяются примерно поровну. Вероятно, по этой причине метрика MAPE показывает столь хорошие значения: неверные прогнозы компенсируют друг друга. Принято решение посчитать погрешности прогнозов для каждого уровня технического состояния (метки на горизонтальной оси), усреднить их и выразить в процентах. Получившиеся значения представлены в таблице 2 в столбцах «Погрешность». Согласно новой метрике, оценить модель Случайного леса позволяет оценить техническое состояние осевого компрессора со средней погрешностью 0,5%, турбины – 0,4% в рассматриваемых диапазонах. Эти результаты согласуются с результатами других исследователей, работающих с данным набором данных.

В исследовании продемонстрирована возможность использования методов машинного обучения для оценки технического состояния узлов ГТУ по искусственным данным. Высокая точность моделей подтверждает, что такой подход является перспективным направлением, которое может привести к оптимизации процессов управления, повышению эффективности эксплуатации оборудования. Наилучшая точность достигнута при применении модели «Случайный лес».

На данном этапе исследования удалось выполнить только некоторые этапы полноценного исследования: был использован существующий набор данных, модели использовались со стандартными настройками. В будущем планируется продолжить исследование с использованием собственной модели ГТУ для генерации наборов данных с различным техническим состоянием узлов и влиянием дефектов.

Выводы

В результате исследования выполнена поставленная цель: подтверждена возможность применения методов машинного обучения для оценки технического состояния узлов ГТУ по искусственному набору данных. Наивысшая точность достигнута при использовании модели «Случайный лес»: средняя погрешность составила 0,5% при определении технического состояния компрессора и 0,4% при определении состояния турбины. Отмечено, что следует внимательно оценивать качество моделей, так как стандартные метрики могут не полностью отражать действительную картину и будут сложно интерпретируемы в эксплуатации ГТУ. Развитие работы связано с разработкой собственной модели ГТУ, которая будет учитывать большее количество факторов, влияющих на техническое состояние, а не только его уровень. В дальнейшем при помощи модели будут созданы наборы данных для исследования методов машинного обучения и последующего использования для решения практических задач.



Информация о финансировании

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Библиографический список

1. Roemer M. J., Kacprzynski G. J. Advanced diagnostics and prognostics for gas turbine engine risk assessment //2000 IEEE aerospace conference. proceedings. T. 6. Big Sky: IEEE, 2000. C. 345-353. DOI: [10.1109/AERO.2000.877909](https://doi.org/10.1109/AERO.2000.877909).
2. Jordan M. I., Mitchell T. M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects //Science. – 2015. T. 349. №. 6245. C. 255-260. DOI: [10.1126/science.aaa8415](https://doi.org/10.1126/science.aaa8415).
3. Sun L. et al. Real-time power prediction approach for turbine using deep learning techniques //Energy. 2021. T. 233. C. 121130. DOI: [10.1016/j.energy.2021.121130](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121130).
4. Александров И. В., Дюк В. А., Фомин В. В. Использование методов машинного обучения для определения коэффициента расхода топлива газовой турбины фрегата //Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-1. С. 156-160. EDN: [LWWUPZ](https://www.edn.ru/LWWUPZ).
5. Coraddu A. et al. Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2016. T. 230, №. 1. C. 136-153. DOI: [10.1177/1475090214540874](https://doi.org/10.1177/1475090214540874)
6. Cisotto S., Herzallah R. Performance prediction using neural network and confidence intervals: A gas turbine application //2018 IEEE international conference on big data (Big data). IEEE, 2018. C. 2151-2159. DOI: [10.1109/BigData.2018.8621919](https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8621919)
7. Кочуева О. Н. Разработка моделей прогнозирования выбросов оксидов углерода и азота газовых турбин на основе генетических алгоритмов //Деловой журнал Neftegaz.RU. 2022. № 5-6. С. 14-20. EDN: [YMUQSO](https://www.edn.ru/YMUQSO)
8. Блинов В. Л., Дерябин Г. А. Определение эффективной мощности газотурбинного газоперекачивающего агрегата методами машинного обучения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 2(755). С. 63-72. EDN [ZKYEBG](https://www.edn.ru/ZKYEBG). DOI: [10.18698/0536-1044-2023-2-63-72](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-2-63-72).
9. Campora U., Cravero C., Zacccone R. Marine gas turbine monitoring and diagnostics by simulation and pattern recognition //International journal of naval architecture and ocean engineering. 2018. – T. 10. №. 5. C. 617-628. DOI: [10.1016/j.jinaoe.2017.09.012](https://doi.org/10.1016/j.jinaoe.2017.09.012)
10. Zhong S., Fu S., Lin L. A novel gas turbine fault diagnosis method based on transfer learning with CNN //Measurement. 2019. T. 137. C. 435-453. DOI: [10.1016/j.measurement.2019.01.022](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.022)
11. Real-time simulation of a COGAG naval ship propulsion system / M. Altosole, G. Benvenuto, M. Figari, U. Campora // Proceedings of the institution of mechanical engineers, part M: Journal of engineering for the maritime environment. 2009. T. 223, № 1. C. 47-62. DOI: [10.1243/14750902JEME121](https://doi.org/10.1243/14750902JEME121)

References

1. Roemer, M. J., & Kacprzynski, G. J. (2000, March). Advanced diagnostics and prognostics for gas turbine engine risk assessment. *IEEE aerospace conference. proceedings* (Vol. 6, pp. 345-353). IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/AERO.2000.877909>
2. Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 255-260. <https://doi.org/10.1126/science.aaa8415>
3. Sun, L., Liu, T., Xie, Y., Zhang, D., & Xia, X. (2021). Real-time power prediction approach for turbine using deep learning techniques. *Energy*, 233, 121130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.121130>
4. Alexandrov, I. V., Duke, V. A., & Fomin, V. V. (2019). Using machine learning methods to determine the fuel consumption coefficient of a frigate gas turbine [Ispol'zovanie metodov mashinnogo



- obucheniya dlya opredeleniya koefficienta raskhoda topliva gazovoy turbiny fregata]. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii*, (3-1), 156-160. <https://www.elibrary.ru/lwwupz> [In Russian]
5. Coraddu, A., Oneto, L., Ghio, A., Savio, S., Anguita, D., & Figari, M. (2016). Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 136-153. <https://doi.org/10.1177/1475090214540874>
 6. Cisotto, S., & Herzallah, R. (2018, December). Performance prediction using neural network and confidence intervals: A gas turbine application. *IEEE international conference on big data (Big data)* (pp. 2151-2159). IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/BigData.2018.8621919>
 7. Kochueva, O. N. (2022). Development of models for forecasting emissions of carbon and nitrogen oxides from gas turbines based on genetic algorithms [Razrabotka modeley prognozirovaniya vybrosov oksidov ugleroda i azota gazovykh turbin na osnove geneticheskikh algoritmov]. *Delovoy zhurnal Neftegaz. RU*, (5-6), 14-20. <https://magazine.neftgaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/740352-razrabotka-modeley-prognozirovaniya-vybrosov-oksidov-ugleroda-i-azota-gazovykh-turbin-na-osnove-gene/> [In Russian]
 8. Blinov, V. L. & Deriabin G. A. (2023) Determination of the effective power of a gas turbine gas pumping unit using machine learning methods [Opredelenie effektivnoy moshchnosti gazoturbinnogo gazoperekachivayushchego agregata metodami mashinnogo obucheniya]. *News of higher educational institutions. mechanical engineering 2* (755). P. 63-72. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-2-63-72>. [In Russian]
 9. Campora, U., Cravero, C., & Zacccone, R. (2018). Marine gas turbine monitoring and diagnostics by simulation and pattern recognition. *International journal of naval architecture and ocean engineering*, 10(5), 617-628. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.09.012>
 10. Zhong, S. S., Fu, S., & Lin, L. (2019). A novel gas turbine fault diagnosis method based on transfer learning with CNN. *Measurement*, 137, 435-453. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.022>
 11. Altosole, M., Benvenuto, G., Figari, M., & Campora, U. (2009). Real-time simulation of a COGAG naval ship propulsion system. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part M: Journal of engineering for the maritime environment*, 223(1), 47-62. <https://doi.org/10.1243/14750902JEME121>

Сведения об авторах

Блинов Виталий Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: v.l.blinov@urfu.ru.

Дерябин Глеб Алексеевич, аспирант, инженер кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. ORCID:[0000-0002-1339-0912](https://orcid.org/0000-0002-1339-0912).

Панкрашин Святослав Михайлович, студент 4-го курса бакалавриата кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Authors about

Vitalii Blinov, Cand. of Tech. Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, "Turbines and Engines" department. E-mail: v.l.blinov@urfu.ru.

Gleb Deryabin, engineer, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, "Turbines and Engines" department. ORCID:[0000-0002-1339-0912](https://orcid.org/0000-0002-1339-0912).

Svyatoslav Pankrashin, 4th year undergraduate student of the Department of Turbines and Engines, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.



НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 НА МОКС-ТОПЛИВЕ

Егоров М.Ю.^{1,2,3}, Блинников А.А.¹

¹ГУАП, Санкт-Петербург

²СПбПУ, Санкт-Петербург

³СПбГЛТУ, Санкт-Петербург

Аннотация

Использование смешанного уран-плутониевого топлива в тепловых реакторах позволяет эффективно использовать высокотоксичный оружейный плутоний в мирных целях. Мировые запасы такого плутония являются серьезной проблемой. Применение данного топлива на тепловых реакторах заметно снижает количество необходимого обогащенного урана. Переработанный таким образом плутоний возможно использовать повторно на быстрых реакторах. Таким образом, значительная часть ядерных отходов может использоваться в процессе энерговыделения, а также уменьшится количество потенциальных радиоактивных отходов, которые в противном случае будут захоронены в почве.

В работе представлены результаты нейтронно-физического расчета реактора ВВЭР-1000 на смешанном уран-плутониевом топливе для трех топливных сборок: 30%, 50% и 70% МОКС-топлива от общего количества делящегося вещества. Общее обогащение 5%, что не внесет критических изменений в работу реактора.

Получены эффективные коэффициенты размножения для всех вариаций в нескольких приближениях: метод четырех сомножителей, многогрупповое приближение. Получен спектр нейтронов для многогруппового приближения. Рассчитано ксеноновое и самариевое отравление реактора. Представлен анализ кинетики реактора и изменение нейтронного потока при различной вводимой реактивности. Оценена возможность применения выбранных сборок на реальных энергетических установках и степень воспроизводства плутония в процессе работы реактора.

Ключевые слова: ядерное топливо, выгорание, тепловой реактор, плутоний, МОКС, реактивность, эффективный коэффициент размножения, кинетика реактора.

NEUTRON-PHYSICAL CALCULATION OF THE VVER-1000 ON MOX-FUELED REACTOR

Mikle Egorov^{1,2,3}, Alexander Blinnikov¹

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

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

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

Abstract

The use of mixed uranium-plutonium fuel in thermal reactors makes it possible to effectively use highly toxic weapons-grade plutonium for peaceful purposes. The world's reserves of such plutonium are a serious problem. The use of this fuel in thermal reactors significantly reduces the amount of enriched uranium needed, as well as to dispose of plutonium-239. The plutonium processed in this way can be reused in fast reactors. In that way, a significant part of nuclear waste can be used in the process of energy release, and the number of potential radioactive waste that would otherwise be buried in the soil will also decrease. The paper presents the results of the neutron-physical calculation of the VVER-1000 reactor on mixed uranium-plutonium fuel for three fuel assemblies: 30%, 50% and 70% MOX fuel from the total amount of the produced substance. The total enrichment is 5%, which will not make critical changes to the reactor operation. Effective multiplication coefficients are obtained for all variations in several approximations: the 4-factor method, the multigroup approximation. The neutron spectrum for the multigroup approximation is obtained. Xen-



on and samarium poisoning of the reactor was calculated. The analysis of the kinetics of the reactor and the change in the neutron flux at different input reactivity is presented. The possibility of using the selected assemblies on real power plants and the degree of plutonium reproduction during reactor operation are evaluated.

Keywords: nuclear fuel, burnout, thermal reactor, plutonium, MOX, reactivity, effective multiplication coefficient, kinetics of a reactor.

Введение

Основную часть топлива в тепловых реакторах составляет природный уран-238, но энерговыделение происходит за счет делящегося изотопа урана-235, мировые запасы которого значительно меньше.

В то же время, с момента изобретения ядерного оружия, человечеством было накоплено большое количество высокотоксичного оружейного плутоний-239, который используется для создания предсказуемых ядерных зарядов. В наши дни, политика большинства стран направлена на сокращение количества ядерного оружия, а также на снижение последствий от хранения и утилизации его компонентов. Самым распространенным способом решения вопроса с ядерными отходами является их захоронение в недрах земли. Это значительно проще, чем создавать технологическую базу для эффективного использования отходов, но также требует средств, а главное – ядерные полигоны способны отравлять почву, даже несмотря на все предпринимаемые меры защиты. Ни один из способов хранения радиоактивных отходов (РАО) не является полностью безопасным [1].

Широкое распространение тепловых реакторов в мире, в частности ВВЭР-1000, позволяет говорить о возможности применения на них ограниченного количества плутония. Это положительно скажется на динамике сокращения запасов РАО. Опыт применения МОКС-топлива на тепловых реакторах показал положительные результаты. Экспериментально подтверждено допустимое безопасное содержание плутония в составе топлива теплового реактора менее 50% от общей загрузки [2]. Содержание плутония до 5% от всего топлива обеспечивает до трети энерговыделения реактора [3]. В тепловых реакторах может достигаться 30%-е выгорание плутония из состава МОКС-сборок [4]. Однократная переработка плутония в виде МОКС-топлива увеличивает энергию, получаемую из исходного урана, на 12%, а если уран также перерабатывается, это значение может составлять до 22% [5]. Отработанный плутоний имеет отличный от оружейного плутония изотопный состав, большая часть – энергетический плутоний-240, а также другие неделящиеся четные изотопы. Такой плутоний нельзя использовать для предсказуемых ядерных зарядов [6]. МОКС-топливо гораздо эффективнее применять на быстрых реакторах, но их количество не позволяет загружать значительные количества РАО в составе МОКС-сборок (БН-600 и БН-800 на Белоярской АЭС), поэтому совместное использование тепловых и быстрых реакторов предпочтительнее. Благодаря такому подходу, в значительной степени повышается энергетический потенциал природного урана-238, что в долгосрочной перспективе означает возможность функционирования АЭС в течение многих лет без ограничений со стороны имеющихся естественных топливных ресурсов [7].

Целью работы является нейтронно-физический расчет реактора ВВЭР-1000 с частичной загрузкой уран-плутониевого топливом, с дальнейшей возможностью анализа возможности применения на нем МОКС-сборок, а также оценка влияния такого топлива на реактивность и кинетику реактора.

Задачами исследования являются получение эффективных коэффициентов размножения в различных формализмах, расчет отравления реактора и его влияния на реактивность, оценка кинетики реактора.



Материалы, методы и результаты

Для теоретического расчета приняты три топливные композиции смешанного уран-плутониевого топлива (табл. 1). Расчет эффективных коэффициентов размножения для каждой из сборок проведен методом четырех сомножителей и методом многогруппового приближения. Для отравления получена динамика накопления нуклидов, а также их вклад в реактивность. На основе многогрупповой методики получен спектр плотностей нейтронных потоков.

Таблица 1

Изотопный состав топливных композиций

	Pu-238 (2%)	Pu-239 (52%)	Pu-240 (24%)	Pu-241 (15%)	Pu-242 (6%)
МОХ 1 30% (1,5%)	0,03%	0,78%	0,36%	0,225%	0,09%
МОХ 2 50% (2,5%)	0,05%	1,3%	0,6%	0,375%	0,15%
МОХ 3 70% (3,5%)	0,07%	1,82%	0,84%	0,525%	0,21%

В общем случае, коэффициент размножения в бесконечной среде может быть найден с помощью формулы четырех сомножителей:

$$K_{\infty} = \mu \varphi \theta \nu,$$

где K_{∞} — коэффициент размножения в бесконечной среде; μ — коэффициент размножения на быстрых нейтронах; φ — вероятность избежать резонансного захвата; θ — коэффициент использования тепловых нейтронов; ν — выход нейтронов на одно поглощение.

Для перехода от бесконечной среды к эффективному коэффициенту размножения воспользуемся формулой:

$$K_{\text{эфф}} = K_{\infty} \Lambda_T \Lambda_3; \quad \Lambda_T = \frac{1}{1 + B^2 L_p^2}; \quad \Lambda_3 = e^{-B^2 \tau_p},$$

где Λ_3 — доля утечки замедленных нейтронов; Λ_T — доля утечки тепловых нейтронов; L_p — длина диффузии в решетке, см; τ_p — возраст нейтронов в решетке, см²; B — геометрический параметр, см⁻².

Далее определяется отравление реактора ксеноном-135 и шлакование самарием-149, их накопление и вклад в реактивность (рис. 1-4).

$$N_{Xe}(t) = \frac{(p_I + p_{Xe}) \Sigma_U^f \Phi_0}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi_0} (1 - \exp[-(\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi_0)t]) - \frac{p_I \Sigma_U^f \Phi_0}{\lambda_{Xe} - \lambda_I + \sigma_{Xe} \Phi_0} (\exp[-\lambda_I t] - \exp[-(\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi_0)t]),$$

где Φ_0 — общий поток нейтронов; p_I — выход йода при делении; p_{Xe} — выход ксенона при делении; λ_{Xe} — постоянная радиоактивного распада ксенона; σ_{Xe} — эффективное микроскопическое сечение поглощения ксенона, барн; λ_I — постоянная радиоактивного распада йода; Σ_U^f — макроскопическое сечение деления ядер топлива.

$$N_{Sm}(t) = \frac{(p_{Pm}) \Sigma_U^f}{\sigma_{Sm}} (1 - \exp[-\sigma_{Sm} \Phi_0 t]) + \frac{p_{Pm} \Sigma_U^f \Phi_0}{\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm} \Phi_0} (\exp[-\lambda_{Pm} t] - \exp[-\sigma_{Sm} \Phi_0 t]),$$

где p_{Pm} — выход прометия при делении; σ_{Sm} — эффективное микроскопическое сечение поглощения самария, барн; λ_{Pm} — постоянная радиоактивного распада прометия.



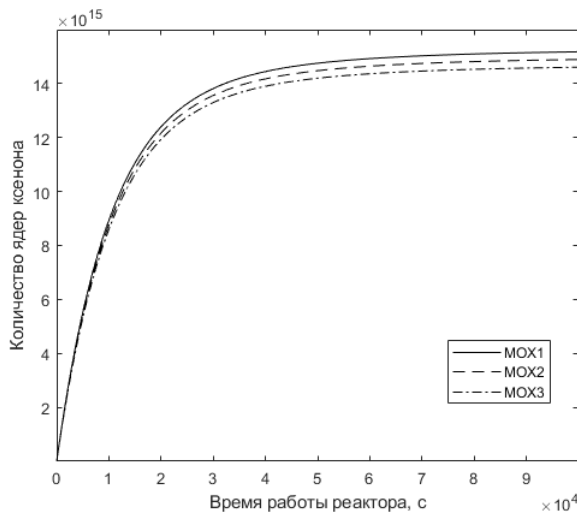


Рис. 1. Накопление ксенона

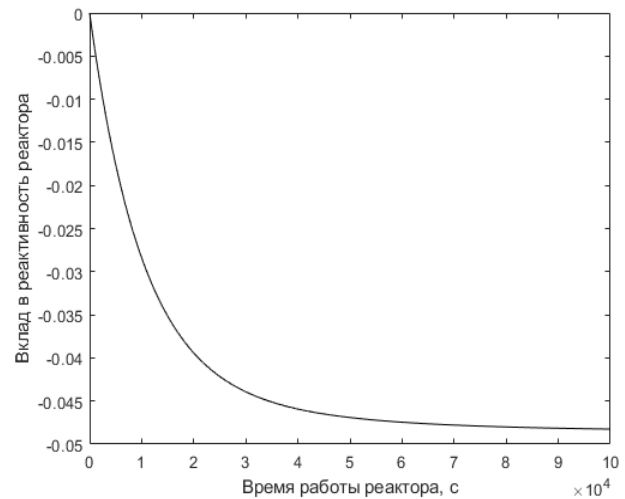


Рис. 2. Вклад ксенона в реактивность

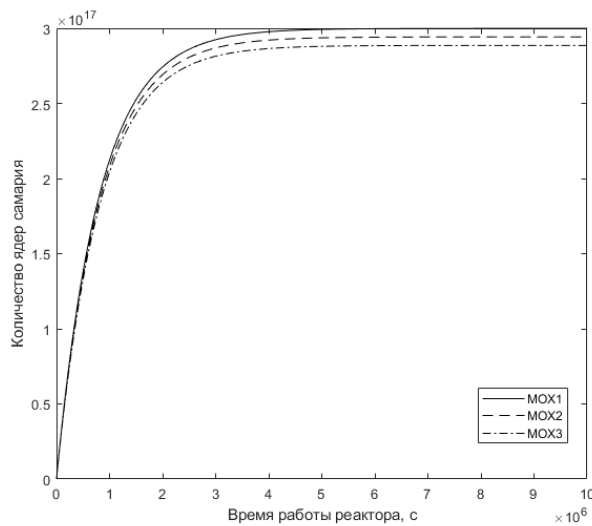


Рис. 3. Накопление самария

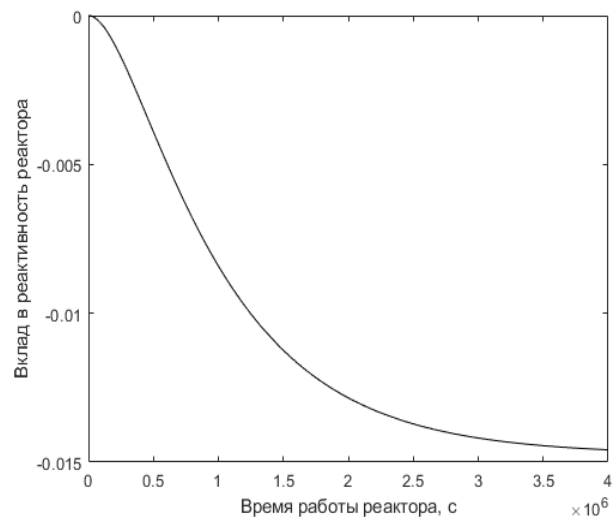


Рис. 4. Вклад самария в реактивность

Оценив вклад в реактивность для каждого из отравителей, можно определить их общее влияние на эффективный коэффициент размножения реактора (рис. 5). Для наглядности выберем время работы реактора 10 суток.

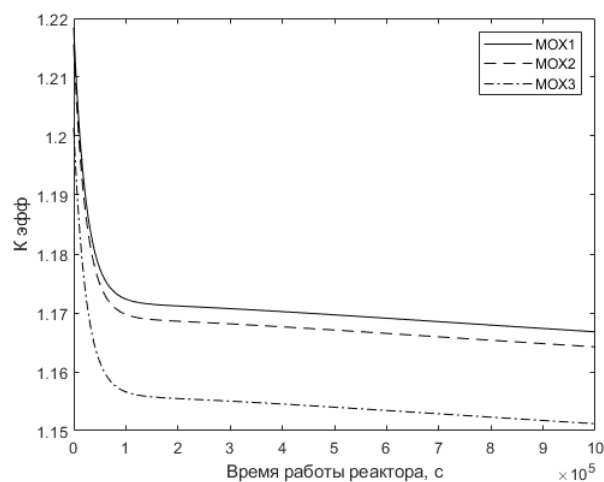


Рис. 5. Изменения коэффициента размножения при отравлении реактора



Кинетика реактора определяется в основном запаздывающими нейтронами, на их основе строится управление нейтронным потоком, реактивность вводится в процентах от доли запаздывающих нейтронов.

$$\Phi(t) = \Phi_0 \left(\frac{\beta}{\beta - \rho} \exp \left(\frac{\beta}{(\beta - \rho) I_{\text{эф}}} t \right) - \frac{\rho}{\beta - \rho} \exp \frac{\beta - \rho}{I} t \right);$$

$$\rho = (k_{\text{эф}} - 1) / k_{\text{эф}},$$

где β — доля запаздывающих нейтронов; ρ — вводная реактивность; I — время жизни мгновенных нейтронов, с; $I_{\text{эф}}$ — время жизни запаздывающих нейтронов, с.

Реактивность вводится для удобства расчетов и анализа нейтронного потока. Важной характеристикой является период реактора — время, за которое поток нейтронов изменяется в e раз. Это время должно быть достаточным для безопасной работы реактора (для ВВЭР это время составляет более 40 секунд), см. рис. 6.

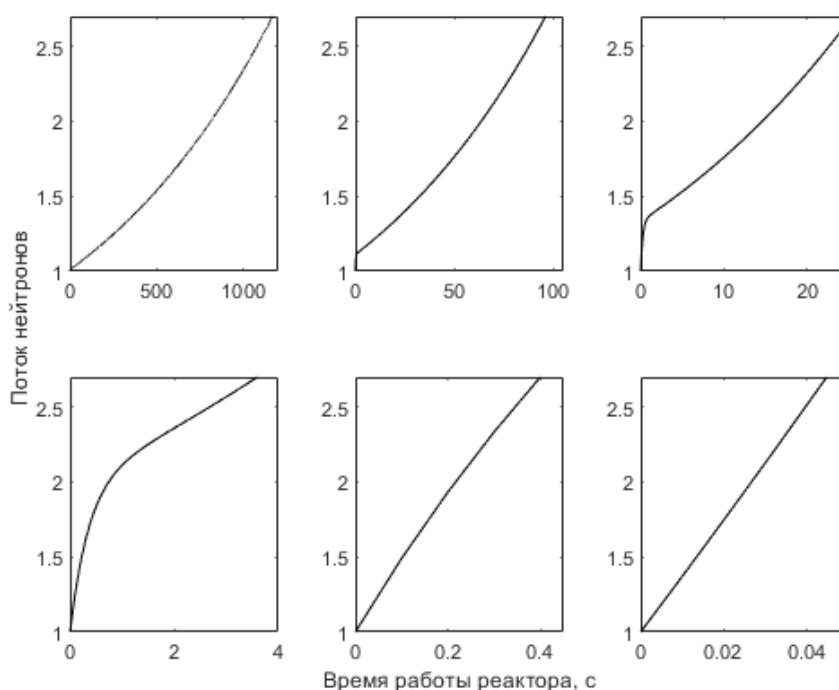


Рис. 6. Зависимость нейтронного потока от времени при различных возмущениях реактивности в пределах 1 периода реактора (5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 95% от исходной доли запаздывающих нейтронов)

Далее перейдем к методу многогруппового приближения. Основная сложность заключается в выборе и подготовке системы констант при выбранном разбиении энергетического спектра на условные группы, в нашем случае их 26.

Стационарная задача многогрупповой системы для ядерного реактора имеет вид:

$$-D^i B^2 \Phi^i - \Sigma_a^i \Phi^i - \sum_{k=i+1}^{26} \Sigma_R^{i \rightarrow k} \Phi^i + \sum_{k=1}^{i-1} \Sigma_R^{k \rightarrow i} \Phi^k + \varepsilon^i \sum_{k=1}^{26} v_f^k \Sigma_f^k \Phi^k = 0,$$

где D^i — коэффициент диффузии нейтронов для i -ой группы; Φ^i , Φ^k — плотности потоков нейтронов для i -ой и k -ой группы, соответственно; $\Sigma_R^{i \rightarrow k}$ — макросечение перехода нейтронов из i -ой группы в k -ую; ε^i — вероятность попадания нейтрона в i -ую группу; v_f^k — усредненное число нейтронов на акт деления для k -ой группы; Σ_f^k — макросечение деления нейтронов для k -ой группы.



Данный формализм позволит получить не только значения коэффициента размножения, но и распределение плотности потока нейтронов по группам.

$$k_{эф} = \frac{\overline{v_f \Sigma_f}}{DB^2 + \overline{\Sigma_a}};$$

где D — коэффициент диффузии нейтронов; Σ_a — макросечение поглощения нейтронов; v_f — число нейтронов на акт деления; Σ_f — макросечение деления нейтронов.

Значения коэффициентов воспроизводства зависят в основном от скоростей реакции воспроизводящего и делящегося нуклидов:

$$KB = \frac{\frac{dN^{239}}{dt}}{\left| \frac{dN^{235}}{dt} \right|}.$$

Значения коэффициентов размножения приведены в табл. 2, коэффициентов воспроизводства – в табл. 3. На рис. 7. Приводится распределение плотности потока нейтронов для вариантов сборок.

Таблица 2

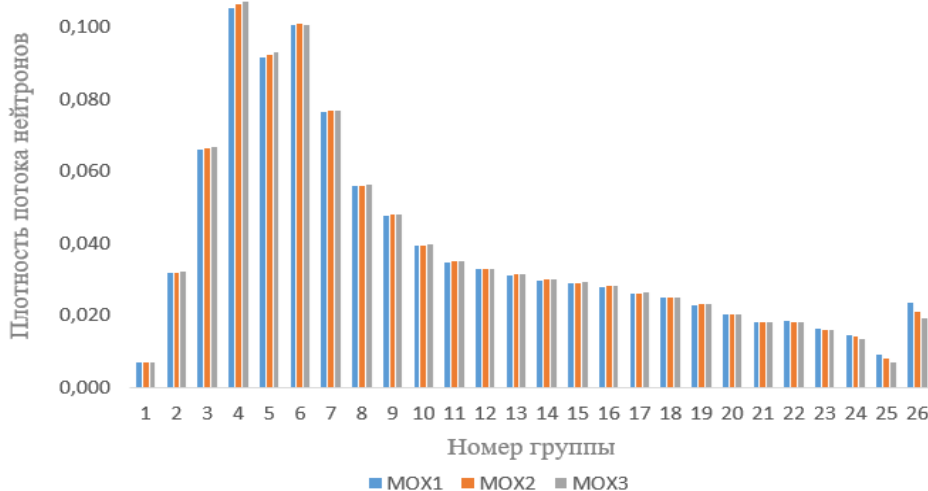
Значения коэффициентов размножения

Сборка	Метод 4-х сомножителей	Многогрупповой метод
МОХ 1	1,2184	1,2465
МОХ 2	1,2156	1,2045
МОХ 3	1,2014	1,1695

Таблица 3

Значения коэффициентов воспроизводства

Сборка	Коэффициент воспроизводства
МОХ 1	0,4244
МОХ 2	0,4757
МОХ 3	0,5249

**Рис. 7. Распределение плотности потока нейтронов**

Обсуждение результатов

По полученным данным можно сделать вывод, что реактор имеет запас реактивности и сохраняет его на достаточном уровне после отравления. Распределение плотности нейтронов соответствует обычному распределению в тепловом реакторе.

По графикам кинетики можно судить, что реактор может работать в безопасном режиме при вводной реактивности в пределах 10% от доли запаздывающих нейтронов.

Воспроизводство представлено в начальный момент времени. По сравнению с традиционным урановым топливом, данные по воспроизводству и выгоранию плутония достовернее, поскольку относительная концентрация урана в сборке меньше [8]. В процессе работы реактора этот коэффициент будет уменьшаться, т.е. увеличится степень выгорания.

Выводы

Нейтронно-физические показатели практически идентичны работе реактора на традиционном топливе, а коэффициенты воспроизводства подтверждают эффективность отработки плутония в рамках исследования.

Это свидетельствует о состоятельности принятых топливных композиций.

Библиографический список

1. Рябченко О. Н., Ахметшин Т. Ф. Глобальные проблемы захоронения ядерных отходов по законодательству РФ и США // *Аграрное и земельное право*. 2017. № 11. С. 129-131. EDN: [XQJVTf](#).
2. Overview of safety analysis, licensing and experimental background of MOX fuels in LWRs / T. Fujishiro, J.-P. West, L. Heins, J.J. Jadot // *International symposium on MOX fuel cycle technologies for medium and long term deployment*. Vienna: IAEA, 2000. P. 38-48. URL: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/31/062/31062326.pdf>.
3. Дячёк О.А., Кравченко В.В. Сравнение характеристик топливных циклов реакторов с топливом различного типа // *Наука, техника и образование*. 2020. Т. 4, № 68. С. 42-43. EDN: [CHNZNM](#).
4. NDA Plutonium Options [Электронный ресурс]. Cumbria: NDA Strategies, 2008. 20 p. URL: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20211004153254/https://rwm.nda.gov.uk/publication/plutonium-options-for-comment-august-2008/> (Дата обращения 30.04.2023)
5. Arslan M., Leboucher I., Bouvier E. Fuel Cycle Strategies to Optimize the MOX in Reactors // *Energy Procedia*. 2013. Vol. 39. P. 59-68. DOI: [10.1016/j.egypro.2013.07.192](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.192).
6. Сараев О.М., Ошканов Н.Н., Мальцев В. В. Перспективы безопасной утилизации плутония в виде МОКС-топлива на Белоярской АЭС // *Утилизация плутония: проблемы и решения*. Екатеринбург: УрФУ, 2000. С. 57-59. EDN: [XRANSd](#).
7. Бекман И. Н. Плутоний. Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 165 с.
8. Писарев А. Н., Колесов В. В. Сравнение влияния неопределенностей ядерных данных на точность предсказания изотопного состава для UO₂- и MOX-топлива в расчетах выгорания на примере ячейки реактора PWR. // *Вопросы атомной науки и техники. Физика ядерных реакторов*. 2022. № 5. С. 67-74. EDN: [ZQKVCY](#).

References

1. Ryabchenko, O. N., & Akhmetshin, T. F. (2017). Global'nye problemy zahoroneniya yadernyh othodov po zakonodatel'stvu RF i SSHA [Global problems of nuclear waste disposal under the legislation of the Russian Federation and the USA]. *Agrarian and land law*, 11, 129-131. <https://www.elibrary.ru/xqjvtf>. [In Russian]
2. Fujishiro, T., West, J.-P., Heins, L., & Jadot, J.J. (2000). Overview of safety analysis, licensing and experimental background of MOX fuels in LWRs. In Proc. *International symposium on MOX fuel cy-*



cle technologies for medium and long term deployment (pp. 38-48). IAEA. <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/31/062/31062326.pdf>

3. Dyachek, O.A., & Kravchenko, V. V. (2020). Sravnenie harakteristik toplivnyh ciklov reaktorov s toplivom razlichnogo tipa [Comparison of characteristics of fuel cycles of reactors with fuel of various types]. *Science, Technology and Education*, 4(68), 42-43. <https://www.elibrary.ru/chnznm>. [In Russian]
4. NDA Strategies. (2008). *NDA Plutonium Options*. NDA. <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20211004153254/https://rwm.nda.gov.uk/publication/plutonium-options-for-comment-august-2008/>
5. Arslan, M., Leboucher, I., & Bouvier E. (2013). Fuel Cycle Strategies to Optimise the use of MOX Fuels. *Energy Procedia*, 39, 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.192>.
6. Saraev, O. M., Oshkanov, N. N., & Maltsev, V. V. (2000). Prospects for safe disposal of plutonium in the form of MOX fuel at the Beloyarsk NPP [Perspektivy bezopasnoj utilizacii plutoniya v vide MOKS-topliva na Beloyarskoj AES]. In *Proc. Disposal of plutonium: problems and solutions* (pp. 57-59). UrFU. <https://www.elibrary.ru/xransd>. [In Russian]
7. Beckman, I. N. (2010) *Plutonijs [Plutonium]*. Lomonosov Moscow State University. [In Russian]
8. Pisarev, A. N., & Kolesov, V. V. (2022) Sravnenie vliyaniya neopredelennostej yadernyh dannyh na tochnost' predskazaniya izo-topnogo sostava dlya UO_2 - i MOX-topliva v raschetah vygoraniya na primere yachejki re-aktora PWR [Comparison of the influence of nuclear data uncertainties on the accuracy of isotopic composition prediction for UO_2 - and MOX-fuels in burnout calculations using the example of a PWR reactor cell]. *Questions of atomic Science and Technology*, 5, 69-70. <https://www.elibrary.ru/zqkvcy> [In Russian]

Сведения об авторах

Егоров Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова.

Блинников Александр Александрович, бакалавр, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Authors about

Mikle Yu. Egorov – Associate Professor, PhD (Tech.), St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg State Forest Technical University.

Alexander A. Blinnikov – bachelor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.



ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ СТЕНКУ ТРУБОПРОВОДА. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кобылкин М.В., Риккер Ю.О., Акимов И.С.

ЗабГУ, г. Чита

Аннотация

Давление является ключевым параметром работы многих промышленных предприятий, в том числе и предприятий в области энергетики. Контроль и отслеживание этого параметра обеспечивает стабильное и безаварийное протекание технологических процессов, осуществляемых в процессе деятельности этих предприятий. На сегодняшний день существует проблема, заключающаяся в том, что, если манометра на трубе нет, невозможно определить текущее давление внутри трубопровода, не проводя врезку манометра в тело данного трубопровода, что возможно только в период проведения режимно-наладочных работ или благодаря осуществлению достаточно опасного мероприятия, под названием «Врезка под давлением». Необходимость создать возможность оперативного и своевременного контроля давления внутри трубопроводов промышленных предприятий, является актуальной задачей для инженеров и специалистов в области энергетики. Цель работы является проверка гипотезы возможности измерения давления жидкости через стенку трубопровода, основанной на характере протекания динамических тепловых процессов, создание опытного прототипа устройства позволяющего определить конечное значение давления рабочего тела внутри трубопровода. В результате установлена зависимость между характером протекания тепловых процессов и конечным значением давления внутри трубопровода. Разработан и создан прототип устройства, а также экспериментальный стенд, позволивший проверить гипотезу.

Ключевые слова: давление, измерение, трубопровод, энергосбережение, экология, энергоэффективность

VERIFICATION OF THE HYPOTHESIS OF THE POSSIBILITY OF MEASURING LIQUID PRESSURE THROUGH A PIPELINE WALL. RESULTS OF THE STUDY

Mikhail Kobylkin, Yulia Rikker, Ilya Akimov

Transbaikal State University, Chita

Abstract

Pressure is a key parameter in the work of many industrial enterprises, including those in the energy sector. Control and monitoring of this parameter ensures a stable and trouble-free flow of technological processes carried out in the course of the activities of these enterprises. Today, there is a problem that if there is no pressure gauge on the pipe, it is impossible to determine the current pressure inside the pipeline without inserting a pressure gauge into the body of this pipeline, which is possible only during the period of maintenance and commissioning or due to the implementation rather dangerous event, called "Push under pressure." The need to create the possibility of prompt and timely control of pressure inside the pipelines of industrial enterprises is an urgent task for engineers and specialists in the field of energy. The purpose of the work: to test the hypothesis of the possibility of measuring the pressure of a liquid through the pipeline wall, based on the nature of the flow of dynamic thermal processes, to create an experimental prototype of a device that allows determining the final value of the pressure of the working fluid inside the pipeline. Results of the work: the relationship between the nature of the flow of thermal processes and the final value of pressure inside the pipeline has been established. A prototype of the device was developed and created, as well as an approbation stand, which made it possible to test the hypothesis.

Keywords: pressure, measurement, pipeline, energy saving, ecology, energy efficiency



Введение

Давление является ключевым параметром работы многих промышленных предприятий. В том числе предприятий в сфере энергетики. Контроль над этим параметром чрезвычайно важен и необходим не только в процессе эксплуатации, но и при проведении режимно-наладочных работ. От качества контроля и отслеживания этого параметра зависит не только стабильность работы предприятий, но и экономичность, экологичность и эффективность работы этих предприятий в целом. Стоит отметить, что чем качественнее будет проводиться контроль над этим параметром, тем выше эффективность работы предприятий. Это наиболее важно для объектов теплоэнергетики, которые обеспечивают распределение теплоносителя для нужд отопления и горячего водоснабжения. Также для поддержания корректной работы систем теплообеспечения необходимо регулярно проводить режимно-наладочные работы [1]. Этот процесс осложнен несколькими факторами. Для оптимального их проведения на участке трубопровода необходимо знать текущее давление теплоносителя, протекающего внутри него, но это не всегда возможно, поскольку на данном участке может не оказаться манометра. В таком случае может возникнуть необходимость прибегнуть к мероприятию под названием «Врезка под давлением», заключающемуся во врезке необходимого манометра в тело трубопровода без понижения текущего давления в трубопроводе что, как правило, сопряжено с рядом проблем [2, 3]. Помимо сложности в осуществлении и возможного влиянии на прочие производственные процессы предприятия, процесс несет риск для работника, осуществляющего врезку. Создание прибора, позволяющего измерять давление, не нарушая целостности тела трубопровода, обладающего мобильностью и не требующего монтажа, способно существенно упростить эксплуатацию этих предприятий и в какой-то мере улучшить показатели их работы [4, 5].

Авторами сформирована гипотеза [6-7], согласно которой существует возможность получения текущего значения давления, поддерживающегося внутри трубопровода, исходя из скорости стабилизации температурных потоков. Предполагается, что давление может оказывать достаточное для регистрации приборами влияние на динамические характеристики тепловых процессов протекания жидкости внутри трубопроводных систем.

Материалы и методы

Процесс стабилизации – это процесс перехода температурной системы из одного стабильного состояния в другое, характер перехода зависит от тепловой инерции системы [8]. Согласно выдвинутой гипотезе, процесс стабилизации может быть разным, в зависимости от текущего давления в трубопроводе. В основе гипотезы лежит зависимость тепловой инерции от давления. Тепловая инерция — это термин, используемый в основном в инженерном и научном моделировании теплопередачи, и обозначающий совокупность свойств любых материалов, связанных с теплопроводностью и объёмной теплоёмкостью. Иными словами, тепловая инерция характеризует способность сопротивляться изменению температуры за определённое время.

Тепловая инерция материала может быть определена по формуле:

$$I = \sqrt{k\rho c}, \quad (1)$$

где k – теплопроводность; ρ – плотность; c – удельная теплоёмкость материала.

Чтобы оценить влияние давления на тепловую инерцию, необходимо оценить влияние давления на каждую из составляющих тепловой инерции.

При анализе литературы [4, 5, 9-11] было выявлено, что давление оказывает небольшое влияние на теплопроводность жидкостей. С ростом давления теплопроводность незначительно возрастает. Обычно это влияние не учитывают до значений абсо-



лутного давления 35 бар (3,5 МПа). При более высоком давлении влияние его становится ощутимым. С повышением давления показатели плотности также растут, но незначительно. Например, плотность воды при температуре 0°C изменяется с ростом давления от 0,1 до 400 МПа на величину от 999 до 1146 кг/м³. Удельная теплоемкость также обладает зависимостью от давления, которая не является ярко выраженной, в частности повышение давления на 10 бар (1 МПа) приводит к увеличению теплоемкости с 4218 до 4212 Дж/(кг·К).

Каждая из составляющих тепловой инерции обладает незначительной зависимостью от давления, в связи с этим, давление невозможно определить, опираясь только на параметры теплопроводности, плотности или теплоёмкости. При переходе к интегральной оценке давления, в качестве которой примем тепловую инерцию, можно ожидать повышение чувствительность тепловой инерции на изменение давления. Это обусловлено тем, что на величину интегральной оценки будут влиять все ее составляющие, причем это влияние является однонаправленным без взаимной компенсации.

При постоянном давлении теплоносителя в трубопроводе величина тепловой инерции практически должна оставаться неизменной, однако в динамике даже очень малое изменение давления теплоносителя позволит получить эффект интегрального насыщения, который наблюдается при накоплении отклонения в течение времени. Эффект интегрального насыщения позволит многократно усилить влияние изменения давления на инерционные процессы стабилизации температур, что должно быть достаточно для его регистрации. Таким образом, возможность измерения давления жидкости внутри трубопровода, без нарушения его целостности при использовании процесса стабилизации температур, зависящих от тепловой инерции, обладает теоретическим обоснованием для дальнейшего изучения.

Для проверки гипотезы был собран испытательный стенд, моделирующий процессы протекания жидкости (воды) в трубопроводе. Проведен ряд экспериментов. Стенд представляет собой стеллаж с закрепленными на нем элементами гидросистемы. Забор воды осуществляется из бака посредством погружного насоса. Для обеспечения рабочего давления и циркуляции воды в гидравлической системе стенда в нее был интегрирован циркуляционный насос. Благодаря работе двух насосов удалось достигнуть максимального давления 4 бара в обоих режимах протекания жидкости. Также была разработана и применена система запорных клапанов, при помощи которых стало возможным изменять условия протекания рабочего тела (воды) и осуществлять контроль давления внутри трубопровода стенда и достичь возможности работы стенда в гидростатическом и гидродинамическом режимах (рис. 1). Для передачи текущих параметров работы стенда на ЭВМ применен аналого-цифровой преобразователь (АЦП), подключенный к электронному манометру. Также установлен классический аналоговый манометр для сравнения с показателями, передающимися на ЭВМ (рис. 2).

Стенд прошел гидравлические испытания на герметичность работы и стабильность поддержания давления в гидросистеме. Как показали исследования, погрешность измерений составляет в среднем 1,638 кПа как в статическом, так и в динамическом режимах протекания жидкости.

Результаты

Для проверки гипотезы зависимости давления от скорости стабилизации температурных потоков был сконструирован прототип прибора, под рабочим названием «Контактный манометр». Он представляет собой пластиковый сосуд с областью контакта, охлажденной до -143°C жидким азотом. Текущее значение температуры контактной области передается на ЭВМ через АЦП благодаря термопарам, подключенным непосредственно к контактной области (рис. 3, 4).





Рис. 1. Гидравлический испытательный стенд



Рис. 2. Электрический щит с АЦП

В трубопроводе протекает поток жидкости с определенной температурой, давлением и расходом. В момент соприкосновения охлажденной контактной области с телом трубопровода, температура потока жидкости начинает падать, стремясь к термодинамическому равновесию, а температура контактной области, соответственно, будет расти. В определенный момент времени, общая температура системы «прибор-труба» достигнет некоторого общего значения и станет постоянной, это и есть процесс стабилизации. Показания температур регистрируются на протяжении всего времени эксперимента и отображаются на графике в виде кривой.

На рис. 5 представлены графики стабилизации температурных потоков, полученные в ходе экспериментов при разном давлении, наложенные друг на друга.

Обсуждение

Данные, полученные по итогам экспериментов, были подвергнуты статистическому анализу [12]. Его задачей являлось выявление зависимости между давлением и динамическим процессом стабилизации температур в прототипе прибора для измерения давления.

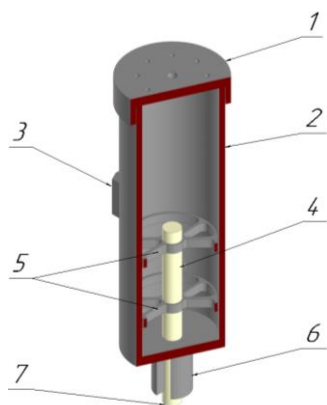


Рис. 3. Устройство «Контактного манометра»:

1 – перфорированная крышка, для выхода паров азота; 2 – пластиковая колба; 3 – посадочная площадка для линейных подшипников; 4 – внутреннее тело контактной области; 5 – опорные шайбы; 6 – поворотный зажим термоэлектрических преобразователей; 7 – контактная область



Рис. 4. Прототип «Контактного манометра»

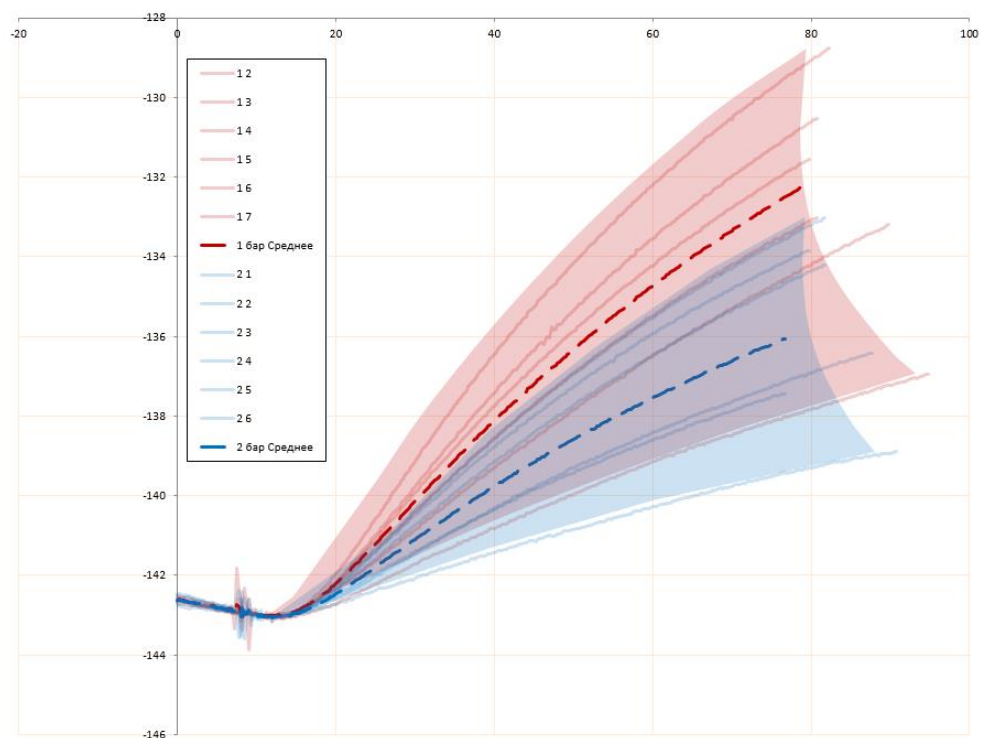


Рис. 5. Графики средних значений распределений температур во времени

Получены две группы выборок, которые соответствуют экспериментам при давлении 1 бар и 2 бара. Всего получено 3684 замера разделенных на 306 выборок по 12 повторений эксперимента в каждой выборке (6 для давления 1 бар, 6 для давления 2 бара). Предварительно оценено равенство дисперсий по выборкам. Использовано эмпирическое правило дисперсии, согласно которому можно предположить примерное равенство дисперсий в случае, если отношение большей дисперсии к меньшей дисперсии меньше четырех. Для полученных экспериментальных данных отношение дисперсий в среднем составляет 2,22. Равенство дисперсий позволяет использовать t -критерий Стьюдента для оценки статистической значимости полученных результатов.

При постановке задачи анализа сформированы нулевая гипотеза и альтернативная гипотеза. Нулевая гипотеза утверждает, что давление не влияет на динамические процессы стабилизации температур и различия в полученных выборках данных статистически не значимы. Альтернативная гипотеза утверждает, что давление влияет на динамические процессы стабилизации температур и различия в полученных выборках данных статистически значимы.

Уровень статистической значимости принят $p < 0,1$. В условиях принятого уровня статистической значимости подтверждение альтернативной гипотезы выявит тенденцию к существованию искомой закономерности и позволит оценить статистическую мощность исследования и сформировать дальнейший план экспериментов для получения более точных результатов.

В результате анализа получен график изменения t -критерия Стьюдента в процессе эксперимента (рис. 6).

По итогам анализа, был сделан вывод, что на старте измерений поведение t -критерия Стьюдента обусловлено «шумом» в момент установки прибора на место контакта с трубой (рис. 7). Область «шума» не учитывается в дальнейшем анализе. После начала динамического процесса стабилизации температур поведение t -критерия Стьюдента нормализуется.

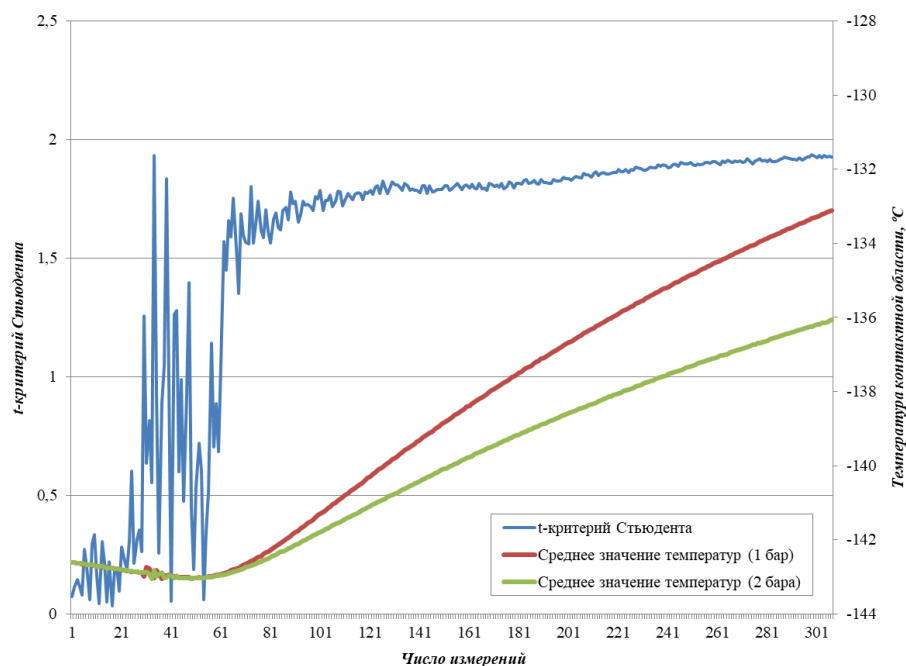


Рис. 6. График результатов метрологической оценки значимости результатов

Максимальное значение t -критерия Стьюдента составило 1,937 при контрольном значении 1,812, которое соответствует уровню статистической значимости $p = 0,1$ и количеству степеней свободы объединенной выборки $f = 10$.

Опираясь на t -критерий Стьюдента, можно резюмировать, что с 92% вероятностью можно отказаться от нулевой гипотезы и принять альтернативную гипотезу о существовании зависимости между давлением и процессом стабилизации температур.

С учетом предельного уровня статистической значимости, для выявления выраженной закономерности требуется уточнение плана последующих испытаний.

Проведенные исследования позволили оценить текущую статистическую мощность выборки, которая составила 74%, что близко к общепринятому значению мощности в 80%. Для улучшения уровня статистической значимости до $p = 0,01$ с сохранением мощности в 80% в дальнейшем потребуется проведение 32 повторений опытов (16 для давления 1 бар, 16 для давления 2 бара). План экспериментов с подобным количеством повторений минимизирует шанс получения ошибок I и II рода.

С учетом предельного уровня статистической значимости, для выявления выраженной закономерности требуется уточнение плана последующих испытаний.

Проведенные исследования позволили оценить текущую статистическую мощность выборки, которая составила 74%, что близко к общепринятому значению мощности в 80%. Для улучшения уровня статистической значимости до $p = 0,01$ с сохранением мощности в 80% в дальнейшем потребуется проведение 32 повторений опытов (как минимум 16 для давления 1 бар, 16 для давления 2 бара).



Рис. 7. «Шум» в момент установки прибора на место контакта



Выводы

В рамках проверки гипотезы возможности измерения давления жидкости через стенку трубопровода, было сделано следующее:

- разработан испытательный стенд, моделирующий гидравлическую систему, с возможностью задания различных режимов работ;
- разработан эволюционный прототип устройства;
- проведены экспериментальные исследования влияния давления на динамические характеристики тепловых процессов, протекающих в гидравлических системах.

Собранные в ходе экспериментов данные изучены, с большой долей вероятности гипотеза подтверждена.

В дальнейшем планируется усовершенствовать экспериментальный стенд и модель прототипа устройства, провести ряд экспериментов.

Библиографический список

1. Акимов И.С. Влияние экспериментальных технологий измерения давления на производство и перспективы энергосбережения // Научный вектор в АТР: Мат-лы межд. научн.-практ. конф. мол. уч. Чита: ЗабГУ, 2022. С. 7-11. EDN: [NMDSKR](#).
2. Кожаева К.В., Шарнина Г.С. Врезки и перекрытия: повышение надежности работ на магистральных трубопроводах под давлением // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2021. № 3 (111). С. 94-98. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/transportirovka/672078-vrezki-i-perekrytiya-povyshenie-nadezhnosti-rabot-na-magistralnykh-truboprovodakh-pod-davleniem/>
3. Артемова Д.В. Исследование негерметичности протяженной вакуумной магистрали по показаниям манометрических датчиков // Молодежный научно-технический вестник. 2013. № 3. С. 14. EDN: [QOSBOB](#).
4. Патент 2470274 РФ, МПК G01L11/00. Способ и устройство для измерения давления внутри трубопроводов / Балакин Р. А., Тимец В. М. (РФ). – 2011132209/28, заявл. 29.07.2011; опубл. 20.17.2012, Бюл. № 35. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2470274
5. Патент 2098782 РФ, МПК G01L9/04. Способ измерения давления в действующем трубопроводе / Горская В.Я., Самойлов Б.В., Бусыгин Г.Н., Некрасова А.П. (РФ). – 96118163/28, заявл. 10.09.1996; опубл. 10.12.1997. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2098782
6. Measurement of fluid pressure through the pipeline wall in heat and power processes / M. Kobylkin, Y. Rikker, A. Batukhtin, I. Akimov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 070(1). P. 012041. DOI: [10.1088/1755-1315/1070/1/012041](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012041).
7. Кобылкин М.В., Риккер Ю.О., Акимов И.С. Измерение давления жидкости через стенку трубопровода // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: Мат-лы XXII Межд. научн.-практ. конф. В 2-х ч. Ч. 1. Чита: ЗабГУ, 2022. С. 208-216. EDN: [YLOYXM](#).
8. Первичные стендовые испытания прибора для измерения давления / М.В. Кобылкин, И.С. Акимов, Ю.О. Риккер, З.Г. Дарбинян // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: Мат-лы XXII Межд. научн.-практ. конф. В 2-х ч. Ч. 1. Чита: ЗабГУ, 2022. С. 216-221. EDN: [BZVJCI](#).
9. Water Pressure Measurement Inside a Hydrocarbon Column / T. Rolfsvåg, C. Lindsay, J. Zutta et al // SPE Norway One Day Seminar. Bergen (Norway): Society of Petroleum Engineers, 2019. P. SPE-195639-MS. DOI: [10.2118/195639-MS](https://doi.org/10.2118/195639-MS).
10. High-Precision Large-Range Optical Fiber Interferometric Piezometer and Its Wideband Interferometry for Water Pressure Measurement / S. Wang, Y. Yang, J. Cao, L. Zhang // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2022. Vol. 71. P. 7001613. DOI: [10.1109/TIM.2021.3139699](https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3139699).
11. Improving Water Pressure Measurement Using Temperature-Compensated Wireless Passive SAW Bidirectional RDL Pressure Sensor / Z. Tang, W. Wu, J. Gao, P. Yang et al // IEEE Transactions on



- Instrumentation and Measurement. 2021. Vol. 71. P. 9505111. DOI: [10.1109/TIM.2021.3120146](https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3120146).
12. Как оценить статистическую значимость [Сайт]: wikiHow. URL: <https://ru.wikihow.com/оценить-статистическую-значимость> (дата обращения: 16.06.2023).
 13. Методика анализа фактического технического состояния скважинного насосного оборудования / В.В. Ивашечкин, В.И. Крицкая, В.Н. Ануфриев, О.А. Аврутин // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 3. С. 275-286. EDN: [ZODDKF](https://www.edn.ru/ZODDKF). DOI: [10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286](https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286).
 14. Лазичев А.А., Самулеева Ю.А. Система автоматизированной настройки манометров с помощью нанесения шкал // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 8. С. 35-38. EDN: [ITIDUZ](https://www.edn.ru/ITIDUZ).
 15. Кораблев В.А., Макаров Д.С. Электронный манометр для исследования теплогидравлических процессов при пониженных давлениях // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 31. С. 94-96. EDN: [IUFLDV](https://www.edn.ru/IUFLDV).

References

1. Akimov, I. S. (2022). Vliyanie eksperimental'nyh tekhnologij izmereniya davleniya na proizvodstvo i perspektivy energosberezheniya [Impact of experimental pressure measurement technologies on production and energy saving prospects]. In *Proc. of the International Sc. and Prac. Conf "Scientific vector in the Asia-Pacific region"* (pp. 7-11). ZabGU. <https://www.elibrary.ru/nmdskr> [In Russian]
2. Kozhaeva, K. V., & SHarnina, G. S. (2021). Vrezki i perekrytiya: povyshenie nadezhnosti rabot na magistral'nyh truboprovodov pod davleniem [Taps and overlaps: improving the reliability of work on main pipelines under pressure]. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU*, 3 (111). 94-98. <https://magazine.neftegaz.ru/articles/transportirovka/672078-vrezki-i-perekrytiya-povyshenie-nadezhnosti-rabot-na-magistralnykh-truboprovodakh-pod-davleniem/> [In Russian]
3. Artemova, D. V. (2013). Issledovanie negermetichnosti protyazhennoj vakuumnoj magistrali po pokazaniyam manometricheskikh datchikov [Investigation of leaks in an extended vacuum line according to the readings of manometric sensors]. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskij vestnik*, 3, 14. <https://www.elibrary.ru/qosbob> [In Russian]
4. Balakin, R. A., & Timec, V. M. (2012). *Patent RU 2470274, Sposob i ustrojstvo dlya izmereniya davleniya vnuti truboprovodov* [Method and device for measuring pressure inside pipelines]. https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2470274. [In Russian]
5. Gorskaya, V. YA., Samojlov, B. V., Busygin, G. N., & Nekrasova, A. P. (1997) *Patent RU 2098782, Sposob izmereniya davleniya v deystvuyushchem truboprovode* [Method for measuring pressure in an operating pipeline]. https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2098782. [In Russian]
6. Kobylkin. M. V., Rikker, Yu. O., Batukhtin, A. G., & Akimov, I. S. (2022). Measurement of fluid pressure through the pipeline wall in heat and power processes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 070(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012041>
7. Kobylkin. M. V., Rikker, Yu. O., & Akimov, I.S. (2022). Izmerenie davleniya zhidkosti cherez stenku truboprovoda [Liquid pressure measurement through the pipe wall]. In *Proc. of the 22st International Sc. and Prac.Conf. "Kulagin Readings: Technique and Technology of Production Processes"* (Vol. 1, pp. 208-216). ZabGU. <https://www.elibrary.ru/yloyxm>. [In Russian]
8. Kobylkin. M. V., Akimov, I. S., Rikker, Yu. O., & Darbinyan, Z. G. (2022). Pervichnye stendovye ispytaniya pribora dlya izmereniya davleniya [Primary bench tests of a pressure measuring device]. In *Proc. of the 22st International Sc. and Prac.Conf. "Kulagin Readings: Technique and Technology of Production Processes"* (Vol. 1, pp. 216-221). ZabGU. <https://www.elibrary.ru/bzvici> [In Russian]



9. Rolfsvag, T. A., Lindsay, C., Zuta, J., Vatne, K. O., Lohne, A., Iversen, J. A., Guo, Y., Askarinezhad, R., Undheim, E., Gudmestad, T. & Bye, A (2019). Water Pressure Measurement Inside a Hydrocarbon Column: *Proc. of the SPE Norway One Day Seminar: Society of Petroleum Engineers*. SPE-195639-MS. <https://doi.org/10.2118/195639-MS>.
10. Wang, S., Yang, Y., Cao, J., & Zhang, L. (2022). High-Precision Large-Range Optical Fiber Interferometric Piezometer and Its Wideband Interferometry for Water Pressure Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 7001613. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2021.3139699>
11. Tang, Z., Wu, W., Gao, J., Yang, P., Hussain, A., Luo, J., Tao, R., Fu, C., & Li, T. (2021). Improving Water Pressure Measurement Using Temperature-Compensated Wireless Passive SAW Bidirectional RDL Pressure Sensor, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, P. 9505111. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2021.3120146>.
12. Ruff B. (2023, February 6). *How to Assess Statistical Significance*. WikiHow's. <https://www.wikihow.com/Assess-Statistical-Significance>.
13. Ivashechkin, V. B., Kritskaia, V. I., Anufriev, V. N., & Avrutin, O. A. (2021). Metodika analiza fakticheskogo tekhnicheskogo sostoyaniya skvazhinnogo nasosnogo oborudovaniya [Methodology for analyzing the actual technical condition of downhole pumping equipment]. *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG*, 64(3), 275-286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286> [In Russian]
14. Lazichev, A. A., & Samuleeva, Yu. A. (2008). Sistema avtomatizirovannoj nastrojki manometrov s pomoshch'yu naneseniya shkal [System for automated setting of pressure gauges using application]. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*, 17, 35-38. <https://www.elibrary.ru/jtiduz> [In Russian]
15. Korablev, V. A., & Makarov, D. S. (2006). Elektronnyj manometr dlya issledovaniya teplogidravlicheskih processov pri ponizhennyh davleniyah [Electronic manometer for studying thermal-hydraulic processes at low pressures]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 31, 94-96. <https://www.elibrary.ru/jufl dv> [In Russian]

Сведения об авторах

Кобылкин Михаил Владимирович, кандидат технических наук, Забайкальский государственный университет, кафедра Энергетики, mikhail.kobylkin@yandex.ru, ORCID [0000-0002-8020-9394](https://orcid.org/0000-0002-8020-9394).

Риккер Юлия Олеговна, старший преподаватель, Забайкальский государственный университет, кафедра Энергетики, yrikker@mail.ru, ORCID [0000-0003-2376-6239](https://orcid.org/0000-0003-2376-6239).

Акимов Илья Сергеевич, Забайкальский государственный университет, кафедра Энергетики, armorshield61@gmail.com.

Authors about

Mikhail Vladimirovich Kobylkin, Cand. of Tech. Sciences, Transbaikal state university, department of Energy, mikhail.kobylkin@yandex.ru, ORCID [0000-0002-8020-9394](https://orcid.org/0000-0002-8020-9394).

Yuliya Olegovna Rikker, Transbaikal state university, department of Energy, yrikker@mail.ru, ORCID [0000-0003-2376-6239](https://orcid.org/0000-0003-2376-6239).

Il'ya Sergeevich Akimov, Transbaikal state university, department of Energy, armorshield61@gmail.com.



ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ РЕКУПЕРАЦИЯ ТЕПЛОТЫ В ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКЕ**Поляков М.В., Попов С.К.**

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва

Аннотация

Природный газ с каждым годом завоевывает все большую долю в общемировом топливном балансе. Страны, в которых доступен дешевый природный газ, стремятся повысить эффективность его использования с целью повышения объемов его использования. Одним из наиболее перспективных методов повышения эффективности природного газа является рекуперация теплоты газовых отходов. Предметом исследования является газотурбинная установка в силу того, что количество электростанций с газовыми турбинами имеет тенденцию к росту. В данной работе исследованы варианты повышения эффективности использования природного газа в газотурбинной установке при неизменном его расходе. Рассмотрены варианты внедрения термохимической рекуперации теплоты газовых отходов на основе паровой конверсии метана и термической рекуперации теплоты газовых отходов на основе генерации пара. Приведены результаты исследования, основанного на математической модели газотурбинной установки с применением термической и термохимической рекуперации теплоты газовых отходов.

Проведен конструктивный расчет реактора паровой конверсии природного газа. Определены конструктивные и режимные параметры теплообменника. Разработана 3D-модель реактора конверсии, обеспечивающая высокую газоплотность и возможность температурного удлинения теплообменных труб.

Ключевые слова: природный газ, топливоиспользование, повышение эффективности, термическая рекуперация, математическая модель, реактор конверсии, 3D-модель

THERMOCHEMICAL HEAT RECOVERY IN A GAS TURBINE PLANT**Mikhail Polyakov, Stanislav Popov**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow

Abstract

Natural gas every year wins an increasing share in the global fuel balance. Countries where cheap natural gas is available are seeking to increase the efficiency of its use in order to increase the volume of its use. One of the most promising methods for increasing the efficiency of natural gas is the heat recovery of gas waste. The subject of the study is a gas turbine plant due to the fact that the number of power plants with gas turbines tends to increase. In this paper, options for increasing the efficiency of using natural gas in gas turbines at a constant flow rate are investigated. Variants of implementation of thermochemical heat recovery of gas wastes based on steam reforming of methane and thermal heat recovery of gas wastes based on steam generation are considered. The results of a study based on a mathematical model of a gas turbine plant using thermal and thermochemical waste gas heat recovery are presented.

A constructive calculation of the methane steam reforming reactor has been carried out. The design and regime parameters of the heat exchanger are determined. A 3D-model of the conversion reactor has been developed, which provides high gas density and the possibility of thermal elongation of heat exchange tubes.

Keywords: natural gas, fuel use, efficiency improvement, thermal recovery, mathematical model, conversion reactor, 3D-model.



Введение

На долю природного газа приходится 24,2% общего объема мирового топливного баланса. Преимущества потребления природного газа перед другими топливно-энергетическими ресурсами формируют растущий спрос на потребление природного газа на всех континентах [1, 2]. Применение природного газа особо востребовано в энергетике для выработки тепловой и электрической энергии. Повышение эффективности использования природного газа в теплоэнергетической установке можно реализовать рекуперацией теплоты продуктов сгорания (газовых отходов).

Рекуперативный подогрев природного газа или воздуха, подаваемого на горение, имеют ограничения и могут привести к росту эмиссии NO_x [3]. Вместе с тем существует перспективный способ повышения эффективности использования природного газа – термохимическая рекуперация (ТХР) теплоты газовых отходов на основе конверсии (риформинга) природного газа [4]. Вследствие эндотермической переработки природного газа новое топливо – синтез-газ – характеризуется более высокой теплотой сгорания (в пересчете на 1 м³ исходного топлива), а также значительным количеством молекулярного водорода и монооксида углерода, сжигание которых сопровождается достаточно малой эмиссией NO_x . Следовательно, термохимическая рекуперация позволяет решать и экологические задачи [3].

Благодаря снижению расхода первичного топлива при переходе на ТХР выброс CO_2 в окружающую среду снижается, отчего уменьшается загрязнение окружающей среды [5, 6, 7]. Сжигание синтез-газа, полученного паровой конверсией метана, уменьшает выброс углекислого газа в окружающую среду на 19–21% по сравнению с сжиганием метана [8].

В период с 2013 по 2018 год доля электростанций с газовыми турбинами выросла с 54 до 69% от общего числа электростанций, работающих на ископаемом топливе, и имеет тенденцию к росту и в настоящее время. Ожидается, что газотурбинные установки будут занимать все большую долю рынка электроэнергии в развивающихся странах, где доступен дешевый природный газ [9]. Данный аспект усиливает актуальность повышения эффективности ГТУ.

Авторы работ [10–12] отмечают, что ГТУ с ТХР способны рекуперировать значительную долю теплоты газовых отходов. Показано [4], что применение ТХР в цикле ГТУ является предпочтительным вариантом по сравнению с термической рекуперацией (ТР). Включение ТХР в цикл ГТУ способно повысить КПД установки до 40% без применения дополнительной ТР и до 51% с применением ТР [13].

По итогам анализа схемы ПГУ [14] с применением парового риформинга метана суммарный КПД составил 62,8%, что на 5,7% больше, чем в аналогичной схеме ПГУ без применения ТХР. Установлено, что коэффициент рекуперации теплоты газовых отходов в ГТУ с ТХР может достичь уровня 0,693. Основываясь на том, что около 85% всей энергии вырабатывается в газотурбинном цикле и лишь 15% в паротурбинном, можно сделать вывод, что оптимизация газотурбинного цикла является более важной задачей, чем парового цикла.

Влияние режимных параметров на эффективность применения ТХР в ГТУ исследована в [8, 15, 16]. Установлено, что коэффициент рекуперации теплоты газовых отходов в ГТУ с ТХР может достичь уровня 0,693.

Включает существующее положение (современное состояние вопроса, почему необходимо проведение исследование, его актуальность для науки), цель работы (обязательно) и задачи работы (при необходимости).



Исследование математической модели ГТУ с ТХР

В статье [17] рассмотрен вопрос повышения эффективности топливоиспользования в газотурбинных установках посредством применения термохимической рекуперации теплоты газовых отходов. На основе принципиальной схемы ГТУ авторами разработана математическая модель в программной среде Aspen HYSYS, представленная на рис. 1.

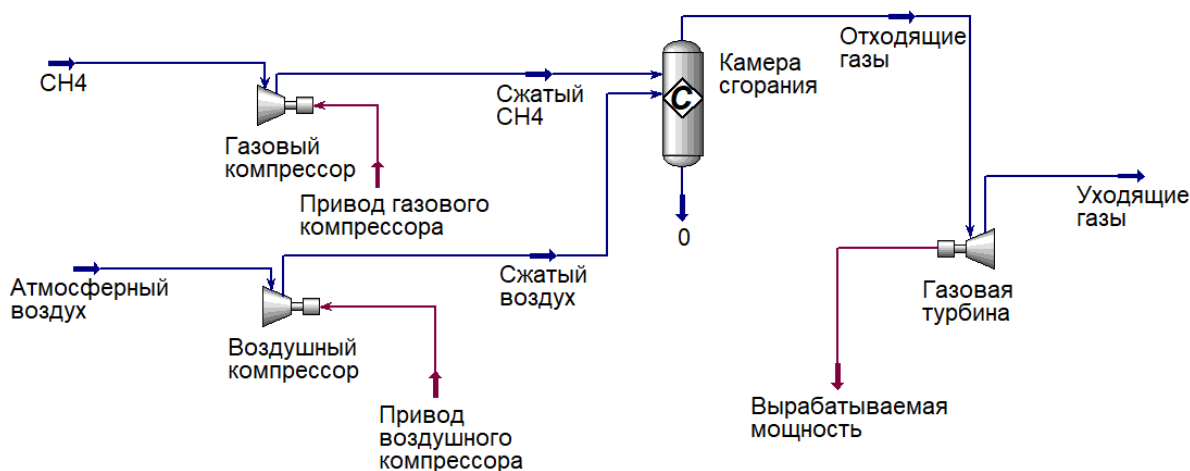


Рис. 1. Aspen-модель 1 (базовый вариант ГТУ)

Разработано и исследовано несколько вариантов повышения эффективности топливоиспользования в ГТУ. Один из них – вариант оснащения ГТУ системой термохимической рекуперации теплоты газовых отходов. Aspen-модель ГТУ с ТХР (модель 2) представлена на рис. 2.

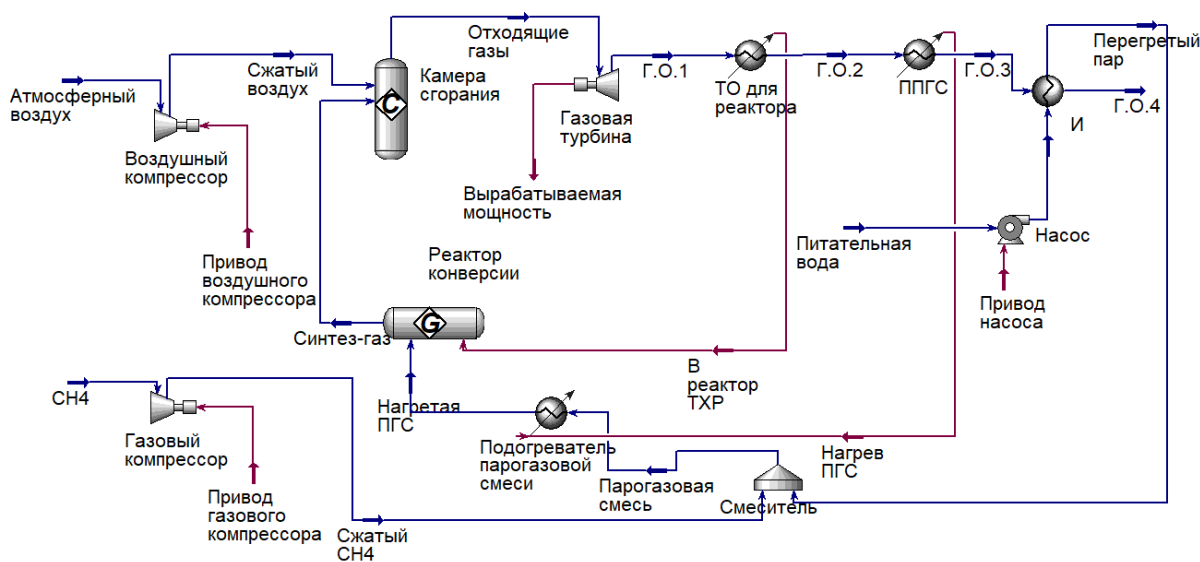


Рис. 2. Aspen-модель 2 (ГТУ с ТХР)

По тракту газовых отходов последовательно установлены реактор паровой конверсии (РК), подогреватель парогазовой смеси (ППГС), испаритель (И). Перегретый водяной пар с давлением 2,3 МПа, полученный в испарителе, смешивается с компримированным природным газом и подается в ППГС, откуда подогретая парогазовая смесь поступает в РК. Получаемый синтез-газ (конвертированный газ) поступает в камеру сгорания ГТУ.



Подобная схема рассматривалась в работах [4, 8, 16, 18]. Научную новизну имеет программная реализация модели ГТУ с ТХР в среде Aspen HYSYS. Данная программная среда дает возможность провести более детализированное и углубленное исследование энергетической эффективности разработанной математической модели с учетом затрат электроэнергии на собственные нужды.

Альтернативами данной схеме являются схемы с применением термической рекуперации теплоты газовых отходов на основе генерации пара. Перегретый пар подается на смешение с продуктами горения в камеру сгорания ГТУ. Принципиальным различием между двумя вариантами с ТР теплоты газовых отходов являются условия сопоставимости с вариантом ГТУ с ТХР:

- 1) расходы первичного топлива, воздуха и удельный массовый расход пара такие же, как в ГТУ с ТХР – Aspen-модель ГТУ с ТР (модель 3);
- 2) температура уходящих газов на выходе из ГТУ (за испарителем) такая же, как в ГТУ с ТХР – Aspen-модель ГТУ с ТР (модель 4).

Aspen-модель ГТУ с термической рекуперацией представлена на рис. 3.



Рис. 3. Aspen-модель ГТУ с термической рекуперацией
Результаты исследования вариантов ГТУ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры вариантов ГТУ

Вариант ГТУ	$W_{эл}$, кВт	$t_{y.г}$, °C
1. ГТУ (базовый вариант)	2512	619
2. ГТУ с ТХР (модель 2)	2729	515
3. ГТУ с термической рекуперацией (модель 3)	2597	536
4. ГТУ с термической рекуперацией (модель 4)	2619	515

Анализ данных, приведенных в табл. 1 по первым трем вариантам, приводит к выводу, что применение ТХР по сравнению с термической рекуперацией обеспечивает более эффективное топливоиспользование: наблюдается максимум электрической мощности ГТУ нетто и минимум температуры уходящих газов. Это объясняется тем, что при ТХР теплота газовых отходов расходуется не только на нагрев теплоносителей, но и на эндотермическую переработку природного газа, повышая химически связанную энергию топлива и тем самым обеспечивая более глубокое охлаждение газовых



отходов. Именно поэтому в ГТУ с ТХР (вариант 2) наблюдается самая низкая температура уходящих газов по сравнению с вариантами 1 и 3 (см. табл. 1).

Разработка конструкции реактора конверсии

Выполнен конструктивный расчет реактора конверсии (РК) природного газа, входящего в состав тепловой схемы ГТУ с ТХР (см. рис. 2). Горячий (греющий) теплоноситель – газовые отходы на выходе из газовой турбины, холодный (нагреваемый) теплоноситель – парогазовая смесь (ПГС), конвертируемая в синтез-газ.

Принимается, что реактор конверсии – кожухотрубчатый рекуперативный теплообменник, в котором ПГС движется внутри труб, а газовые отходы омывают трубы снаружи. Схема движения теплоносителей представлена на рис. 4. Переток ПГС из одного хода в другой осуществляется при помощи колен.

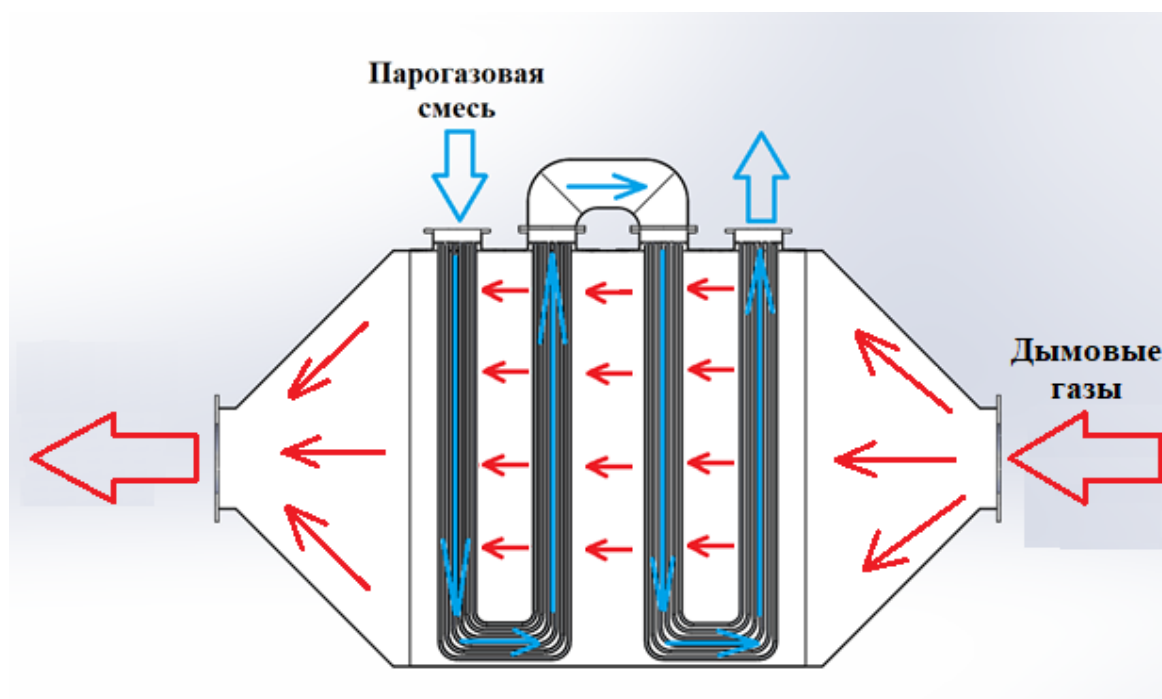


Рис. 4. Схема движения теплоносителей

В результате исследования Aspen-модели ГТУ с ТХР (модель 2) получены данные, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Параметры модели ГТУ с ТХР

Величина	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Температура ПГС до РК	$t'_{\text{ПГС}}$	°C	400
Температура синтез-газа после РК	$t''_{\text{СТ}}$	°C	583
Массовый расход ПГС	$G_{\text{ПГС}}$	кг/ч	859
Давление ПГС	$P_{\text{ПГС}}$	МПа	2,3
Температура газовых отходов до РК	$t'_{\text{ГО}}$	°C	626
Температура газовых отходов после РК	$t''_{\text{ГО}}$	°C	580
Массовый расход газовых отходов	$G_{\text{ГО}}$	кг/ч	18860
Давление газовых отходов	$P_{\text{ГО}}$	МПа	0,1
Тепловой поток от газовых отходов	$Q_{\text{ГО}}$	кВт	292

Тепловой поток Q от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку описывается уравнением теплопередачи

$$Q = k \cdot F_{\text{то}} \cdot \Delta t_{\text{ср}},$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $F_{\text{то}}$ – площадь поверхности теплообмена, м²; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средний логарифмический температурный напор, °С, для противоточной схемы вычисляемый по формуле

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(t''_{\text{го}} - t'_{\text{пгс}}) - (t'_{\text{го}} - t''_{\text{сг}})}{\ln \frac{t''_{\text{го}} - t'_{\text{пгс}}}{t'_{\text{го}} - t''_{\text{сг}}}} = \frac{(580 - 400) - (626 - 583)}{\ln \frac{580 - 400}{626 - 583}} = 96^\circ\text{C}.$$

При коридорном расположении труб выбрано по потоку газовых отходов – 6 рядов, в поперечном направлении – 9 рядов. Согласно методике [19], скорость движения ПГС внутри труб $\omega_{\text{пгс}} = 1,977$ м/с при внутреннем диаметре труб 20 мм.

Итерационным методом определены конструктивные параметры теплообменника (табл. 3), его теплотехнические характеристики.

Таблица 3

Габаритные размеры РК

Величина	Значение
Ширина рабочей части РК, мм	552
Высота рабочей части РК, мм	2460
Общая длина рабочей части труб с ПГС, мм	8836
Длина одного хода без учета U-образного участка, мм	2209
Количество ходов по ПГС	4

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при поперечном омывании коридорного пучка труб [20]

$$\alpha_{\text{го}} = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{го}}}{d_{\text{нап}}} \right) \cdot \left(\omega_{\text{го}} \cdot \frac{d_{\text{нап}}}{\nu_{\text{дг}}} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}_{\text{дг}}^{0,33} = 194 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны парогазовой смеси определяется для условий конвекции при продольном обтекании поверхности нагрева однофазным турбулентным потоком при давлении и температуре, далеких от критических, по формуле М.А. Михеева [21, 22]

$$\alpha_{\text{пгс}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\text{пгс}}}{d_{\text{вн}}} \cdot \text{Re}_{\text{пгс}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{пгс}}^{0,4} \cdot C_d \cdot C_t \cdot C_l = 112 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Коэффициент теплопередачи (без учета термического сопротивления стенки)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{го}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{пгс}}}} = \frac{1}{\frac{1}{194} + \frac{1}{112}} = 71 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Площадь поверхности теплообмена

$$F_{\text{то}} = \frac{Q_{\text{го}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{292 \cdot 10^3}{71 \cdot 96} = 42,7 \text{ м}^2.$$

Скриншот 3D-модели реактора конверсии представлен на рис. 5.



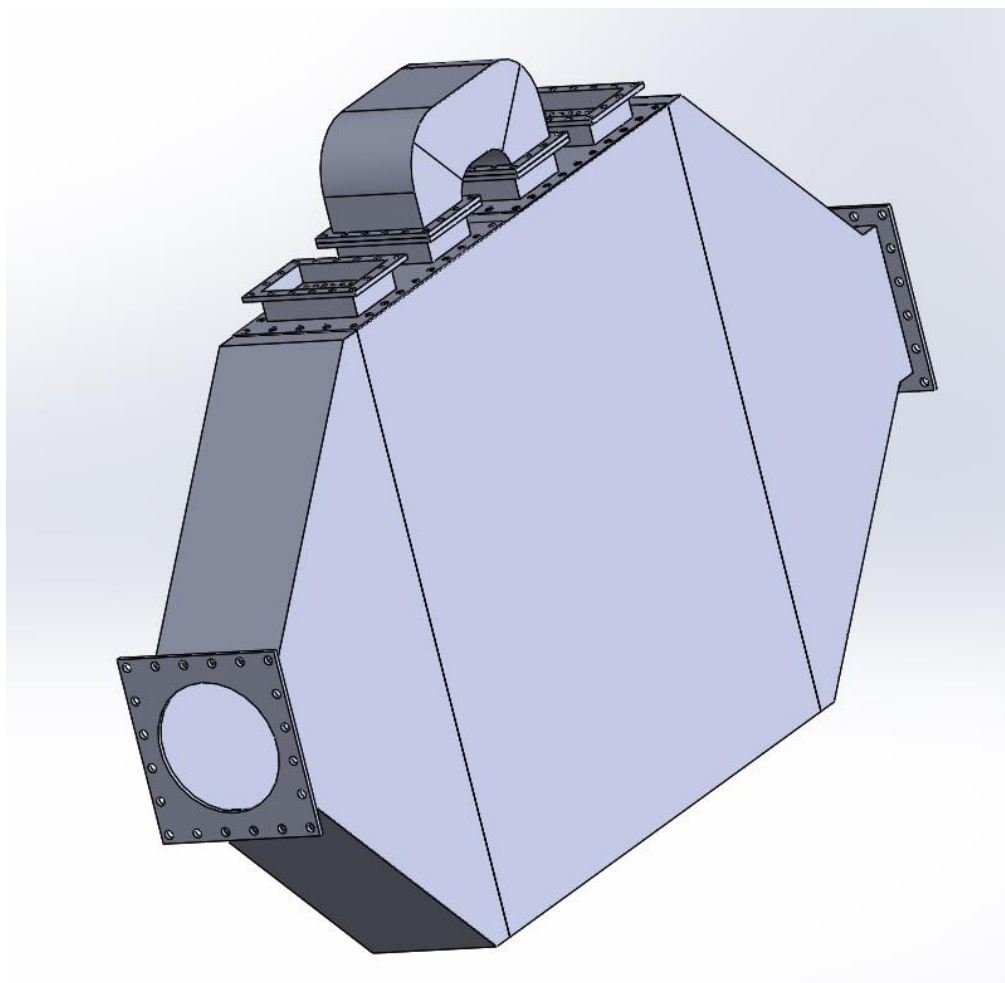


Рис. 5. Скриншот 3D-модели реактора конверсии

Потери давления в реакторе конверсии составляют: по потоку холодного теплоносителя – 387 Па, по потоку горячего теплоносителя – 653 Па [23, 24].

Выводы

Цикл ГТУ с ТХР дает наибольший эффект по сравнению с альтернативными вариантами, использующими термическую рекуперацию теплоты газовых отходов. Ожидаемый прирост выработки электрической мощности нетто по сравнению с базовым вариантом составляет 8,62%, удельный расход условного топлива снижается с 0,292 кг у.т/(кВт·ч) до 0,269 кг у.т/(кВт·ч). Полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейшей разработки задачи включения термохимической рекуперации в газотурбинный цикл.

Результаты конструктивного расчета и 3D-моделирования реактора паровой конверсии на газовых отходах ГТУ позволяют сделать вывод о реализуемости данного теплообменника. Его площадь теплообмена составляет 42,7 м² при потерях давления 387 Па и 653 Па по потокам холодного и горячего теплоносителей соответственно. Разработанный вариант конструкции реактора конверсии обеспечивает высокую газоплотность за счет шпилечного соединения секций U-образных теплообменных труб с корпусом реактора, а также возможность термических удлинений теплообменных труб.

Библиографический список

1. Смена парадигмы на мировом энергетическом рынке / В.В. Бессель, В.Г. Кучеров, А.С. Лопатин, В.Г. Мартынов // Газовая промышленность. 2017. № 4 (751). С. 28–33. EDN: [YKMINH](#).
2. Дзюба А.П. Роль сжиженного природного газа в мировом энергетическом балансе // Инновационная экономика. 2021. № 1. С. 59–74. EDN: [LPLYXQ](#).
3. Носач В.Г., Шрайбер А.А. Повышение экономичности и экологических характеристик газотурбинных установок за счет термохимической регенерации // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33. № 1. С. 46–50. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60300>
4. Носач В.Г. Энергия топлива. Киев: Наукова думка, 1989. 148 с.
5. Носач В.Г., Шрайбер А.А. Повышение эффективности использования биогаза в теплоэнергетических установках с помощью термохимической регенерации // Промышленная теплотехника. 2009. Т. 31. № 2. С. 57–63.
6. Transient performances of the gas turbine recuperating waste heat through hydrogen rich fuels / F. Pan, X. Cheng, X. Wu and oth. // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44, № 56. P. 29743–29751. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.099.
7. Галин А.К. Оценка состояния рынка газотурбинных установок // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 36. С. 1307–1311.
8. Cappelletti A., Martelli F. Investigation of a pure hydrogen fueled gas turbine burner // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, № 15. P. 10513–10523. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.104>.
9. OH*-chemiluminescence during autoignition of hydrogen with air in a pressurised turbulent flow reactor / A. Schönborn, P. Sayad, A.A. Konnov, J. Klingmann // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39, № 23. P. 12166–12181. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.157>.
10. Preliminary study on lean premixed combustion of ammonia-hydrogen for swirling gas turbine combustors / A. Valera-Medina, D.G. Pugh, P. Marsh and oth. // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, № 38. P. 24495–24503. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.028>.
11. Носач В.Г., Шрайбер А.А. Повышение эффективности использования природного газа в теплоэнергетике с помощью термохимической регенерации // Промышленная теплотехника. 2009. Т. 31. № 3. С. 42–50. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60782>.
12. Носач В.Г., Шрайбер А.А. Повышение эффективности газотурбинных установок за счет совместного использования термохимической и паровой регенерации // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33. № 2. С. 46–49. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60317>.
13. Pashchenko D. Energy optimization analysis of a thermochemical exhaust gas recuperation system of a gas turbine unit // Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 171. P. 917–924. DOI: [10.1016/j.enconman.2018.06.057](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.057).
14. Pashchenko D. Performance evaluation of a combined power generation system integrated with thermochemical exhaust heat recuperation based on steam methane reforming // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Т. 48. №. 15. С. 5823–5835. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2022.11.186](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.186).
15. Verkhivker G., Kravchenko V. The use of chemical recuperation of heat in a power plant // Energy. 2004. Vol. 29. P. 379–388. DOI: [10.1016/j.energy.2003.10.010](https://doi.org/10.1016/j.energy.2003.10.010).
16. Свистунов И.Н. Повышение энергетической эффективности плавильных и нагревательных установок на основе конверсии природного газа: Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. М., 2017. 20 с.
17. Поляков М.В., Попов С.К. Повышение эффективности использования природного газа в газотурбинных установках посредством термохимической рекуперации // Промышленная энергетика. 2023. № 2. С. 23–31. EDN: [JGCSDO](#). DOI: [10.34831/EP.2023.44.76.004](https://doi.org/10.34831/EP.2023.44.76.004).
18. Olmsted J.H., Grimes P.G. Heat engine efficiency enhancement through chemical recovery of waste heat // 7th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. San Diego: ACS, 1972. P. 241–248.
19. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. М.: Металлургия, 1975. 296 с.



20. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод / Под ред. Н. В. Кузнецова и др. М.: Энергия, 1973. 295 с.
21. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. М.: Машиностроение, 1989. 368 с.
21. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов. Изд. 3-е перераб. и доп. М.: Энергия. 1975. 488 с.
22. Расчет кожухотрубных теплообменных аппаратов: Учеб. пособие / А.Б. Гаряев, Е.П. Валуева, А.Ю. Маскинская, О.Е. Прун. М.: Изд-во МЭИ, 2019. 84 с.
23. Мочан С.И. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод). М.: Энергия, 1977. 256 с.

Библиографический список (APA)

1. Bessel, V. V., Kucherov, V. G., Lopatin, A. S., & Martynov, V. G. (2017). Smena paradigmy na mirovom energeticheskom rynke [A paradigm shift in the global energy market]. *Gazovaya promyshlennost*, 4(751), 28–33. [In Russian]
2. Dzyuba, A. P. (2021). Rol szhizhennogo prirodnogo gaza v mirovom energeticheskom balance [The role of liquefied natural gas in the global energy balance]. *Innovacionnaya ekonomika*, 1, 59–74. <https://www.elibrary.ru/lplyxq> [In Russian]
3. Nosach, V. G., & Shrajber, A. A. (2011). Povyshenie ekonomichnosti i ekologicheskikh harakteristik gazoturbinnnykh ustanovok za schet termohimicheskoy regeneracii [Improving the efficiency and environmental performance of gas turbine plants due to thermochemical regeneration]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 33(1), 46–50. [In Russian]
4. Nosach, V. G. (1989). *Energiya topliva [Fuel energy]*. Izd-vo Naukova dumka. [In Russian]
5. Nosach, V. G., & Shrajber, A. A. (2009). Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya biogaza v teploenergeticheskikh ustanovkakh s pomoshchyu termohimicheskoy regeneracii [Increasing the efficiency of biogas use in thermal power plants using thermochemical regeneration]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 31(2), 57–63. [In Russian]
6. Pan, F., Cheng, X., Wu, X., Wang, X., & Luo, P. (2019). Transient performances of the gas turbine recuperating waste heat through hydrogen rich fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(56), 29743–29751. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.099.
7. Galin, A. K. (2021). Ocenka sostoyaniya rynka gazoturbinnnykh ustanovok [Assessment of the state of the gas turbine market]. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie*, 36, 1307–1311. [In Russian]
8. Cappelletti, A., & Martelli, F. (2017). Investigation of a pure hydrogen fueled gas turbine burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 10513–10523. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.104>.
9. Schönborn, A., Sayad, P., Konnov, A. A., & Klingmann, J. (2014). OH*-chemiluminescence during autoignition of hydrogen with air in a pressurised turbulent flow reactor. *International journal of hydrogen energy*, 39(23), 12166–12181. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.157>.
10. Valera-Medina, A., Pugh, D. G., Marsh, P., Bulat, G., & Bowen, P. (2017). Preliminary study on lean premixed combustion of ammonia-hydrogen for swirling gas turbine combustors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 24495–24503. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.028>.
11. Nosach, V. G., & Shrajber, A. A. (2009). Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya prirodnogo gaza v teploenergetike s pomoshchyu termohimicheskoy regeneracii [Increasing the Efficiency of Using Natural Gas in the Heat and Power Industry Using Thermochemical Regeneration]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 31(3), 42–50. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60782>. [In Russian]
12. Nosach, V. G., & Shrajber, A. A. (2011). Povyshenie effektivnosti gazoturbinnnykh ustanovok za schet sovmestnogo ispolzovaniya termohimicheskoy i parovoy regeneracii [Improving the efficiency of gas turbine plants through the combined use of thermochemical and steam regeneration]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 33(2), 46–49. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60317>. [In Russian]



13. Pashchenko, D. (2018). Energy optimization analysis of a thermochemical exhaust gas recuperation system of a gas turbine unit. *Energy Conversion and Management*, 171, 917–924. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.057>
14. Pashchenko, D. (2023). Performance evaluation of a combined power generation system integrated with thermochemical exhaust heat recuperation based on steam methane reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(15), 5823–5835. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.186>.
15. Verkhivker, G., & Kravchenko, V. (2004). The use of chemical recuperation of heat in a power plant. *Energy*, 29(3), 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2003.10.010>
16. Svistunov, I. N. (2017). Povyshenie energeticheskoy effektivnosti plavilnyh i nagrevatelnyh ustanovok na osnove konversii prirodnogo gaza [Increasing the Energy Efficiency of Melting and Heating Plants Based on Natural Gas Conversion]. *Extended abstract of candidate's thesis*. MPEI. [In Russian]
17. Polyakov, M. V., & Popov, S. K. (2023). Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya prirodnogo gaza v gazoturbinnnyh ustanovkakh posredstvom termohimicheskoy rekuperacii [Increasing the Efficiency of Natural Gas Use in Gas Turbine Plants through Thermochemical Recovery]. *Promyshlennaya energetika*, 2, 23–31. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.44.76.004>. [In Russian]
18. Olmsted, J. H., & Grimes P. G. (1972). Heat engine efficiency enhancement-through chemical recovery of waste heat. In *Proc. of the Seventh Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* (pp. 241-248). ACS.
19. Tebenkov, B. P. (1975). *Rekuperatory dlya promyshlennyh pechej* [Heat exchangers for industrial furnaces]. Metallurgiya. [In Russian]
20. Kuznecov, N. V. et al (Eds.). (1973). *Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov* [Thermal calculation of boiler units]. Energiya. [In Russian]
21. Bazhan, P. I., Kanevec, G. E., & Seliverstov, V. M. (1989). *Spravochnik po teploobmennym apparatam* [Handbook of heat exchangers]. Mashinostroenie. [In Russian]
22. Isachenko, V. P., Osipova, V. A., & Sukomel, A. S. (1975). *Teploperedacha. Uchebnik dlya vuzov* [Heat transfer. Textbook for universities] (3rd ed.). Energiya. [In Russian]
23. Garyaev, A. B., Valueva, E. P., & Maskinskaya, A. U. (2019). *Raschet kozhuhotrubnyh teploobmennyyh apparatov: Ucheb. posobie* [Calculation of shell-and-tube heat exchangers: Tutorial]. MPEI. [In Russian]
24. Mochan, S. I. (1977). *Aerodinamicheskij raschet kotelnyh ustanovok (normativnyj metod)* [Aerodynamic calculation of boiler plants (normative method)]. Energiya. [In Russian]

Сведения об авторах

Поляков Михаил Валерьевич, студент ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва.
E-mail: mikle2000@mail.ru.

Попов Станислав Константинович, д-р техн. наук, профессор кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва.

Authors about

Mikhail Valerievich Polyakov, student of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow.
E-mail: mikle2000@mail.ru.

Stanislav Konstantinovich Popov, Dr. of Tech. Sciences (DSc), Professor of the Dept. of Innovative Technologies for High-Tech Industries, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow.



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ELECTRIC POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING



ВЛИЯНИЕ ИНВЕРТОРНОГО РЕЖИМА ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Мятеж Т.В., Любченко В.Я., Могиленко Е.А.

НГТУ, г. Новосибирск

Аннотация

В последнее время особую актуальность принимают вопросы повышения экологичности технологических производств, повышения эксергетической составляющей и вопросы энергосбережения. Поэтому при организации и проектировании систем электроснабжения более правильным решением является применение инверторно-аккумуляторной резервной системы электроснабжения. Такая система обеспечит надежную и бесперебойную работу потребителей в здании. В работе рассмотрено решение задачи проектирования инверторного режима системы электроснабжения для подключения зарядной станции электромобилей к подстанции города Новосибирска. Подключенное зарядное устройство электромобиля, являясь нелинейной нагрузкой, приводит не только к увеличению нагрузки на электросетевую инфраструктуру, но может быть и источником электроснабжения. Также они могут быть причиной ухудшения качества электроэнергии за счет генерирования гармонических искажений. Поэтому особое внимание уделено влиянию инверторного режима зарядных станций электромобилей на качество электроснабжения потребителя в энергосистеме. Было выполнено имитационное моделирование зарядной станции с использованием программного пакета MATLAB Simulink.

Ключевые слова: инверторный режим, инвертор, ведомый сетью, энергосбережение, зарядная станция, электромобиль, эколого-экономический критерий, литий-титанатный аккумулятор, время заряда, ресурс батареи, температурный режим.

THE INFLUENCE OF THE INVERTER MODE OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS ON THE QUALITY OF CONSUMER POWER SUPPLY IN THE POWER SYSTEM

Tatiana Myatezh, Valentina Lyubchenko, Egor Mogilenko

Novosibirsk State Technological University, Novosibirsk

Abstract

Recently, issues of increasing the environmental friendliness of technological productions, increasing the exergetic component and energy saving issues have become particularly relevant. Therefore, when organizing and designing electrical supply systems, a more correct solution is the use of an inverter-battery backup power supply system. Such a system will ensure reliable and uninterrupted operation of consumers in the building. The paper considers the solution of the problem of designing the inverter mode of the power supply system for connecting the charging station of electric vehicles to the substation of the city of Novosibirsk. The connected charger of an electric vehicle, being a non-linear load, leads not only to an increase in the load on the power grid infrastructure, but can also be a source of power supply. They can also cause a deterioration in the quality of electricity due to the generation of harmonic distortion. Therefore, special attention is paid to the influence of the inverter mode of electric vehicle charging stations on the quality of power supply to the consumer in the power system. A simulation simulation of the charging station was performed using the MATLAB Simulink software package.



Keywords: *inverter mode, inverter driven by a network, energy saving, charging station, electric vehicle, ecological and economic criterion, lithium-titanium battery, charge time, battery life, temperature regime.*

Введение

Одним из действенных инструментов предотвращения потепления климата на Земле является широкомасштабное внедрение электромобилей, особенно в условиях мегаполиса. В среднем от электромобилей в два раза меньше выбросов CO₂, чем от автомобилей с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Кроме этого, следует отметить в качестве одного из важных стимулов внедрения электротранспорта, поддержку промышленной политики, в том числе политики инновационного развития страны.

Рынок электромобилей и зарядных станций развивается динамично: темпы прироста – до 80% ежегодно. К концу первого квартала 2021 года в России было зарегистрировано 12,4 тысячи электромобилей. В 2025 году ожидается увеличение продаж электромашин до объема 100 тысяч единиц. К 2030 году количество электромобилей достигнет 1,5 млн единиц [1, 2].

Основными барьерами для развития электромобилей в России являются их высокая стоимость и неразвитость сети заправочных станций. Актуальность проблемы подтверждается тем, что в марте 2022 года премьер-министр Михаил Мишустин подписал распоряжение, которым выделил около 1,37 млрд рублей на создание зарядной инфраструктуры для электротранспорта в России.

Следует отметить, что масштабный переход на использование электромобилей будет способствовать росту электропотребления. Кроме того, для снабжения энергией электромобилей необходимо создание соответствующей зарядной инфраструктуры с применением инверторного режима. Все это, в свою очередь, потребует ввода дополнительных энергетических мощностей и возможного изменения характера графика электрической нагрузки. Поэтому актуальными становятся вопросы организации инверторного режима зарядных станций электромобилей.

Современные тенденции показывают, что с повышением количества бюджетного предложения по электромобилям нужно конкурентно развивать публичную зарядную инфраструктуру – около торговых и бизнес-центров и жилых комплексов.

Повысить окупаемость зарядных станций позволяют умные сервисы, в первую очередь, снижающие стоимость технологического присоединения через динамическое распределение мощности между основным объектом и зарядной станцией, объединение с системами smartgrid и с региональными энергосистемами за счет организации инверторного режима для сети зарядных станций. Перспективной представляется технология V2G (Vehicle-to-Grid), позволяющая подключать автомобиль в общую энергосеть для своевременной подзарядки автомобиля или возвращения лишней электроэнергии обратно [3].

Наиболее перспективным вариантом построения автономных систем представляются зарядные станции электромобилей с применением инверторного режима, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с ветровыми, ветро-дизельными и ветро-фото-дизельными энергетическими установками, которым присущ стохастический характер выработки электроэнергии, что является их существенным недостатком. В штатном режиме работы, при малой потребляемой мощности, блок аккумуляторных батарей заряжается, чтобы в будущем, при возникновении каких-либо аварийных ситуаций, отдать накопленный заряд и поддержать работу энергетической установки до момента включения дизель-генератора.



При переходе к рыночной модели электроэнергетики, основанной на заключении двухсторонних договоров, производитель и потребитель могут меняться местами, т.е. потребитель, у которого образуется излишек электроэнергии может продавать ее в сеть. Это в свою очередь позволит решить проблему энергодефицитности отдельных регионов нашей страны, т.е. расширить «узкие места в электроснабжении». Технически это вопрос может быть реализован с использованием схемы инверторного режима.

Более того, перспектива применения инверторного режима позволяет решить ряд эколого-социальных задач, а также проблему энергосбережения.

Различают три основных класса систем непрерывного электроснабжения (СНЭС):

1. Системы «on-line». Это система, в которой инвертор работает постоянно. В нормальном режиме – от выпрямленной сети переменного тока, а в аварийном – от аккумуляторной батареи.

2. Источники резервированного питания «off-line». Инвертор включается при отклонениях напряжения сети за допустимые пределы или полном его отсутствии.

3. Гибридные, в которых обычные системы «on-line» дополняются устройствами, ограничивающими импульсные перенапряжения в сети переменного тока.

В данной статье реализована задача проектирования и организации инверторного режима зарядной станции, учитываемой как нагрузка системы электроснабжения (СЭС). Также учитывается ее влияние на качество электроэнергии в сети. В качестве объекта исследования выбрана подстанция Театральная города Новосибирска.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- проанализировать принципы работы зарядных станций электромобилей и основы организации их инверторного режима;
- выполнить анализ основных видов зарядных станций, а именно зарядные станции для заряда грузового транспорта, электробусов, автомобилей, а также их местоположению: для мегаполисов, на протяженных трассах за городом, для частного пользования (собственная), с точки зрения максимизации ресурса, и улучшения эксплуатационных показателей транспортного средства (ТС);
- спроектировать схему электроснабжения для организации инверторного режима и подключения зарядных станций электромобилей.
- провести анализ высших гармоник при ведении инверторного режима работы зарядной станции в пакете MATLAB Simulink на предмет качества электроснабжения.

В статье реализовано реверсирование работы инвертора для обеспечения возможности передачи электроэнергии от сети переменного тока к сети постоянного тока и обратно. Реверсирование позволяет постоянно поддерживать аккумуляторную батарею в работоспособном состоянии, одновременно обеспечивая возврат энергии в сеть переменного тока [4]. Помимо этого, достигается высокая безотказность электропитания ответственных потребителей на объектах различного назначения.

Организация инверторного режима зарядных станций для электромобилей

В настоящее время воздействие технологий на окружающую среду стало сопоставимо по своим масштабам с природными процессами. Поэтому для поддержания нормального экологического фона в мире требуется разработка технологий, дружественных по отношению к окружающей среде. Имеются существенные достижения по исследуемому вопросу как в отечественной, так и в зарубежной практике [5].

В статье это реализуется на примере организации инверторного режима для функционирования зарядных станций электромобилей.



Часто требуется настолько глубокое регулирование управляемых выпрямителей, что они переходят в качественно новый режим работы, характеризующийся встречным направлением тока относительно преобразованной ЭДС. Такой режим работы называется инверторным. В более широком смысле инвертор в преобразовательной технике – это устройство для преобразования постоянного тока в переменный [6].

Инверторный режим управляемого выпрямителя возможен только в тех преобразователях, у которых в цепи нагрузки имеется либо источник ЭДС, либо индуктивность, либо то и другое.

При угле управления вентилем, а более 90° среднее значение выпрямленного напряжения меняет знак и выпрямитель переходит в инверторный режим. В этом режиме большую часть работы вентиля его ток направлен против фазной ЭДС, и активная мощность из цепи нагрузки передается в анодные цепи преобразователя, т. е. в источник переменного тока.

Процесс инвертирования представляет собой преобразование постоянного тока, протекающего в нагрузке преобразователя, в переменный ток, протекающий в анодных цепях преобразователя [6].

По сравнению с традиционной схемой электроснабжения, которая предусматривает четкую градацию «производитель – потребитель», организация инверторного режима позволяет, позволяет реализовать:

1. Выравнивание нагрузок, т.е. обеспечение бесперебойного питания в случае потери напряжения от источника электроснабжения.
2. Обеспечивает более гибкое тарифообразование по сравнению с традиционной, сложившейся в регионах схеме установления цен на электроэнергию.
3. Улучшает экологическую обстановку в регионах, снимают социальную напряженность.
4. Способствует решению задач энергосбережения.

Можно привести примеры нескольких наиболее типичных устройств зарядной станции таких как, устройство бесперебойного электропитания многоканальное стабилизирующее, МПК 8 Н02J 7/34, зарядно-разрядный преобразователь ЗРП-150/50, двухкаскадный преобразователь напряжения с интеллектуальной защитой от режимов перегрузки и токов коротких замыканий и т.д.

Устройство бесперебойного электропитания многоканальное стабилизирующее, МПК 8 Н02J 7/34

Известно устройство бесперебойного электропитания (Патент РФ №2221320 (имя патентообладателя: Никитин И.Е., Бушуев В.М.).

Устройство содержит сетевой выпрямитель, выводами переменного тока подключенный к промышленной сети электроснабжения переменного тока, а выводами постоянного тока – к входным выводам зарядно-буферного преобразователя (ЗБП). Выходные выводы постоянного тока подключены к резервной аккумуляторной батарее и входам преобразователей напряжения (ПН) постоянного тока в постоянный.

ЗБП и ПН выполнены по схеме высокочастотного преобразования и состоят из инвертора, узла управления с ШИМ-регулятором и трансформаторно-выпрямительного узла (ТВУ), первичная обмотка трансформатора которого подключена к выводам переменного тока инвертора, а выходы постоянного тока ТВУ образуют выходные выводы устройства.

Недостатком данного устройства бесперебойного электропитания является то, что в нем не обеспечена возможность рекуперации энергии аккумуляторной батареи в питающую промышленную сеть переменного тока.



Зарядно-разрядный преобразователь ЗРП-150/50

Известен зарядно-разрядный преобразователь ЗРП-150/50, поставляемый обществом с ограниченной ответственностью «Элмашпром», представляющий собой трехфазный тиристорный реверсивный преобразователь, предназначенный для заряда, тренировочного заряда, формирования в режиме автоматического оптимального заряд-разряда аккумуляторных батарей.

В режиме разряда энергия, вырабатываемая аккумуляторными батареями, инвертируется в трехфазную питающую сеть 50 Гц, 380/220 В.

Недостатком данного зарядно-разрядного преобразователя является то, что переключение режимов работы преобразователя (заряд, тренировочный заряд, формирование аккумуляторных батарей в режиме автоматического заряд-разряда) производится вручную, что не позволяет обеспечить бесперебойность электропитания (при аварийном отключении питающей сети).

Двухкаскадный преобразователь напряжения с интеллектуальной защитой от режимов перегрузки и токов коротких замыканий

Известен двухкаскадный преобразователь напряжения (Патент РФ №2314621 на изобретение «Двухкаскадный преобразователь напряжения с интеллектуальной защитой от режимов перегрузки и токов коротких замыканий», МП К 8 Н02J 9/06).

Двухкаскадный преобразователь напряжения состоит: из первого канала преобразования напряжения основной сети напряжения постоянного тока с аккумуляторной батареей и из второго канала преобразования напряжения резервной сети напряжения постоянного тока с аккумуляторной батареей.

Главным недостатком данного устройства двухкаскадного преобразователя напряжения является то, что он не является реверсивным, так как в нем не обеспечена возможность передачи электроэнергии в питающую сеть постоянного тока и соответственно возможность заряда аккумуляторной батареи, подключенной к этой сети.

Особенностью предложенного в статье подхода является наличие двунаправленного автономного инвертора напряжения. Данное устройство предназначено для преобразования постоянного тока в переменный с протеканием энергии в одном из двух указанных направлений в соответствии с внутренним управляющим сигналом: от звена постоянного тока (АКБ) к звену переменного тока (разряд\генерация) и от звена переменного тока к звену постоянного тока.

Применение трехфазных автономных инверторов (АИН) в современных условиях. Как известно, трехфазные транзисторные инверторы применяются на практике для создания трехфазных сетей переменного тока на автономных объектах и для управления электродвигателями переменного тока. Из многообразия схемных решений трехфазных инверторов практическое применение находит лишь одна схема – мостовая, представленная на рис. 1. Здесь нагрузка соединена в звезду и подключена прямо к выходным зажимам А, В и С инвертора без трансформатора. Нагрузка может соединяться и в треугольник, а для согласования уровней напряжений инвертора и нагрузки могут использоваться три однофазных либо один трехфазный трансформатор, как и в обычных трехфазных системах переменного напряжения.

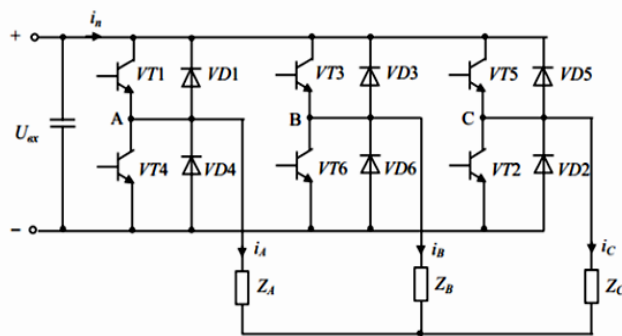


Рис. 1. Трехфазный мостовой инвертор напряжения

Электромагнитные процессы и характеристики инвертора определяются следующими факторами:

- 1) схемой соединения нагрузки – в звезду или в треугольник;
- 2) способом управления транзисторами – 180-градусное или 120-градусное управление;
- 3) характером нагрузки, который определяется коэффициентом:

$$K = \frac{R_H}{\omega} \cdot L_H \quad (1)$$

При 180-градусном управлении каждый из транзисторов находится в открытом состоянии 180°, пары транзисторов, образующих вертикальные стойки, как и в однофазных двухтактных схемах, работают в противофазе, управление вертикальными стойками транзисторов осуществляется со сдвигом на 120° [5].

При проектировании зарядных станций электромобилей необходимо учесть ряд требований, согласно Стандартам и ГОСТам, таким, как EN-61851-1, IEC 62196. Допустимые режимы зарядки описаны в разделе 1 стандарта IEC 62196, который определяет основные варианты [7]. Одним из основных стандартов для зарядных станций является IEC 61851-1-2013, определяющий общие требования как к сети, так и к преобразователям, входящим в состав зарядных станций. Классификация зарядных устройств согласно регламентным документам, а именно ряду стандартов ГОСТ МЭК, IEC, SAE приведена в табл. 1.

Таблица 1

Классификация зарядных устройств электромобилей

Уровни напряжения	Расположение и конфигурация ЗУ	Мощность, кВт	Время заряда, ч	Запас энергии (кВт·ч)	Тип коннектора
Уровень 1 120 В (США) 230 В (ЕС)	Бортовое однофазное	<3,7	11-36	16-50	SAE J1772 IEC 62196-2 Type 1
Уровень 2 240 В (США) 380 В (ЕС)	Бортовое однофазное или трехфазное	3,7-22	1-6	16-80	IEC 62196-2 Type 2 CHAdeMO
Уровень 3 240-600 В (США) 380-600 В (ЕС)	Стационарное постоянного тока	>50 <240	0,1-1	20-100	IEC 62196-2 «Hybrid» SAE J1772 «Hybrid» CHAdeMO

Сегодня цифровое общение реализовано только на зарядках третьего уровня. Интерфейс между зарядкой и авто работает примерно так: электромобиль говорит «я готов заряжаться, мне нужно 15 ампер», а зарядка определяет максимальное количество тока, которое авто может потребить. Тот же стандарт ISO15118 идет с функцией plug-in-charge, благодаря которой автомобиль сам авторизуется в системе, т.е. пользователю не обязательно проводить карточкой по зарядке, чтобы войти в свой аккаунт и получать электроэнергию. Сейчас самая сложная коммуникация реализована на уровне «зарядка-сервер», а не между авто и зарядкой [3].

Что касается стандартов в этой теме, то можно отметить, что универсальные стандарты задействованы пока не везде, их продолжают внедрять, и они продолжают меняться, так как рынок еще достаточно сырой, и не все стабилизировалось. Невозможно создать один общий стандарт. Есть определенные стандарты, которые решают



определенные задачи. Например, есть стандарт OpenADR, который позволяет удаленно управлять электроэнергией подключенных электроустройств – он балансирует всплески потребления электроэнергии, и зарядки в него отлично вписываются. Он является частью умного города, но решает конкретную задачу. И таких специализированных стандартов будет достаточно много.

Необходимо отметить, что массовое применение электромобилей и организация инверторного режима позволит:

- существенно повысить эффективность применения и проектирование электрических распределительных сетей за счет управляемой распределенной нагрузки;
- увеличить полезный отпуск в сеть за счет организации инверторного режима;
- обеспечить выравнивание «провала» в ночное время суток профиля нагрузок энергосистемы;
- при внедрении новейших технологий V2G рассматривать электромобили как распределенные накопители электроэнергии для покрытия пиковых нагрузок энергосистемы;
- существенно повысить эффективность применения электрических распределительных сетей и увеличить полезный отпуск;
- снизить выбросы вредных веществ в атмосферу, что улучшит экологическую обстановку в мире.

Причем поскольку основные генерирующие источники энергии и прочие производства находятся в черте крупных мегаполисов, то наиболее актуальным направлением развития зарядных станций являются именно мегаполисы.

Схемные решения системы электропитания на базе трехфазного АИН

Рассмотрим структурную схему устройства электромобиля, которая представлена на рис. 2.

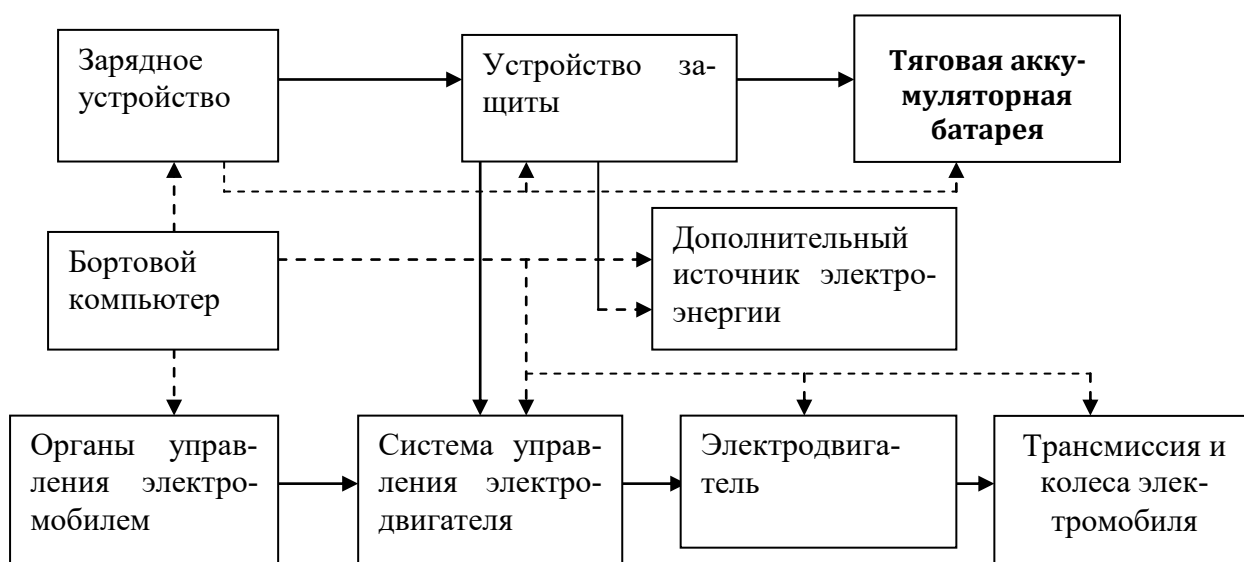


Рис. 2. Блок-схема устройства электромобиля

Зарядное устройство преобразует переменное напряжение внешней сети в постоянное для заряда аккумуляторных батарей, тяговой и вспомогательной.

Устройство защиты (блок реле и предохранителей) состоит из выключателей, реле, предохранителей, которые включены между аккумуляторной батареей и осталь-

ной электрической схемой – потребителями. При возникновении неисправности цепь переменного тока и аккумуляторы отключаются.

Тяговая аккумуляторная батарея обеспечивает энергией двигатель электромо-
биля. В настоящее время наиболее популярными являются калиевые, натриевые, а
также титанатные аккумуляторные батареи.

Бортовой компьютер контролирует состояние основных функциональных ком-
понентов и бортовых систем электромобиля, при необходимости инициирует средства
защиты.

Дополнительный источник электроэнергии (обычно вспомогательная аккумуля-
торная батарея на 12 В) обеспечивает работу осветительных приборов, панели прибо-
ров, стеклоподъемников, стеклоочистителей и т. д.

Электронный контроллер электродвигателя формирует требуемый вид напря-
жения питания. Управляет числом оборотов и тяговым моментом на валу по командам
водителя или автоматически.

Заряд основной батареи осуществляется от зарядного устройства располагаемо-
го либо на борту электромобиля или вне его. Его задача обеспечить необходимый ток в
кратчайший период времени с соблюдением алгоритма заряда аккумуляторной бата-
реи, рекомендованной заводом-изготовителем.

Такие системы могут уже использоваться как для резервного электроснабжения,
так и для полностью автономного электропитания объекта. В инверторах предусмот-
рены настройки, позволяющие приоритетно использовать альтернативные источники
энергии, а центральная сеть или генератор будут подключаться только по мере необ-
ходимости. Такие режимы позволяет значительно экономить сетевую электроэнергию
или топливо для генератора.

При использовании системных контроллеров и панелей управления пользователь
может дистанционно, через Интернет, контролировать работу инверторной системы с
помощью компьютера, планшета или смартфона. Схема инверторного режима показана на рис. 3.

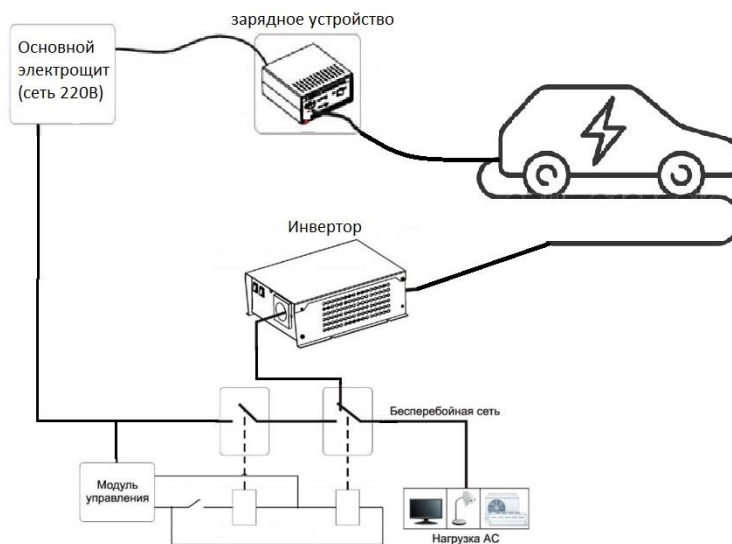


Рис. 3. Схема инверторного режима на базе зарядной станции электромобиля

Основной задачей данной статьи является моделирование работы «on-line» си-
стемы, состоящей из газо-дизель-генератора (источник сети) и инвертора напряжения
на примере зарядной станции электромобиля (рис. 4).



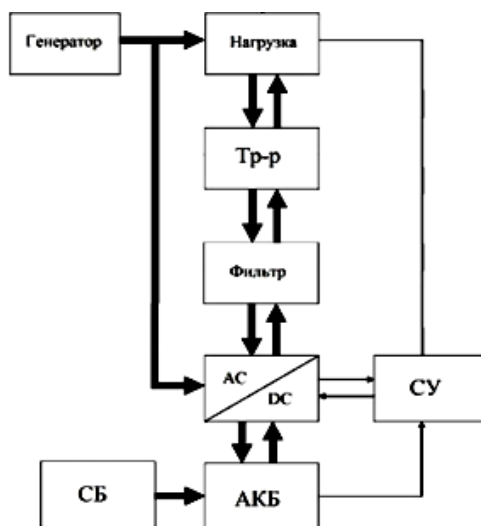


Рис. 4. Схема исследуемой энергетической установки:

Тр-р – силовой трансформатор; AC/DC – двунаправленный инвертор; СУ – система управления; СБ – зарядная станция электромобиля; АКБ – аккумуляторная батарея

Газогенератор создает трехфазное напряжение сети 380В (50Гц). При наличии избыточной мощности на нагрузке, автономный инвертор напряжения (АИН) начинает заряжать АКБ до достижения уровня заряда 90% (после 90% происходит сброс избыточного тока на резистор). При невозможности газогенератора обеспечить необходимую мощность на нагрузке, АИН начинает отдавать мощность на нагрузку в режиме ведомого, используя заряд АКБ. При выключенном генераторе АИН полностью обеспечивает мощность на нагрузке в режиме ведущего, после включения генератора АИН переходит в режим ведомого.

Моделирование системы электропитания на базе трехфазного АИН в пакете Matlab Simulink

Имитационное моделирование автономной системы электропитания на базе трехфазного инвертора осуществлено в пакете MATLAB Simulink и состоит из генератора, инвертора, системы управления инверторами нагрузки (рис. 5).

С использованием предложенной модели проведен анализ влияния инверторного режима зарядных станций электромобилей на качество электроэнергии в сети 10/0,4 кВ Новосибирских электрических сетей.

Вопросы надежного и качественного энергоснабжения потребителя, расшивки «узких мест», а также решение проблемы энергосбережения обосновывают актуальность организации инверторного режима при организации зарядных станций электромобилей.

Проблема качества электроэнергии (КЭ) в системах электроснабжения в настоящее время является одной из наиболее важных проблем в энергетике, так как КЭ является существенным фактором, влияющим на эффективность режимов энергосистемы и потребителей, особенно в эру «капризного потребителя». Качество электроэнергии определяется надежной и устойчивой работой электропередачи.

Особенно остро данная проблема стоит в сетях низкого напряжения, так как рост мелких нелинейных электропотребителей (компьютерная техника, телеаппаратура, аудио- и видеотехника, бытовые электроприборы, зарядные устройства и другие) увеличивается с большой скоростью [8].



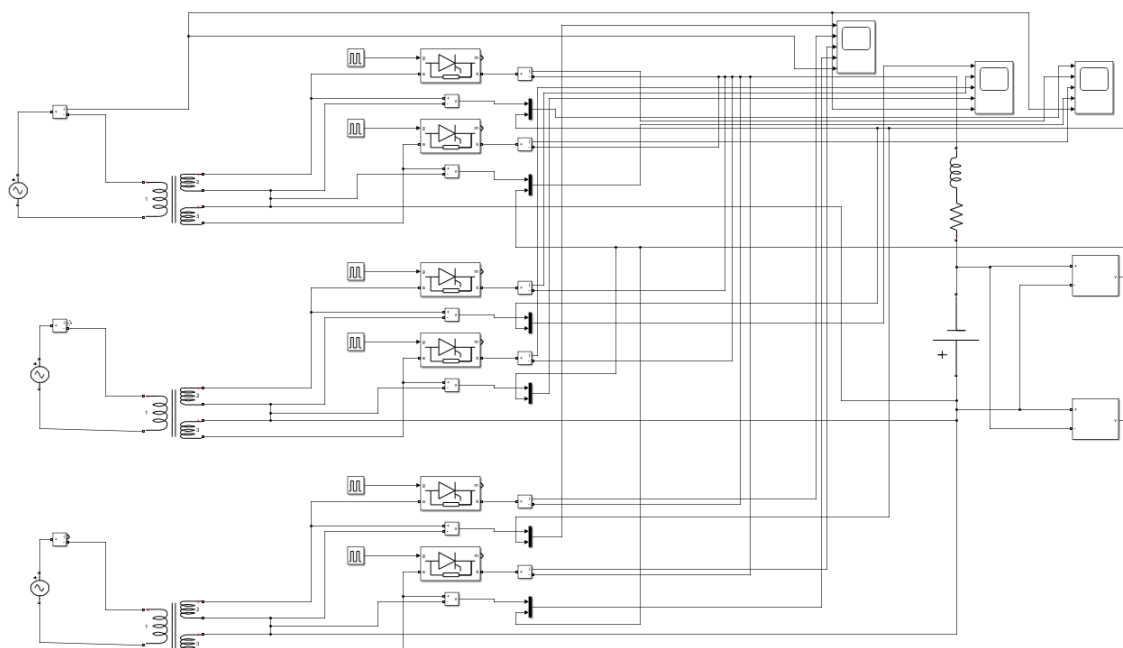


Рис. 5. Собранная модель организации инверторного режима зарядной станции электро-мобиля

Одной из причин снижения качества электроэнергии являются нелинейные нагрузки, которые генерируют электромагнитные помехи, а они, в свою очередь, приводят к искажениям синусоидальности кривых тока и напряжения, что снижает качество электроэнергии.

Поскольку зарядное устройство электромобиля при организации инверторного режима является нелинейной нагрузкой и, помимо увеличения нагрузки на электросетевую инфраструктуру, может быть причиной ухудшения качества электроэнергии, за счет генерирования гармонических искажений, то необходим анализ влияния электромобилей на качество электроснабжения потребителя согласно ГОСТ 32144-2013.

Зададим ток 10А. Ниже, на рис. 6, представлены значения напряжения и тока инвертора в режиме ведомого, а также тока нагрузки, напряжения и тока генератора при разряде АКБ.

Гармонические искажения приводят к увеличению потребляемой мощности и к снижению качества электроэнергии. Тем более, что в сетях до 1000 В основные потери мощности происходят именно от наличия несинусоидальности кривой тока и напряжения. Наиболее значимыми с точки зрения отражения физической природы потерь мощности является несинусоидальность кривой тока, которая нормируется ГОСТ 30804.3.2-2013 и ГОСТ 30804.3.12-2013).

Несинусоидальный ток электрической сети приводит к ряду последствий, среди которых отмечают:

- появление дополнительных потерь энергии в распределительных трансформаторах и проводах [9];
- появление помех, мешающих нормальному функционированию подключаемого оборудования [10];
- снижение срока службы и пропускной способности электрической сети [10];
- повышение опасности производства на опасных производственных объектах.

Хотя в работе применение инвертора на базе высокочастотных транзисторов позволяет достичь высокого уровня фильтрации гармонических составляющих, поиск и

оценка эффективности способа коррекции формы кривой выходного напряжения и тока для трехфазных инверторов и приближению этой кривой к синусоидальной форме для устранения негативного воздействия высших гармоник напряжения является довольно актуальной задачей.

Индуктивности трансформаторов выступают как фильтровые устройства, поскольку их индуктивность рассеяния в схеме замещения можно рассматривать как продольную индуктивность. В этом случае систему, включающую инвертор и силовой трансформатор, можно рассматривать как обычный инвертор, дающий модифицированный синус.

В такой схеме вместо многократной ШИМ за период достаточно использовать фазовую модуляцию, которая в данном случае будет рассматриваться как однократная ШИМ за рабочий период.

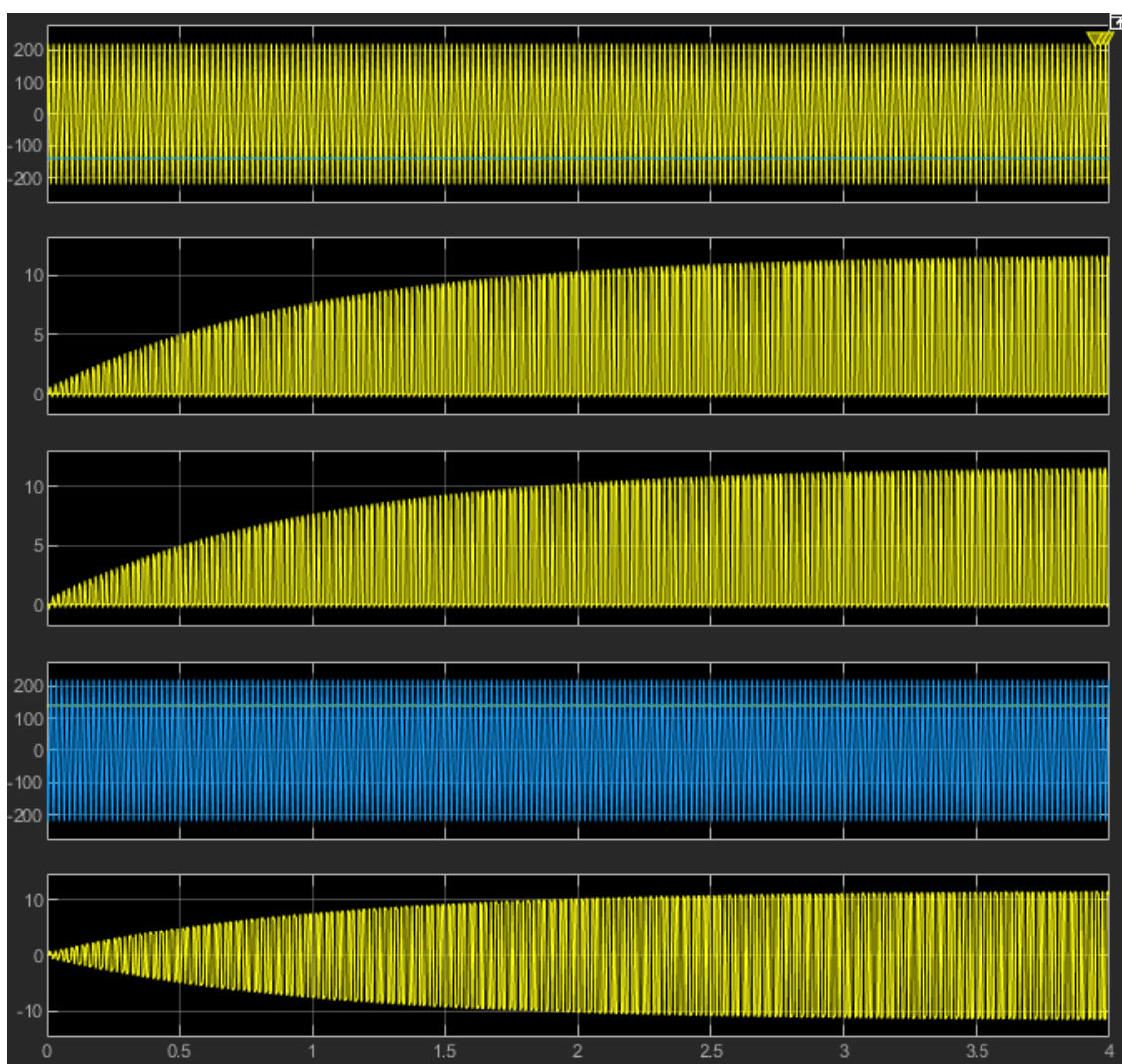


Рис. 6. Напряжение и ток генератора, напряжение и ток инвертора в режиме ведомого, а также ток нагрузки

Исследование в среде Simulink показало, что в первом приближении коэффициент нелинейного искажения по напряжению не будет превышать 16%.

Технико-экономическое обоснование проекта организации инверторного режима зарядной станции электромобиля

С целью определения эффективности рассматриваемого проекта был произведен расчет его себестоимости в годовом исчислении. В табл. 2 сведены данные по экономии вышеуказанных эксплуатационных затрат.

Для обоснования эффективности функционирования зарядной станции в рамках энергосистемы проведем технико-экономические расчеты.

Величина годовых эксплуатационных затрат по зарядной станции приведена в табл. 2.

Таблица 2

Годовые эксплуатационные затраты

Статья затрат	Базовый вариант, тыс. руб./год
Амортизационные отчисления	80,084
Расходы на содержание оборудования внедряемого варианта	39,06
Фонд заработной платы	1207,3
Отчисления на социальные нужды	365,9
Прочие эксплуатационные затраты (10 %)	169,344
Итого:	1861,7

Таким образом, себестоимость проекта составляет 1861,7 тыс. руб./год.

Величина прибыли от реализации проекта (годовой прирост прибыли от внедрения мероприятия) формируется за счет реализации услуг по зарядке электромобилей.

Средняя стоимость полной зарядки электромобиля составляет в среднем

$C_{зар} = 500$ рублей. Полный заряд обеспечивает электромобилю запас хода в $L_{зар} = 280 - 320$ км. При среднем пробеге в год $L_{год} = 25000$ км стоимость заряда одного автомобиля составляет:

$$C_{обсл} = C_{зар} \cdot \frac{L_{год}}{L_{зар}} = 500 \cdot \frac{25000}{300} = 41667 \text{ руб./год}$$

Тогда при среднем количестве электромобилей, обслуживаемых на данной станции, $n = 60$, величина годовой прибыли от реализации равном проекта составляет:

$$\Pi = 41,667 \cdot 60 = 2500 \text{ тыс. руб.}$$

При тарифе по Новосибирской области 2,68 руб./кВт·ч, получаем выработку электроэнергии:

$$ВЭ = \frac{2500000}{2,68} = 932835 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Далее рассчитываем себестоимость производства электрической энергии для зарядной станции.

$$CC = \frac{1861700}{932835} = 1,99 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч}$$

Таким образом, себестоимость производства электроэнергии составляет 1,99 руб./кВт·ч. И это означает, что строительство данной зарядной станции для электро-



мобилей является эффективным, поскольку себестоимость электроэнергии при питании от СЭС ниже, чем при питании от стационарной сети, следовательно зарядная станция будет пользоваться спросом.

Исходя из технико-экономических расчетов, можно сделать вывод, что себестоимость электроэнергии при питании от зарядной станции электромобиля ниже, чем при питании от стационарной сети, следовательно, зарядная станция будет пользоваться спросом, $CC = 1,99$ руб./кВт·ч. Конкурентноспособность данного источника электропитания обосновывается отсутствием вредного воздействия на окружающую среду, а также существенно повысить эффективность применения и проектирование электрических распределительных сетей за счет управляемой распределенной нагрузки; увеличить полезный отпуск в сеть за счет организации инверторного режима; обеспечить выравнивание «провала» в ночное время суток профиля нагрузок энергосистемы; при внедрении новейших технологий V2G рассматривать электромобили как распределенные накопители электроэнергии для покрытия пиковых нагрузок энергосистемы; существенно повысить эффективность применения электрических распределительных сетей и увеличить полезный отпуск.

Выводы

В статье была выполнена организация и проектирование инверторного режима для зарядной станции электромобилей. Осуществлено моделирование и анализ режимов работы зарядной подстанции в пакете MATLAB Simulink, а также решены следующие основные задачи:

Проанализированы принципы работы зарядных станций и возможности организации инверторного режима их работы;

Показано, что при составлении рациональных схем трехфазных инверторов напряжений целесообразно использовать основы теории структурного синтеза выпрямителей, где статический преобразователь рода тока представлен как совокупность топологических структур из ветвей, образованных СПП и обмотками силового трансформатора. Такое представление позволяет исключить из общего перечня реактивные элементы и связанные с ними ограничения, приводящие к недостаткам в работе трехфазных инверторов напряжений.

Реализовано моделирование и анализ режимов работы зарядной подстанции в пакете MATLAB Simulink и показано, что применение транзисторов в мостовой схеме выпрямителя в сочетании с силовыми трансформаторами на высоких частотах позволяет достичь высокого уровня фильтрации и соответствовать требованиям стандарта по качеству электроэнергии ГОСТ 32144-2013.

Проведено технико-экономическое обоснование проектирования зарядной подстанции электромобилей в условиях мегаполиса. Исходя из технико-экономических расчетов, получена себестоимость электроэнергии при питании от зарядной станции электромобиля, которая оказалась ниже, чем при питании от стационарной сети, следовательно, зарядная станция будет пользоваться спросом, $CC = 1,99$ руб./кВт·ч. Все это делает зарядные станции конкурентноспособными с точки зрения выдачи электроэнергии в сеть по сравнению с традиционными источникам энергоснабжения, поскольку наряду с вышеприведенными преимуществами также достигается улучшение экологической обстановки в регионах.



Библиографический список

1. Skvortsova K. Ситуация на рынке и перспективы развития зарядных станций для автомобилей в России [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://vc.ru/u/229919-kate-skvortsova/272232-perspektivy-razvitiya-rynka-elektromobiley-i-zaryadnoy-infrastruktury-rossii> (дата обращения 15.06.2023).
2. Сколько электромобилей в мире: сводная аналитика на конец 2021 года [Электронный ресурс]. E-CARS.TECH. URL: <https://e-cars.tech/analitika/skolko-elektromobiley-v-mire-svodnaya-analitika-na-konets-2021-goda>
3. Ютт В.Е., Оспанбеков Б.К. Перспективные направления развития зарядных станций для электромобилей // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 6. С. 10-12. EDN: RTPZNF
4. Skundin A.M., Efimov O.N., Yarmolenko O.V. The state-of-the-art and prospects for the development of rechargeable lithium batteries // Russian chemical reviews. 2002. №71 (4). P.329-346. EDN: LHPPIX. DOI: [10.1070/RC2002v071n04ABEH000706](https://doi.org/10.1070/RC2002v071n04ABEH000706)
5. Сидоров К.М., Голубчик Т.В., Ютт В.Е. Перспективные системы тягового электрооборудования для транспортных средств // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2012. № 1 (28). С. 56а-63. EDN: OPIYIX
6. Маньков В.Д. Основы проектирования систем электроснабжения. Справочное пособие. СПб: НОУ ДПО «УМИТЦ Электросервис», 2010. 664 с.
7. ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Ч. 1. Электромобили. М.: Стандартинформ, 2012. 24 с.
8. Динамика изменений показателей качества электроэнергетики распределительных сетей ОАО «МОЭСК» / Е.А. Бучкина, И.Ю. Аксютин, В.В. Сиренко, С.В. Бортников. // Управление качеством электрической энергии: Сб. тр. Межд. научно-практ. конф. (Москва, 26-28 ноября, 2014 г.). М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014. С. 29-36. EDN: VITFVP
9. Коверникова Л.И. Некоторые свойства параметров режимов гармоник в сети с распределенными нелинейными нагрузками // Управление качеством электрической энергии: Сб. тр. Межд. научно-практ. конф. (Москва, 26-28 ноября, 2014 г.) М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014. С.101-108. EDN: VITGDH
10. Смирнов А.И., Шклярский Я.Э. Мониторинг оценки показателей качества электрической энергии // Современная наука и практика. 2016. № 8(13). С.13-16. EDN: WWQSPB

References

1. Skvortsova, K. (2021, July 21). Situaciya na rynke i perspektivy razvitiya zaryadnyh stancij dlya avtomobilej v Rossii [The market situation and prospects for the development of charging stations for cars in Russia]. Retrieved 2023, June 16, from <https://vc.ru/u/229919-kate-skvortsova/272232-perspektivy-razvitiya-rynka-elektromobiley-i-zaryadnoy-infrastruktury-rossii>. [In Russian]
2. E-Cars.Tech. (n.d.). Skol'ko elektromobiley v mire: svodnaya analitika na konets 2021 goda [How many electric vehicles in the world: summary analytics at the end of 2021]. Retrieved 2023, June 16, from <https://e-cars.tech/analitika/skolko-elektromobiley-v-mire-svodnaya-analitika-na-konets-2021-goda> [In Russian]
3. Yutt, V. E., & Ospanbekov, B. K. (2013). Perspektivnye napravleniya razvitiya zaryadnyh stancij dlya elektromobilej [Promising areas of development of charging stations for electric vehicles]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 6, 10-12. <https://www.elibrary.ru/rtpzmf> [In Russian]
4. Skundin, A. M., Efimov, O. N., & Yarmolenko O. V. (2002) The state-of-the-art and prospects for the development of rechargeable lithium batteries. *Russian chemical reviews*, 71 (4), 329-346. <https://doi.org/10.1070/RC2002v071n04ABEH000706>
5. Sidorov, K. M., Golubchik, T. V., & Yutt V. E. (2012). Perspektivnye sistemy tyagovogo elektrooborudovaniya dlya transportnyh sredstv [Promising systems of traction electrical equipment for vehicles]. *Vestnik MADI*, 1(28), 56a-63. <https://www.elibrary.ru/opiyix> [In Russian]



6. Man'kov V. D. (2010). *Osnovy proektirovaniya sistem elektrosnabzheniya. Spravochnoe posobie* [Fundamentals of designing power supply systems. Reference manual]. Izd-vo NOU DPO «UMITC Elektroservis». [In Russian]
7. ISC (2012). *GOST R EN 1986-1-2011. Avtomobili s elektricheskoy tyagoy. Izmerenie energeticheskikh harakteristik. Chast' 1. Elektromobili* [Cars with electric traction. Measurement of energy characteristics. Part 1. Electric vehicles]. Standartinform. <https://www.elibrary.ru/vitfvp> [In Russian]
8. Buchkina, E. A., Aksyutin, I. Yu., Sirenko, V. V., & Bortnikov, S. V. (2014). Dinamika izmenenij pokazatelej kachestva elektroenergii raspredelitel'nyh setej OAO «MOESK» [Dynamics of changes in electricity quality indicators of JSC "MOESK" distribution networks]. In *Proc. of International Sc. and Prac. Conf. "Electric energy quality management"* (pp. 29-36). Centr poligraficheskikh uslug «Raduga». [In Russian]
9. Kavernikova, L. I. (2014). Nekotorye svoystva parametrov rezhimov garmonik v seti s raspredelennymi nelinejnymi nagruzkami [Some properties of harmonic mode parameters in a network with distributed nonlinear loads]. In *Proc. of International Sc. and Prac. Conf. "Electric energy quality management"* (pp. 101-108). Centr poligraficheskikh uslug «Raduga». <https://www.elibrary.ru/vitgdh> [In Russian]
10. Smirnov, A. I., & Shklyarskij, Ya. E. (2016). Monitoring ocenki pokazatelej kachestva elektricheskoy energii [Monitoring of the evaluation of electric energy quality indicators]. *Sovremennaya nauka i praktika*, 8(13), 13-16. <https://www.elibrary.ru/opyjyx> [In Russian]

Сведения об авторах

Мятеж Татьяна Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры Систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск.

Любченко Валентина Яковлевна, канд. техн. наук, доцент кафедры Систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск.

Могиленко Егор Александрович, студент кафедры Систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск.

Authors about

Tatiana Myatezh, Cand. of Tech Science, Assistant Professor, NSTU, Department of Power Supply Systems of Enterprises.

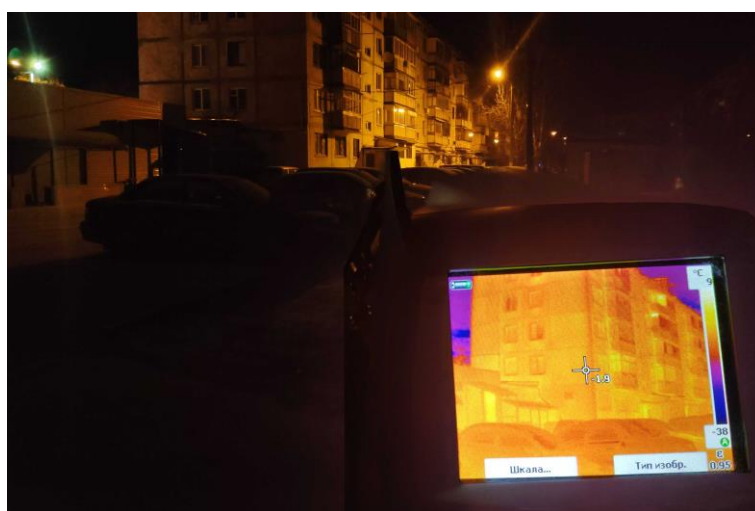
Valentina Lyubchenko, Cand. of Tech Science, Assistant Professor, NSTU, Department of Power Supply Systems of Enterprises.

Egor Mogilenko, Cand. of Tech Science, Assistant Professor, NSTU, Department of Power Supply Systems of Enterprises.



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY



МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЮ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ ТИПОВЫХ ЗДАНИЙ

Гаврилова А.А., Сагитова Л.А., Чичев И.С.

СамГТУ, г. Самара

Аннотация

Повышение энергоэффективности существующих объектов капитального строительства является важной и актуальной задачей. Для повышения эффективности эксплуатации жилых многоквартирных домов был проведен анализ существующих мероприятий по энерго-и ресурсосбережению, предложена совокупность частных критериев эффективности энергосберегающих мероприятий для инженерных систем зданий, определены значения экономии при их проведении для четырех типов домов. Предложена методика оценки сравнительной эффективности проведения энергосберегающих мероприятий с применением метода многокритериального оценивания DEA (Анализ среды функционирования). Сформулированы комплексные критерии эффективности для анализа мероприятий для систем отопления, водоснабжения и электроснабжения. Использование DEA методика позволяет оптимизировать выбор приоритетных направлений по проведению мероприятий по ресурсосбережению для всех типов зданий.

Ключевые слова: энергоэффективность, DEA методика, обобщенный критерий эффективности, многокритериальная оценка.

MULTI-CRITERIA EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF RESOURCE-SAVING MEASURES IN THE ENGINEERING SYSTEMS OF STANDARD BUILDINGS

Anna Gavrilova, Lyajsan Sagitova, Ilya CHichev

Samara State Technical University, Samara

Abstract

Improving the energy efficiency of existing capital construction projects is an important and urgent task. To improve the efficiency of operation of residential apartment buildings, an analysis of existing measures for energy and resource saving was carried out, a set of particular criteria for the effectiveness of energy-saving measures for engineering systems of buildings was proposed, and the values of savings during their implementation for four types of houses were determined. A method for assessing the comparative effectiveness of energy-saving measures using the DEA multi-criteria assessment method (Data Envelopment Analysis) is proposed. Comprehensive performance criteria are formulated for the analysis of measures for heating, water supply and electricity supply systems. The use of the DEA methodology makes it possible to optimize the choice of priority areas for the implementation of resource saving measures for all types of buildings.

Keywords: energy efficiency, DEA methodology, generalized efficiency criterion, multi-criteria assessment.

Энергоэффективность и энергосбережение согласно Указа Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. №899 является одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации. На сегодняшний день значительная часть существующего жилищного фонда не отвечает требованиям



энергоэффективности, в следствие чего затраты жителей многоквартирных домов на услуги жилищного-коммунального хозяйства (ЖКХ) и на эксплуатацию могут быть неоправданно высокими. Таким образом цель данного исследования, заключающаяся в проведении анализа направлений по ресурсосбережению и повышению эффективности домов, а также долгосрочном планировании таких мероприятий, является актуальной.

В данном исследовании для решения поставленных задач были использованы методы системного анализа, статистического анализа, методология Data Envelopment Analysis (DEA).

Комфорт и качество жизни жителей многоквартирных домов во многом обеспечивается работой различных инженерных коммуникаций: систем отопления, газоснабжения, водоснабжения, канализации, электроснабжения и т.д.

Анализ направлений повышения энергоэффективности позволит значительно снизить потребление энергоресурсов, сократить расходы жителей и управляющей компании на их оплату. Для снабжающих организаций, в свою очередь снижается износ генерирующего и сетевого оборудования, увеличивая срок службы и надежность.

Анализ усредненных значений затрат жителей на услуги ЖКХ показал, что наиболее затратными ресурсами для потребителей в настоящее время являются следующие: тепловая энергия (47,5%), вода (28,1%) и электричество (14,3%). Из существующего разнообразия энергосберегающих мероприятий было выделено 9 наиболее эффективных и низкозатратных, объединенных в 3 группы для систем отопления, водоснабжения и электроснабжения:

- замена ограждающих конструкций;
- утепление крыш, стен, фундамента;
- остекление балкона;
- установка инфракрасных датчиков;
- использование автоматических смесителей;
- использование аэраторов;
- установка датчиков движения;
- замена ламп накаливания;
- установка общедомовых приборов учета электроэнергии.

Сравнительный анализ энергосберегающих мероприятий проводился для четырех типовых многоэтажных многоквартирных зданий:

- монолитный,
- кирпичный,
- панельный
- кирпично-монолитный.

В табл. 1 приведены значения объемов сэкономленных ресурсов при проведении каждого из выбранных энергосберегающих мероприятий для всех 4 типов домов.

При проведении ресурсосберегающих мероприятий важно определить их очередность и целесообразность для конкретного типа здания.

Для оценки эффективности проведения мероприятий, а также выбора приоритетных направлений, в работе была использована методология Data Envelopment Analysis (DEA), позволяющая провести сравнительную оценку котлов. Она позволяет проводить сравнительный анализ деятельности сложных технических, экономических и социальных систем. Её основными преимуществами является то, что она не требует предварительных знаний о взаимодействиях между переменными или о функциональной форме, позволяет определить эффективность одного или нескольких объектов относительно других и выявить направления улучшения работы неэффективных объектов.



Таблица 1

Значения экономии ресурсов при проведении энергосберегающих ресурсов

Наименование энергосберегающего мероприятия	Объемы сэкономленных ресурсов			
	1 тип	2 тип	3 тип	4 тип
Отопление				
Ограждающие конструкции, Гкал/год	0,26	0,55	0,5	0,35
Утепление стен, крыш, фундамента, Гкал/год	1,4	1	1,6	1,2
Остекление балкона, Гкал/год	3,2	4,8	2,4	5,6
Электроснабжение				
Установка инфракрасных датчиков, м ³	2,99	2,85	2,28	2,43
Использование автоматических смесителей, м ³	4,73	6,34	4,12	5,14
Использование аэраторов, м ³	2,37	3,17	0,84	2,58
Водоснабжение				
Установка датчика движения, кВт·ч/год	360	330	180	210
Замена ламп накаливания, кВт·ч/год	51,84	51,84	51,84	51,84
Установка общедомовых приборов учета электроэнергии, кВт·ч/год	105,6	120	100	96

Интегральный показатель сравнительной эффективности f возрастает при увеличении выходных величин Y_k и уменьшении входных величин X_m . В качестве входов и выходов принимают различные характеристики деятельности объектов.

В общем случае оцениваемый объект характеризуется величиной обобщенного показателя эффективности f_n :

$$f_n = \max_{u_{in}, v_{jn} \in G} \frac{u_{1n} \cdot Y_{1n} + u_{2n} \cdot Y_{2n} + \dots + u_{kn} \cdot Y_{kn}}{v_{1n} \cdot X_{1n} + v_{2n} \cdot X_{2n} + \dots + v_{mn} \cdot X_{mn}} \quad (1)$$

при наличии ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{u_{1n} \cdot Y_{11} + u_{2n} \cdot Y_{21} + \dots + u_{kn} \cdot Y_{k1}}{v_{1n} \cdot X_{11} + v_{2n} \cdot X_{21} + \dots + v_{mn} \cdot X_{m1}} \leq 1, \\ \frac{u_{1n} \cdot Y_{12} + u_{2n} \cdot Y_{22} + \dots + u_{kn} \cdot Y_{k2}}{v_{1n} \cdot X_{12} + v_{2n} \cdot X_{22} + \dots + v_{mn} \cdot X_{m2}} \leq 1, \\ \dots \dots \dots \\ \frac{u_{1n} \cdot Y_{1N} + u_{2n} \cdot Y_{2N} + \dots + u_{kn} \cdot Y_{kN}}{v_{1n} \cdot X_{1N} + v_{2n} \cdot X_{2N} + \dots + v_{mn} \cdot X_{mN}} \leq 1, \end{array} \right. \quad (2)$$

где u_{in} и v_{jn} – неотрицательные весовые коэффициенты, $i = \{1, 2, \dots, k\}$; $j = \{1, 2, \dots, m\}$.

Данный подход применяется для анализа эффективности промышленных производств и производственных процессов объектов энергетики, транспорта, сельского хозяйства, здравоохранения, финансовых организаций. Методология DEA характеризуется минимальной субъективностью при формировании интегральных оценок эффективности, мнение исследователя влияет только на первоначальный выбор совокупности локальных критериев, которая уточняется по мере решения задачи математического программирования.



На основе DEA методологии для каждой группы критериев сформированы комплексные критерии эффективности систем отопления, водоснабжения и электроснабжения.

Для проведения многокритериальной оценки сравнительной эффективности энергосберегающих мероприятий систем жизнеобеспечения в общем виде сформирован комплексный обобщенный показатель эффективности представлен в виде суммы частных критериев:

$$f_n = \max_{u_{in}, v_{jn} \in G} (u_{1n} \cdot Y_{1n} + u_{2n} \cdot Y_{2n} + u_{3n} \cdot Y_{3n}) \quad (3)$$

при наличии ограничений:

$$\begin{cases} u_{1n} \cdot Y_{11} + u_{2n} \cdot Y_{21} + u_{3n} \cdot Y_{31} \leq 1, \\ u_{1n} \cdot Y_{12} + u_{2n} \cdot Y_{22} + u_{3n} \cdot Y_{32} \leq 1, \\ u_{1n} \cdot Y_{13} + u_{2n} \cdot Y_{23} + u_{3n} \cdot Y_{33} \leq 1, \\ u_{1n} \cdot Y_{14} + u_{2n} \cdot Y_{24} + u_{3n} \cdot Y_{34} \leq 1, \end{cases} \quad (4)$$

где u_{in} – неотрицательные весовые коэффициенты, $i = \{1, 2, \dots, k\}$; $j = \{1, 2, \dots, m\}$;

Y_{in} – значения экономии ресурсов при проведении энергосберегающих мероприятий.

Для систем отопления:

Y_{1n}^m – экономия тепловой энергии при замене ограждающих конструкций, Гкал/год;

Y_{2n}^m – экономия тепловой энергии при утеплении стен, крыши, фундамента, Гкал/год

Y_{3n}^m – экономия тепловой энергии при остеклении балкона, Гкал/год

Для систем водоснабжения:

Y_{1n}^e – экономия воды при установке инфракрасных датчиков м³;

Y_{2n}^e – экономия воды при использовании автоматических смесителей м³;

Y_{3n}^e – экономия воды при использовании аэраторов м³.

Для систем электроснабжения:

$Y_{1n}^э$ – экономия электроэнергии при установке датчиков движения, кВт/год;

$Y_{2n}^э$ – экономия электроэнергии при замене ламп накаливания, кВт/год;

$Y_{3n}^э$ – экономия электроэнергии при установке общедомовых приборов учета электроэнергии, кВт/год.

В табл. 2 представлены результаты расчета обобщенного критерия эффективности проведения мероприятий по экономии тепловой энергии для каждого типа домов и весовые коэффициенты:

Таблица 2

Результаты расчета обобщенного критерия эффективности и весовые коэффициенты для систем отопления

Наименование показателя		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Весовые коэффициенты	u_{1n}^T	0,000	0,775	0,779	0,606
	u_{2n}^T	0,526	0,287	0,308	0,307
	u_{3n}^T	0,066	0,060	0,049	0,075
Обобщенный критерий f_n^T		0,95	1,00	1,00	1,00

По результатам расчетов выявлена следующая последовательность мероприятий для максимальной энергоэффективности. Для второго, третьего и четвертого типов



зданий первоочередным мероприятием является замена ограждающих конструкций, после которого следует провести утепление фундамента, стен, крыш. Остекление балкона является малоэффективным мероприятием для этих типов зданий. Для первого типа домов замена ограждающих конструкций не влияет на комплексную эффективность, в первую очередь необходимо произвести утепление крыш, стен и фундамента, а затем остекление балконов.

Результаты расчета весовых коэффициентов и обобщенного критерия эффективности для мероприятий по экономии водных ресурсов для каждого типа домов показаны в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета обобщенного критерия эффективности и весовые коэффициенты для систем водоснабжения

Наименование показателя		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Весовые коэффициенты	u^B_{1n}	0,294	0,000	0,294	0,294
	u^B_{2n}	0,000	0,045	0,026	0,000
	u^B_{3n}	0,051	0,226	0,000	0,051
Обобщенный критерий f^B_n		1,00	1,00	0,78	0,85

Из анализа полученных результатов видно, что наиболее эффективным и приоритетным направлением для первого, третьего и четвертого типов зданий является установка инфракрасных датчиков, далее для 1-го и 4-го типов домов вторым по эффективности направлением является установка аэраторов. Использование автоматических смесителей для данных типов зданий не влияет на комплексную эффективность. Вторым этапом по эффективности для 3-го типа зданий является установка автоматических смесителей, однако установка аэраторов для данного типа зданий не является эффективной. Для 2-го типа зданий наиболее рационально на первом этапе ресурсосберегающих мероприятий произвести установку аэраторов, а на втором – установить автоматические смесители.

Для мероприятий по экономии электрической энергии для каждого типа зданий результаты расчетов обобщенного критерия эффективности и весовые коэффициенты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета обобщенного критерия эффективности и весовые коэффициенты для систем электроснабжения

Наименование показателя		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Весовые коэффициенты	$u^Э_{1n}$	0,003	0,001	0,000	0,000
	$u^Э_{2n}$	0,000	0,013	0,019	0,019
	$u^Э_{3n}$	0,001	0,001	0,000	0,000
Обобщенный критерий $f^Э_n$		1,00	1,00	1,00	1,00

Анализ полученных результатов показал, что в системах электроснабжения для 2-ого, 3-го и 4-го типов зданий наиболее эффективным мероприятием по экономии электрической энергии является замена ламп накаливания. Установка общедомовых приборов учета электроэнергии является не эффективным мероприятием для третьего и четвертого типов зданий. Также для 2-го типа зданий после замены ламп накаливания наиболее рационально проводить установку общедомовых приборов учета, а затем



установку датчиков движения. Для первого типа зданий следует начинать проведение энергосберегающих мероприятий с установки датчиков движения, затем установки общедомовых приборов учета электроэнергии и замены ламп накаливания.

Выводы

1. Предложена совокупность частных критериев эффективности энергосберегающих мероприятий для инженерных систем зданий.
2. Определены комплексные критерии для систем теплоснабжения, электроснабжения и водоснабжения.
3. Определена оптимальная очередность энергосберегающих мероприятий для всех типов зданий.

Библиографический список

1. Дилигенский Н.В., Цапенко М.В. Многокритериальная оценка сравнительной эффективности организационных систем управления // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды VIII межд. конф. Самара: САМНЦ РАН, 2006. С. 66-72. EDN: [JAXCTH](#)
2. Thanassoulis E., Allen R. Simulating Weights Restrictions in Data Envelopment Analysis by Means of Unobserved DMUs // Management Science. 1998, April. Vol. 44, No. 4. P. 586-594. DOI: [10.1287/mnsc.44.4.586](#)
3. The DEA Process, Usages and Interpretations. / A. Charnes, W.W. Cooper, A.Y. Lewin, L.M. Seiford // Data Envelopment Analysis: Theory, methodology and applications. New York: Springer Science+Business Media. 1994. P. 425-435. DOI: [10.1007/978-94-011-0637-5](#)
4. Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем: Учебное пособие. Самара: ООО «Офорт», 2005. 126 с.
5. Обобщенная оценка сравнительной эффективности работы котельного оборудования / А.Г. Салов, А.А. Гаврилова, Ю.В. Чиркова, Л.А. Сагитова // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура: научно-технический журнал. 2016. № 2. С. 140-146. EDN: [WCFKUP](#)
6. Gavrilo A., Salov A., Sagitova L. System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of Transformation // In Proc. 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara: IEEE, 2019. P. 736-741. DOI: [10.1109/CSCMP45713.2019.8976644](#). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8976644>
7. Gavrilo A.A., Salov A.G., Sagitova L.A. Assessment of the Efficiency of the Samara Region's Energy Complex Under Changing Conditions // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok: IEEE, 2020. P. 1-4. DOI: [10.1109/FarEastCon50210.2020.9271116](#). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9271116>

References

1. Diligenskij, N. V., & Capenko, M. V. (2006). Mnogokriterial'naya ocenka sravnitel'noj effektivnosti organizacionnyh sistem upravleniya [Multi-criteria assessment of the comparative effectiveness of organizational management systems] // In *Proc. of the VIII int. conf. Samara Problems of control and modeling in complex systems*. (pp. 66-72). SAMNC RAN. [In Russian]
2. Thanassoulis, E., & Allen, R. (1998). Simulating Weights Restrictions in Data Envelopment Analysis by Means of Unobserved DMUs. *Management Science*, 44(4), 586-594. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.44.4.586>
3. Charnes, A., Cooper, W. W., Lewin, A. Y., & Seiford, L. M. (1994). The DEA Process, Usages and Interpretations. In *Data Envelopment Analysis: Theory, methodology and applications* (pp. 425-435). Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0637-5>
4. Diligenskij, N. V., Gavrilo A. A., & Capenko, M. B. (2005). *Postroenie i identifikaciya matematicheskikh modelej proizvodstvennyh sistem: Uchebnoe posobie*. [Construction and identification of mathematical models of production systems: Tutorial]. Izd-vo ООО «Офорт». [In Russian]



5. Salov, A. G., Gavrilova, A. A., Chirkova, YU. V., & Sagitova, L. A. (2016). Obobshchennaya ocenka sravnitel'noj effektivnosti raboty kotel'nogo oborudovaniya [Generalized assessment of the comparative efficiency of boiler equipment]. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arhitektura: nauchno-tekhnicheskij zhurnal*, 2, 140-146. <https://elibrary.ru/wcfkup> [In Russian]
6. Gavrilova, A., Salov, A., & Sagitova, L. (2019). System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of Transformation. In *Proc. 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. (pp. 736-741). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSCMP45713.2019.8976644>.
7. Gavrilova, A. A., Salov, A. G., & Sagitova, L. A. (2020). Assessment of the Efficiency of the Samara Region's Energy Complex Under Changing Conditions. In *Proc. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271116>

Сведения об авторах

Гаврилова Анна Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» СамГТУ, г. Самара.

ORCID: [0000-0001-6598-6518](https://orcid.org/0000-0001-6598-6518)

E-mail: a.a.gavrilova@mail.ru

Сagitova Ляйсан Акзамовна, старший преподаватель кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция».

ORCID [0000-0002-0833-983X](https://orcid.org/0000-0002-0833-983X)

E-mail: l0410@mail.ru

Чичев Илья Сергеевич, студент Колледжа СамГТУ

Authors about

Anna Aleksandrovna Gavrilova, Cand. of Tech. Sciences, Samara State Technical University, Department of Control and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.

ORCID: [0000-0001-6598-6518](https://orcid.org/0000-0001-6598-6518)

E-mail: a.a.gavrilova@mail.ru

Lyajsan Akzamovna Sagitova, Samara State Technical University, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation.

ORCID [0000-0002-0833-983X](https://orcid.org/0000-0002-0833-983X)

E-mail: l0410@mail.ru

Ilya Sergeevich Chichev, Samara State Technical University



ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ

ENERGY AND RESOURCE SAVING IN TECHNOLOGIES



МОНО- И БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОЧАСТИЦЫ НА ОСНОВЕ ПАЛЛАДИЯ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТРАНСКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПЕРЕНОСА ВОДОРОДА

Андреев Г. А., Пушанкина П. Д., Джимак С. С., Петриев И. С.

Кубанский государственный университет, г. Краснодар

Аннотация

Разработана методика получения высокоактивных Pd-Pt нанокатализаторов на поверхности целюлометаллических Pd-23%Ag мембран. Данные покрытия представляли из себя большое количество пентагонально структурированных наночастиц Pd-Pt со средними размерами порядка 100 нм, предназначенных для интенсификации процесса транспорта водорода. Методом плавки и проката с промежуточными отжигами были получены палладий-серебряные фольги толщиной 30 мкм, которые выступали в качестве основы мембран. Модификация поверхности осуществлялась методом электролитического осаждения с изменением параметров тока осаждения и состава рабочего раствора. Классические методы позволили получить на поверхности тонких палладий-серебряных пленок сферические частицы. Однако, снижение плотности тока осаждения, по сравнению с классическими методиками, и четкое соотношение компонентов в рабочем растворе с добавлением поверхностно-активного вещества позволили получить покрытия на основе частиц с особой геометрией. Разработанные материалы были исследованы в процессах низкотемпературного (25 °C) транспорта водорода в качестве диффузионных мембранных фильтров, где продемонстрировали значения плотности проникающего потока до 0,42 ммоль/с м² при рабочих давлениях до 0,3 МПа. Установлено, что значения плотности проникающего потока водорода через мембраны, модифицированные пентадвойникованными Pd-Pt частицами, до 2,1 раза выше, чем через мембраны с классической палладиевой чернью. Данные нанокатализаторы на основе пентадвойникованных Pd-Pt частиц позволили значительно интенсифицировать транспорт водорода в условиях низких температур. Разработанные мембранные материалы смогут стать основой как для низкотемпературных устройств, таких как топливный элемент, водородный компрессор, так и найти применение в качестве диффузионных фильтров в реакторах парового риформинга.

Ключевые слова: палладийсодержащие мембраны, наноструктурированные покрытия, водородопроницаемость, водородные переносчики, пентадвойникованные наночастицы.

MONO- AND BIMETALLIC PD-PT NANOPARTICLES AS AN EFFICIENT TOOL FOR THE INTENSIFICATION OF TRANSCRYSTALLINE HYDROGEN TRANSPORT

Georgy Andreev, Polina Pushankina, Stepan Djimak, Iliya Petriev

Kuban State University, Krasnodar

Abstract

A technique has been developed for obtaining highly active Pd-Pt nanocatalysts on the surface of all-metal Pd-23%Ag membranes. These coatings were a large number of pentagonally structured Pd-Pt nanoparticles with an average size of about 100 nm, designed to intensify the process of hydrogen transport. By melting and rolling with intermediate annealing, palladium-silver foils 30 μm thick were obtained, which acted as the basis of the membranes. Surface modification was carried



out by electrolytic deposition with a change in the parameters of the deposition current and the composition of the working solution. Classical methods made it possible to obtain spherical particles on the surface of thin palladium-silver films. However, a decrease in the deposition current density, compared to classical methods, and a clear ratio of components in the working solution with the addition of a surfactant made it possible to obtain coatings based on particles with a special geometry. The developed materials were studied in the processes of low-temperature (25 °C) hydrogen transport as diffusion membrane filters, where they demonstrated penetrating flux density values up to 0.42 mmol/s m² at operating pressures up to 0.3 MPa. It has been established that the density values of the hydrogen penetrating flux through membranes modified with pentatwinned Pd-Pt particles are up to 2.1 times higher than through membranes with classical palladium black. These nanocatalysts based on pentatwinned Pd-Pt particles made it possible to significantly intensify hydrogen transport at low temperatures. The developed membrane materials can become the basis for both low-temperature devices, such as a fuel cell, a hydrogen compressor, and find application as diffusion filters in steam reforming reactors.

Keywords: palladium-containing membranes, nanostructured coatings, hydrogen permeability, hydrogen carriers, penta-twinned nanoparticles.

Введение

Водород высокой степени чистоты активно используется во многих областях промышленности, например, в химической и нефтехимической, а также для производства микроэлектроники [1-4]. Одним из способов получения высокочистого водорода является его мембранное выделения. Мембраны на основе палладия являются перспективным материалом для получения и очистки водорода в лабораторных и промышленных условиях [5-8], однако, при низких температурах (<200 °C) они практически непроницаемы. Преодолеть это условие можно путем модификации поверхности мембраны покрытиями-катализаторами на основе наночастиц [9]. Каталитические системы на основе палладия и платины являются достаточно устойчивыми к каталитическим ядам, таким как монооксид углерода (CO), что делает их перспективными материалами для использования в устройствах диффузионной очистки водорода и топливных элементах. Нанесение таких покрытий позволит интенсифицировать транспорт водорода и сделать его вообще возможным в условиях низких температур, где подавляющее влияние на процесс проникновения водорода оказывают поверхностные стадии. Поэтому целью исследования была разработка высокоактивных каталитических систем – нанокатализаторов на основе Pd-Pt пентадвойникованных наночастиц, способных интенсифицировать транспорт водорода через мембраны на основе палладия в условиях низких температур.

Материалы и методы

В качестве основы для создания водородопроницаемых мембран выступали пленки, изготовленные из сплава Pd-23%Ag. Причина выбора такого сплава заключалась в его высокой проницаемости по водороду, а также высокой механической и химической стабильности. Палладий-серебряные пленки были получены путем сплавления компонентов в электродуговой печи в атмосфере аргона и последующим холодным прокатом на вальцевом станке Durston DMR130 с промежуточными отжигами до толщины 30 мкм.

На поверхности полученных Pd-23%Ag пленок методом электролитического осаждения было синтезировано два типа покрытий по классической и авторской методикам. Перед проведением синтеза классической палладиевой черни пленки сплава Pd-23%Ag закрепляли в держателе, промывали и обезжиривали кипячением в 96% этаноле. После чего образцы тонких пленок переносили в электролитическую ячейку для



поляризации в растворе 0,1 М H_2SO_4 при плотности тока 10–20 mA/cm^2 . Далее пленки Pd-23%Ag переносили в ячейку с рабочим раствором H_2PdCl_4 . Классическая палладиевая чернь была получена на обеих сторонах пленки при плотности тока осаждения 5–6 mA/cm^2 .

Для получения высокоактивных палладий-платиновых нанокатализаторов на поверхности палладий-серебряных пленок использовался такой же метод подготовки, однако от классического метода существенное отличие заключалось в добавлении в рабочий раствор H_2PdCl_4 сурфактанта – тетрабутиламмоний бромида (0,01 моль/л) и снижении плотности тока осаждения до 4–5 mA/cm^2 . В качестве электрода, с которого осуществлялось осаждение, использовалась тонкая пленка, изготовленная из сплава палладий-платины.

Разработанные мембранные материалы исследовались в процессе низкотемпературного транспорта водорода. Пленки Pd-23%Ag помещали в специальную ячейку с медными кольцами и серебряными прокладками, после чего надежно фиксировали фланцевыми соединениями. Перед проведением эксперимента система продувалась гелием, после чего осуществлялось полное вакуумирование камеры. После продувки камеры на входную сторону мембраны при температуре 25 °С подавался водород при давлениях от 0,05 до 0,3 МПа.

Результаты и обсуждения (Results and Discussion)

Классическая методика синтеза палладиевой черни предусматривает получение частиц только сферической формы. Однако, новая разработанная методика позволила получить покрытия особой геометрии, состоящие из пентадвойникованных Pd-Pt частиц. Полученные покрытия исследовались методом растровой электронной микроскопии. В образце с классической палладиевой чернью наблюдалась достаточно однородная структура, состоящая из сферических частиц со средним размером порядка 90 нм. В образце, модифицированном по авторской методике, наблюдалось большое количество пентагональноструктурированных наночастиц на основе палладий-платины со средними размерами порядка 100 нм. Микрофотографии поверхности модифицированных пленок представлены на рисунке 1.

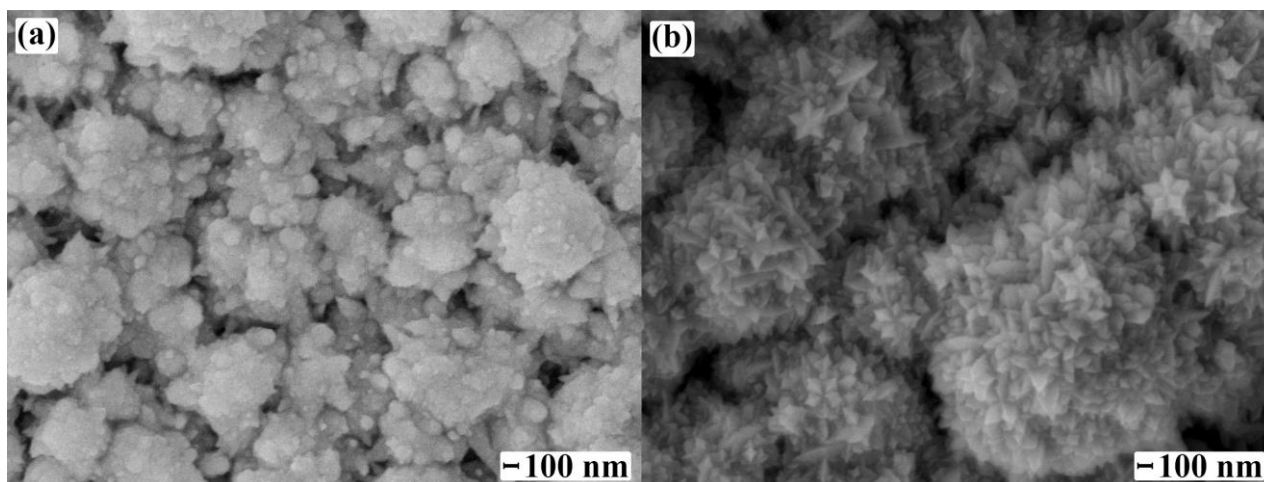


Рис. 1. Микрофотографии поверхности Pd-23%Ag пленок, модифицированных классической палладиевой чернью (a) и пентадвойникованными Pd-Pt частицами (b)

Тонкие модифицированные палладий-серебряные пленки были исследованы в процессах низкотемпературного (25 °С) транспорта водорода в качестве диффузионных мембран в диапазоне давлений от 0,05 до 0,3 МПа с целью определения зависимости плотности потока водорода от прикладываемого давления.

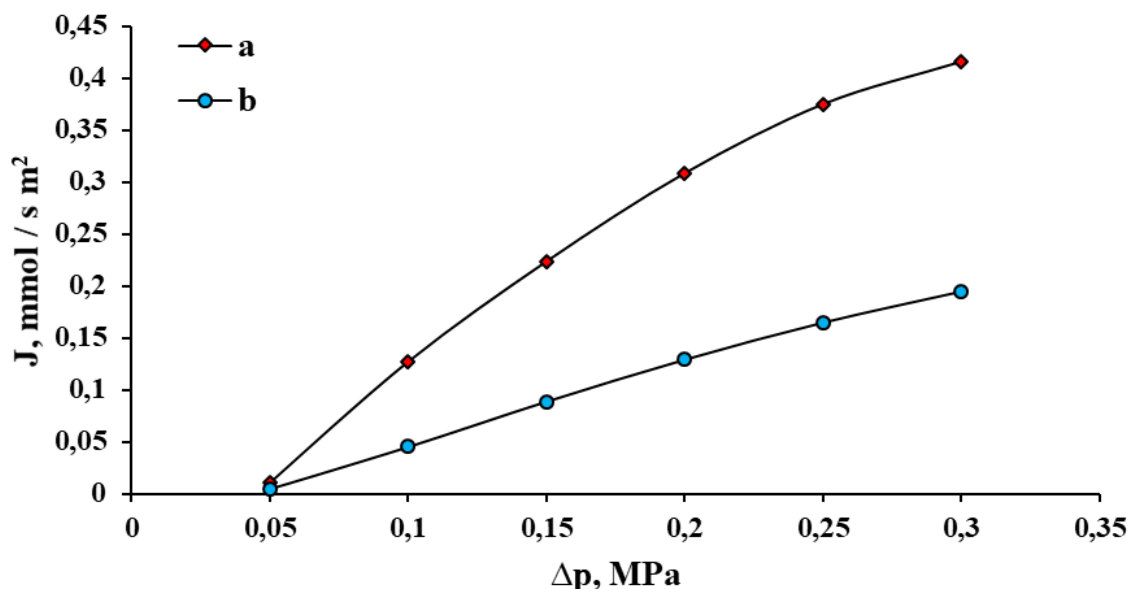


Рис. 2. Зависимость плотности потока водорода от избыточного давления на входной стороне Pd-23%Ag мембран, модифицированных пентадвойникованными Pd-Pt частицами (a) и классической палладиевой чернью (b)

Мембраны, модифицированные пентадвойникованными частицами, продемонстрировали значения плотности потока водорода вплоть до 0,42 ммоль/с м² при избыточном давлении в 0,3 МПа. Полученные значения оказались в 2,1 раза выше, чем для мембран, модифицированных классической палладиевой чернью, продемонстрировавших максимальное значение плотности потока до 0,2 ммоль/с м². Номинально значения достаточно небольшие, но в условиях пониженной температуры являются весьма существенными, поскольку в данном температурном диапазоне практически отсутствует стабильная проницаемость.

Полученный результат, достигнутый мембранами с принципиально новой структурной организацией модифицирующего слоя, может объясняться повышением адсорбционной активности поверхности за счет увеличения количества поверхностных активных центров. Это в свою очередь сказывается на повышении каталитической активности материала по отношению к реакциям с участием водорода. Предположительно, это же является причиной снижения энергетического барьера диссоциативной хемосорбции молекул водорода на поверхности мембраны, что приводит к увеличению скорости проникновения водорода.

Выводы

Разрабатываемые нанокатализаторы на основе пентадвойникованных Pd-Pt наночастиц способны значительно интенсифицировать транспорт водорода, что позволит снизить рабочие температуры применения палладий-серебряных мембран. Это положительно скажется на снижении энергетических затрат в процессе получения высокочистого водорода. Разработанные мембранные материалы могут стать основой как для низкотемпературных устройств, таких как топливный элемент, водородный компрессор, так и найти применение в качестве диффузионных фильтров в реакторах парового риформинга.

Информация о финансировании

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и Кубанского научного фонда № 22-19-20068.



Библиографический список

1. A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation / D. Parra, L. Valverde, F.J. Pino, M. Patel // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 44. P. 279-294. DOI: [10.1016/j.rser.2018.11.010](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.010)
2. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation / J.O. Abe, A.P.I. Popoola, E. Ajenifuja, O.M. Popoola // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, № 29, P. 15072-15086. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2019.04.068](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068)
3. Natural gas-ammonia dual-fuel combustion in spark-ignited engine with various air-fuel ratios and split ratios of ammonia under part load condition / O. Sechul, P. Cheolwoong, K. Seonyeob et al. // *Fuel*. 2021. Vol. 290(2). P. 120095. DOI: [10.1016/j.fuel.2020.120095](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120095)
4. One-step electroplating of palladium-copper alloy layers on a vanadium membrane for hydrogen separation: Quick, easy, and low-cost preparation / N. Endo, N. Dezawa, Y. Komo, T. Maeda // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46 (64). P. 32570-32576. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2021.07.114](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.114)
5. On alloying and low-temperature stability of thin, supported PdAg membranes / G. Zeng, A. Goldbach, L. Shi, H. Xu // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37 (7). P. 6012-6019. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2011.12.126](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.126)
6. Филиппов С. П., Ярославцев А. Б. Водородная энергетика: перспективы развития и материалы // *Успехи химии*. 2021. Т. 90, № 6. С. 627-643. EDN: [YBZBHB](https://www.edn.ru/ybzbhb/).
7. Paglieri S. N., Way J. D. Innovations in palladium membrane research // *Separation and Purification Reviews*. 2002. Vol. 31(1). P. 1-169. DOI: [10.1081/SPM-120006115](https://doi.org/10.1081/SPM-120006115)
8. Kikuchi E. Membrane reactor application to hydrogen production // *Catalysis Today*. 2000. Vol. 56(1). P. 97-101. DOI: [10.1016/S0920-5861\(99\)00256-4](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00256-4)
9. The influence of modifying nanoflower and nanostar type Pd coatings on low temperature hydrogen permeability through Pd-containing membranes / I. Petriev, P. Pushankina, S. Bolotin et al. // *Journal of Membrane Science*. 2021. Vol. 620. № 118894. DOI: [10.1016/j.memsci.2020.118894](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118894)

References

1. Parra, D., Valverde, L., Pino, F.J., & Patel, M. A (2019). A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 279-294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.010>
2. Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O.M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15072-15086. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
3. Sechul, O., Cheolwoong, P., Seonyeob, K., Yongrae, K., Young, C., & Changgi, K. (2021). Natural gas-ammonia dual-fuel combustion in spark-ignited engine with various air-fuel ratios and split ratios of ammonia under part load condition, *Fuel*, 290, 120095. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120095>
4. Endo, N., Dezawa, N., Komo, Y., & Maeda, T. (2021). One-step electroplating of palladium-copper alloy layers on a vanadium membrane for hydrogen separation: Quick, easy, and low-cost preparation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(64), 32570-32576. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.114>
5. Zeng, G., Goldbach, A., Shi, L., & Xu, H. (2012). On alloying and low-temperature stability of thin, supported PdAg membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(7), 6012-6019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.126>
6. Filippov, S. P., & Yaroslavcev, A. B. (2021). Hydrogen energy: development prospects and materials. *Russian Chemical Reviews*, 90(6), 627-643. <https://doi.org/10.1070/RCR5014>
7. Paglieri S. N., & Way J. D. (2002). Innovations in palladium membrane research. *Separation and Purification Reviews*, 31(1), 1-169. <https://doi.org/10.1081/SPM-120006115>
8. Kikuchi, E. (2000). Membrane reactor application to hydrogen production. *Catalysis Today*, 56 (1), 97-101. [http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00256-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00256-4)
9. Petriev, I., Pushankina, P., Bolotin, S., Lutsenko, I., Kukueva, E., & Baryshev, M. (2021). The influence of modifying nanoflower and nanostar type Pd coatings on low temperature hydrogen permea-



bility through Pd-containing membranes. *Journal of Membrane Science*, 620, 118894.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118894>

Сведения об авторах

Андреев Георгий Александрович, лаборант-исследователь, научно-техническая часть КубГУ.

E-mail: mr.georgiy3017@mail.ru.

Пушанкина Полина Дмитриевна, младший научный сотрудник, научно-техническая часть КубГУ.

E-mail: polina_pushankina@mail.ru

ORCID: [0000-0003-2349-7163](https://orcid.org/0000-0003-2349-7163)

Джимак Степан Сергеевич, д-р биол. наук, доцент кафедры радиофизики и нанотехнологий, Кубанский государственный университет.

E-mail: jimak@mail.ru

ORCID: [0000-0003-2618-5376](https://orcid.org/0000-0003-2618-5376)

Петриев Илья Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики и нанотехнологий, Кубанский государственный университет.

E-mail: petriev_iliya@mail.ru

ORCID: [0000-0002-9864-0174](https://orcid.org/0000-0002-9864-0174)

Authors about

Andreev Georgy Aleksandrovich, laboratory assistant researcher, KubSU.

E-mail: mr.georgiy3017@mail.ru.

Pushankina Polina Dmitrievna, junior research scientist, KubSU.

E-mail: polina_pushankina@mail.ru

ORCID: [0000-0003-2349-7163](https://orcid.org/0000-0003-2349-7163)

Dzhimak Stepan Sergeevich, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Radiophysics and Nanotechnology.

E-mail: jimak@mail.ru

ORCID: [0000-0003-2618-5376](https://orcid.org/0000-0003-2618-5376)

Petriev Iliya Sergeevich, PhD, Associate Professor of the Department of Radiophysics and Nanotechnology.

E-mail: petriev_iliya@mail.ru

ORCID: [0000-0002-9864-0174](https://orcid.org/0000-0002-9864-0174)



ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СЕТКИ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Светушков И.И.

ИГЭУ, г. Иваново

Аннотация

Приведена оценка эффективности двух численных методов решения многомерных задач теории теплопроводности – метода дробных шагов и метода Либмана. Сравнение эффективности данных методов выполнено для условий работы промышленных печей на примере расчета симметричного нагрева двумерного цилиндра и трехмерной пластины, изготовленных из материалов с разными теплофизическими свойствами (корунд, керамический кирпич и углеродистая сталь). Двумерное осесимметричное температурное поле для цилиндра и трехмерное поле температур для заготовки в виде параллелепипеда найдено методом сеток при граничных условиях II и III родов. Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений и краевых условий выполнена методом контрольного объема по неявной конечно-разностной схеме. Разработанные алгоритмы решения многомерных задач внутреннего теплообмена методом дробных шагов и методом Либмана реализованы в виде компьютерных программ в среде программирования Object Pascal. При сравнении эффективности решения многомерных задач данными методами в качестве критерия оптимизации использовали критерий эффективности разностных схем (КЭРС), предложенный В.В. Бухмировым и Т.Е. Созиновой. Построены номограммы для выбора оптимальных параметров пространственно-временной сетки и наилучшего численного метода решения многомерных задач для конкретного процесса нагрева (охлаждения) твердого тела.

Ключевые слова: многомерные задачи теории теплопроводности, метод дробных шагов, метод Либмана, критерий эффективности разностных схем, моделирование нагрева (охлаждения) твердых тел цилиндрической и прямоугольной формы.

SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE SPACE-TIME GRID IN MATHEMATICAL MODELING OF HEATING OF WORKPIECES IN INDUSTRIAL FURNACES

Vyacheslav Bukhmirov, Daria Rakutina, Ilya Svetushkov

Ivanovo State Power University, Ivanovo

Abstract

The efficiency of two numerical methods for solving multidimensional problems of the theory of thermal conductivity – the fractional steps method and the Liebman method - is evaluated. The efficiency of these methods is compared for the operating conditions of industrial furnaces by the example of calculating the symmetrical heating of a two-dimensional cylinder and a three-dimensional plate made of materials with different thermophysical properties (corundum, ceramic brick and carbon steel). A two-dimensional axisymmetric temperature field for a cylinder and a three-dimensional temperature field for a workpiece in the form of a parallelepiped were found by the grid method under boundary conditions of the II and III genera. The difference approximation of differential equations and boundary conditions is performed by the control volume method according to an implicit finite difference scheme. The developed algorithms for solving multidimensional problems of internal heat transfer by fractional steps and the Liebman method are imple-



mented in the form of computer programs in the Object Pascal programming environment. When comparing the effectiveness of solving multidimensional problems with these methods, the criterion of the effectiveness of difference schemes (CERS) proposed by V.V. Bukhmirov and T.E. Sozinova was used as an optimization criterion. Nomograms are constructed to select the optimal parameters of the space-time grid and the best numerical method for solving multidimensional problems for a specific process of heating (cooling) a solid body.

Keywords: multidimensional problems of the theory of thermal conductivity, fractional steps method, Liebman method, criterion of efficiency of difference schemes, modeling of heating (cooling) of cylindrical and rectangular solids.

Введение

Ключевой задачей математического моделирования является разработка эффективных вычислительных алгоритмов. При этом с развитием вычислительной техники задача выбора оптимальных параметров расчетной области не становится менее актуальной, а напротив, увеличение производительности современных компьютеров создает возможность для постановки всё более сложных многовариантных задач, время решения которых напрямую зависит от применяемых численных методов и алгоритмов их решения.

В реальных теплотехнических агрегатах задача теплопроводности, как правило, является многомерной, так как обрабатываемые тела имеют сложную геометрическую форму. Решение многомерных задач теории теплопроводности можно получить аналитическими и численными методами. Аналитические решения многомерных задач теплопроводности громоздки и получены лишь для немногих частных случаев [1], поэтому в настоящее время наиболее распространенными методами решения многомерных задач теории теплопроводности являются численные методы [2-4]. При разработке эксклюзивных численных математических моделей тепломассообмена наибольшее распространение получил метод конечных разностей или метод сеток. Для решения построенных на основе метода конечных разностей разностных схем в многомерных задачах теплопроводности, обычно применяют различные итерационные методы, а также метод дробных шагов [3, 5, 6].

Среди итерационных методов расчета, используемых для решения задач большой размерности, следует отметить метод простой итерации, метод Либмана и метод итерации с введением коэффициента релаксации. Все они основаны на многократном повторении одного и того же алгоритма, который дает результат, постепенно приближающийся к точному решению. Различие между методами простой итерации и Либмана заключается в разных способах присваивания новых значений переменным. В методе простой итерации присваивание уточненных значений производится после окончания расчетов на данном шаге итерации всем переменным одновременно. В методе Либмана уточненные значения переменных используются сразу же после их получения. В связи с этим скорость сходимости метода Либмана значительно выше скорости сходимости метода простой итерации [6].

Идея метода дробных шагов заключается в замене многомерной задачи совокупностью одномерных, каждая из которых учитывает перенос тепла вдоль одного из координатных направлений. При этом расчет проводится поэтапно: на первом этапе находят некоторые промежуточные значения температур при учете переноса тепла только вдоль одной из осей координат, на втором этапе эти промежуточные значения рассматриваются в качестве исходных и производится учет теплопереноса вдоль другой оси.

Итерационные методы и метод дробных шагов отличаются друг от друга своей точностью и эффективностью. Цель данной работы заключается в сравнении эффек-



тивности двух основных методов решения многомерных задач теории теплопроводности – метода дробных шагов и метода Либмана. При этом для количественной оценки эффективности численных методов был применен критерий эффективности разностных схем (КЭРС) [7-10].

Материалы и методы

Сравнение эффективности метода дробных шагов и метода Либмана выполнено для условий работы промышленных печей при симметричном нагреве двумерного цилиндра и трехмерной пластины, изготовленных из материалов с разными теплофизическими свойствами: корунда, керамического кирпича и углеродистой стали (рис. 1).

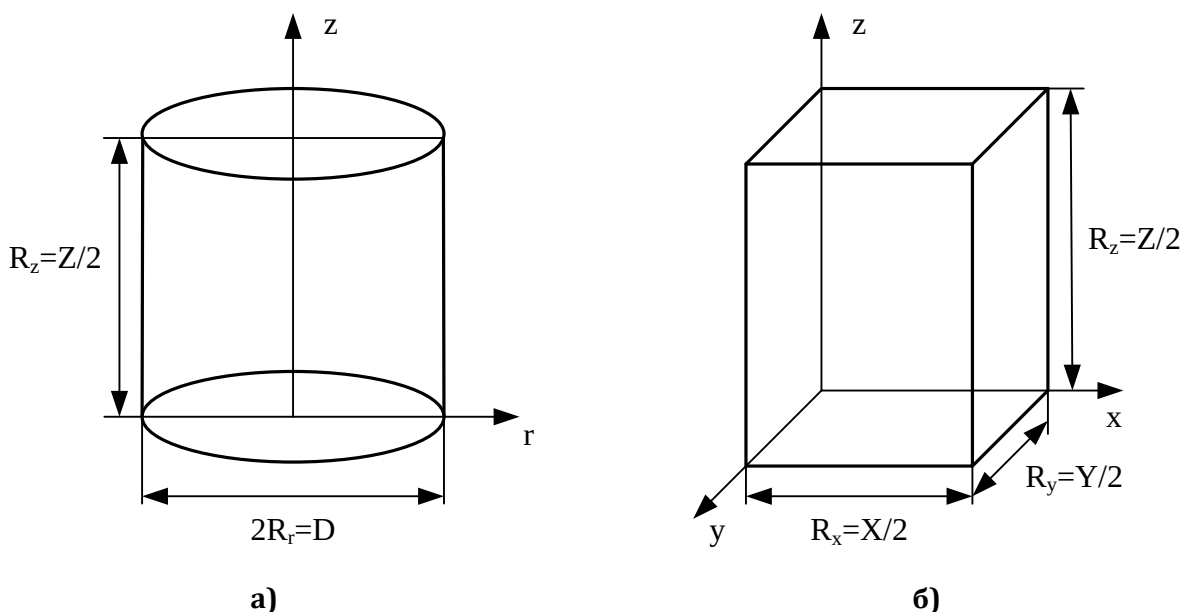


Рис. 1. К расчету температурного поля многомерных тел:
а) двумерный цилиндр (D, Z - диаметр и высота цилиндра);
б) трехмерная пластина (X, Y, Z - длина, ширина и высота пластины)

Дифференциальные уравнения теплопроводности для расчета осесимметричного температурного поля цилиндра и заготовки прямоугольной формы имеют вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (2)$$

На поверхностях твердых тел были рассмотрены граничные условия II или III родов. Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений и краевых условий выполнена методом контрольного объема по неявной конечно-разностной схеме, в результате которой получена система линейных алгебраических разностных уравнений для внутренних и граничных узлов в виде:

для двумерного цилиндра

$$A_{i,j} T_{i+1,j}^{m+1} - B_{i,j} T_{i,j}^{m+1} + C_{i,j} T_{i-1,j}^{m+1} + D_{i,j} T_{i,j+1}^{m+1} + E_{i,j} T_{i,j-1}^{m+1} + P_{i,j} = 0, \quad (3)$$

для трехмерной пластины

$$\begin{aligned} &A p_{i,j,k} T_{i+1,j,k}^{m+1} - B p_{i,j,k} T_{i,j,k}^{m+1} + C p_{i,j,k} T_{i-1,j,k}^{m+1} + D p_{i,j,k} T_{i,j+1,k}^{m+1} \\ &+ E p_{i,j,k} T_{i,j-1,k}^{m+1} + F p_{i,j,k} T_{i,j,k+1}^{m+1} + G p_{i,j,k} T_{i,j,k-1}^{m+1} + P p_{i,j,k} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где $T_{i,j}^m, T_{i,j,k}^m$ – температура в узлах сетки; i, j, k – номера узлов по пространству; m – номер расчетного момента времени.

Алгоритмы решения конечно-разностных уравнений (3) и (4) методом дробных шагов и методом Либмана были реализованы в виде компьютерных программ на языке программирования Object Pascal.

Как уже было отмечено выше, для количественной оценки эффективности этих двух численных методов решения многомерной задачи теории теплопроводности использовали критерий эффективности разностных схем (КЭРС), предложенный на кафедре Теоретических основ теплотехники ИГЭУ [7-10]. При этом разностная сетка, обеспечивающая заданную точность расчета при максимальном значении КЭРСа, является оптимальной.

Формула для расчета критерия эффективности разностных схем в общем случае имеет вид [10]:

$$K_{\text{эрс}} = \left[\varphi_{\text{рс}} (N_{x1} + 1) (N_{x2} + 1) (N_{x3} + 1) \tau_{\text{кон}} / \Delta \tau \right]^{-1} \quad (5)$$

где $\varphi_{\text{рс}}$ – коэффициент, характеризующий удельные вычислительные затраты, т.е. количество элементарных операций, приходящихся на один узел пространственной сетки при расчете одного шага по времени; N_{x1}, N_{x2}, N_{x3} – число разностных слоев по трем ортогональным координатам; $\tau_{\text{кон}}$ – время нагрева; $\Delta \tau$ – шаг по времени.

При определении $\varphi_{\text{рс}}$ в качестве единицы измерения удобно использовать величину удельных вычислительных затрат, необходимых для реализации некоторого базового алгоритма. В этом случае коэффициент $\varphi_{\text{рс}}$ приобретает смысл коэффициента относительной трудоемкости, который может быть определен по соотношению времени расчета по программам, реализующим исследуемый и базовый алгоритмы решения разностных схем.

Для корректного определения коэффициента относительной трудоемкости $\varphi_{\text{р.с.}}$ необходимо:

- вычислительные программы писать на одном и том же языке программирования и в одном стиле (организация циклов, описание идентичных переменных и т.п.);
- вычислительный эксперимент проводить на одном классе персональных компьютеров.

В качестве базовой схемы была принята разностная схема, реализуемая методом дробных шагов. Коэффициент относительной трудоемкости для базовой разностной схемы по определению равен единице $\varphi_{\text{рс}}^{\text{МД}} = 1$. Коэффициент относительной трудоемкости для метода Либмана находили как отношение времени расчета этим методом к времени расчета базовым методом:

$$\varphi_{\text{р.с.}}^{\text{МЛ}} = \frac{\tau_{\text{МЛ}}}{\tau_{\text{МД}}} \quad (6)$$

Для решения поставленной задачи необходимо исследовать зависимость критерия эффективности разностных схем от относительной максимальной погрешности



расчета температурного поля $\Delta_{\max}$ при разном числе сеточных слоев по пространству и времени.

Максимальную относительную погрешность расчета температурного поля трехмерной пластины и двумерного цилиндра в конечный момент времени определяли по формулам:

$$\Delta_{\max} = \frac{\max_{i,j,k} |T(x_i, y_j, z_k, \tau_{\text{кон}}) - T_{i,j,k}^M|}{T(x_i, y_j, z_k, \tau_{\text{кон}})} \quad \text{и} \quad \Delta_{\max} = \frac{\max_{i,j} |T(r_i, z_j, \tau_{\text{кон}}) - T_{i,j}^M|}{T(r_i, z_j, \tau_{\text{кон}})} \quad (7)$$

где $T(x_i, y_j, z_k, \tau_{\text{кон}})$ и $T(r_i, z_j, \tau_{\text{кон}})$ – точные значения температур в узлах пространственной сетки в момент времени $\tau_{\text{кон}}$; $T_{i,j,k}^M$ и $T_{i,j}^M$ – значения температур в узлах пространственной сетки в момент времени M , соответствующий конечному моменту времени $\tau_{\text{кон}}$, рассчитанные по методу конечных разностей.

Точные значения температур $T(x_i, y_j, z_k, \tau_{\text{кон}})$ и $T(r_i, z_j, \tau_{\text{кон}})$ найдены суперпозицией (наложением) температурных полей тел простой формы, которые получены по известному аналитическому решению [11, 12].

Результаты

В результате расчета получили зависимости коэффициента относительной трудоемкости $\phi_{\text{р.с}}^{\text{МЛ}}$ от числа разностных слоев по пространству N для двумерного цилиндра (пунктирная линия) и трехмерной пластины (сплошная линия) при граничных условиях II и III рода (рис. 2). Графики построены при постоянном значении шага по времени, равном одной секунде $\Delta t = 1$ с.

Из графиков, показанных на рис.2, видно, что зависимость $\phi_{\text{р.с}}^{\text{МЛ}} = f(N)$ имеет колебательный характер и с увеличением числа разностных слоев по пространству коэффициент относительной трудоемкости возрастает. При этом абсолютное значение $\phi_{\text{р.с}}^{\text{МЛ}}$ зависит от теплофизических свойств материала. Колебательный характер зависимости $\phi_{\text{р.с}}^{\text{МЛ}} = f(N)$ объясняется изменением погрешности аппроксимации в зависимости от числа слоев разбиения по пространству.

Анализ данных, представленных на рис. 2, позволяет заключить, что трудоемкость метода Либмана в основном выше трудоемкости метода дробных шагов, однако при условии $N < 15$ и $\Delta t \leq 1$ с коэффициент относительной трудоемкости метода Либмана меньше единицы $\phi_{\text{р.с}}^{\text{МЛ}} \leq 1$, что говорит о меньшей трудоемкости метода Либмана по сравнению с методом дробных шагов.

При численной реализации разработанной математической модели теплопроводности необходимо обеспечить заданную точность расчета при минимальном объеме вычислений. Для этого необходимо выбрать оптимальные размеры сеточной области для решения конкретной краевой задачи. В результате компьютерного исследования построены 12 номограмм, которые позволяют для конкретного случая кондуктивного теплообмена рассчитывать оптимальные параметры пространственно-временной сетки и выбирать предпочтительный метод численного расчета многомерных задач теплопроводности по критерию эффективности разностных схем (КЭРС).

На номограммах показана зависимость КЭРС для метода дробных шагов и для метода Либмана и сеточных параметров ($N, \Delta t$) от максимальной относительной погрешности расчета температурного поля в конечный момент времени ($\Delta_{\max}$).



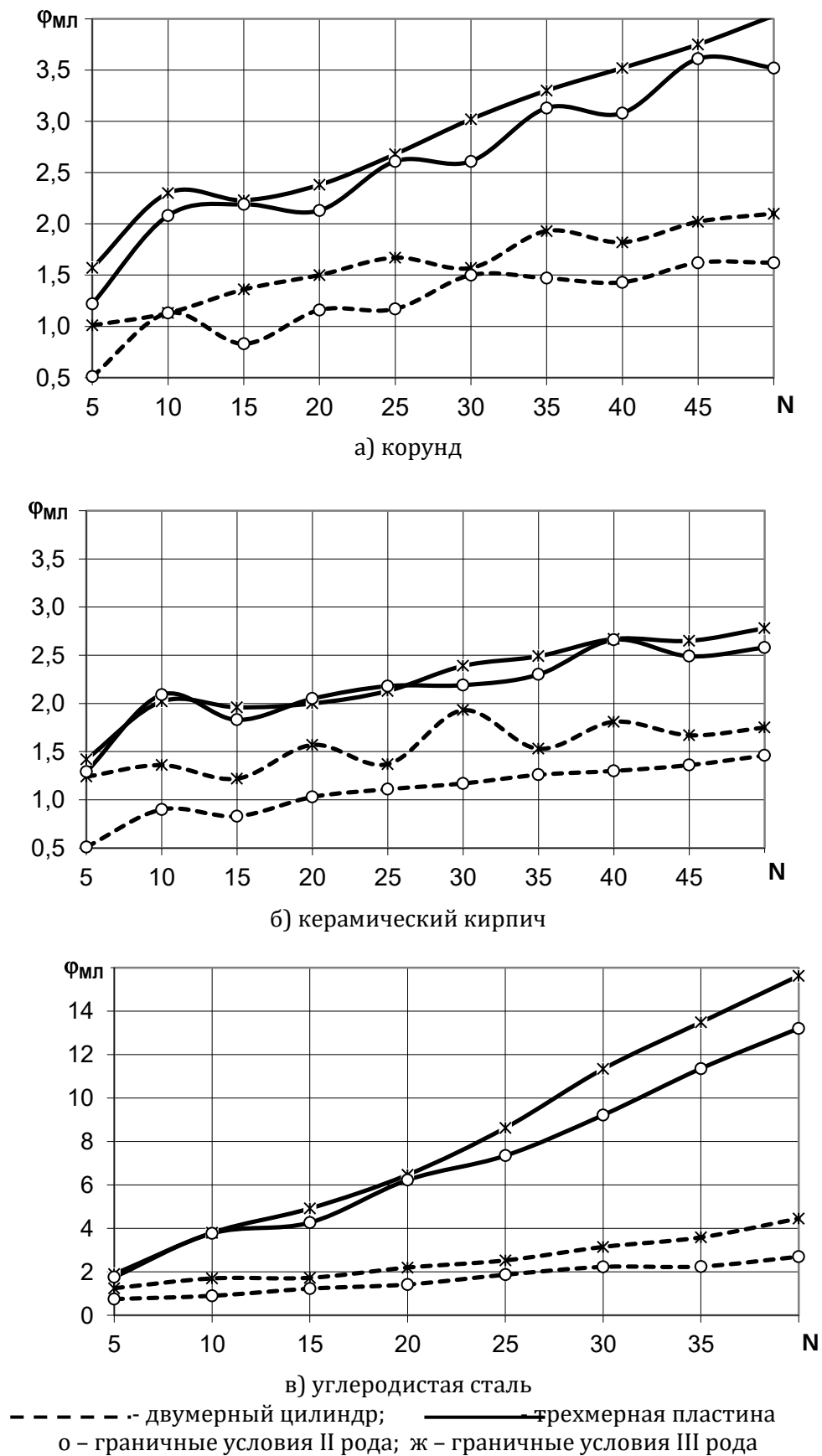


Рис. 2. Зависимость коэффициента относительной трудоемкости метода Либмана от числа разностных слоев по пространству

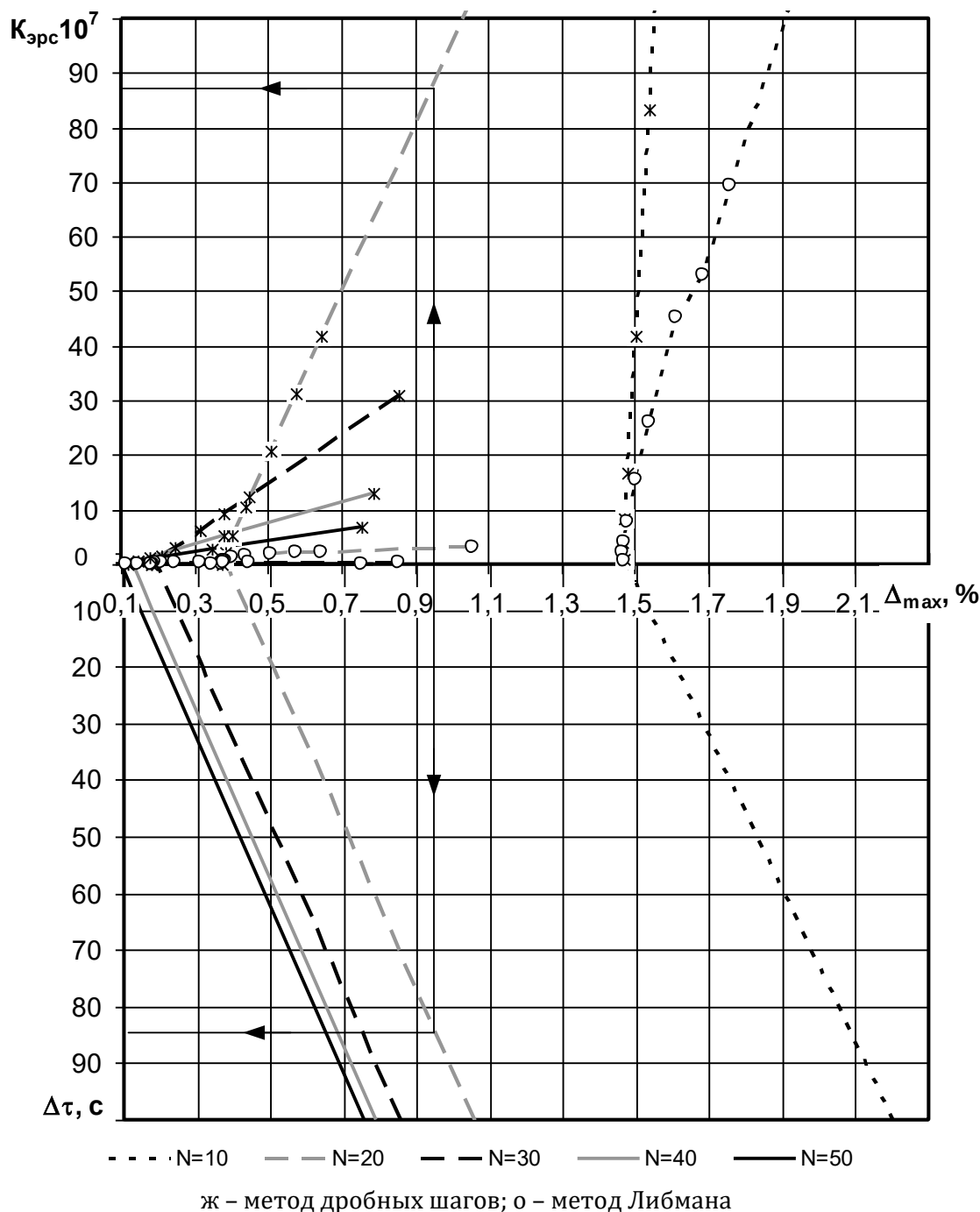


Рис. 3. Зависимость КЭРС от максимальной относительной погрешности и параметров разностной сетки в конечный момент времени нагрева для трехмерной пластины при граничных условиях II рода (материал – корунд)

Номограммы построены для двумерного цилиндра и трехмерной пластины, изготовленных из материалов с разными теплофизическими свойствами, при граничных условиях II и III рода. Графики построены при одинаковом числе разностных слоев по каждому из координатных направлений N . В качестве примера на рис. 3 представлена номограмма для трехмерной пластины, изготовленной из корунда, при граничных условиях II рода.

Зависимости $K_{эрс} = f(\Delta_{\max}, \Delta\tau, N)$ позволяют по заданной точности расчета $\Delta_{\max}$ подобрать значения N и $\Delta\tau$, при которых значение КЭРС имеет максимальное значение. Также по заданному числу разностных слоев по пространству и времени можно опре-

делить максимальную относительную погрешность расчета температурного поля и значение КЭРС. Например, из анализа графиков на рис. 3 следует, что расчет температурного поля трехмерной пластины, изготовленной из корунда, с точностью менее 1% необходимо выполнять методом дробных шагов при числе слоев по пространству $N=20$ и шаге по времени $\Delta t = 85$ с.

Установлено, что соотношение эффективности методов дробных шагов и Либмана зависит от параметров пространственно-временной сетки. Так, например, на рис. 3 видно, что при $N \geq 30$ и $\Delta t < 20$ с, а также при $N = 10$ и $\Delta t < 5$ с критерий эффективности имеет одинаковое значения для метода дробных шагов и метода Либмана. Однако, при $N = 20$ и $\Delta t = 50$ с критерий эффективности метода дробных шагов $\sim$ в 25 раз больше критерия эффективности метода дробных шагов.

Выводы

1. Исследована эффективность двух основных методов решения многомерных задач теории теплопроводности – метода дробных шагов и метода Либмана. Для сравнительной оценки эффективности методов применен критерий эффективности разностных схем, предложенный на кафедре ТОТ ИГЭУ.

2. Разработаны алгоритмы решения многомерных задач внутреннего теплообмена методом дробных шагов и методом Либмана, которые реализованы в виде компьютерных программ.

3. Компьютерное исследование показало, что трудоемкость метода Либмана в основном выше трудоемкости метода дробных шагов. Однако, при определенных параметрах пространственно-временной сетки ($N < 15$ и $\Delta t \leq 1$ с) скорость расчета методом Либмана выше скорости расчета методом дробных шагов.

4. Анализ эффективности методов дробных шагов и метода Либмана показал, что при расчете на разностных сетках с большим шагом по времени и пространству эффективнее оказывается метод дробных шагов. На сетках с мелким шагом по времени и пространству эффективность метода дробных шагов практически совпадает с эффективностью метода Либмана.

5. По результатам компьютерного моделирования построены номограммы для расчета оптимальных сеточных параметров и выбора предпочтительного метода численного расчета многомерных задач теплопроводности по критерию эффективности разностных схем (КЭРС)

6. Результаты данной работы в дальнейшем могут быть использованы при математическом моделировании процессов теплопроводности в телах цилиндрической и прямоугольной формы (керамический кирпич, абразивные круги, стальные заготовки) при их термообработке в промышленных печах [13, 14] и в других элементах теплоэнергетического оборудования.

Библиографический список

1. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2005. 430 с.
2. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. М.: Научный мир, 2000. 315 с.
3. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кавельков Г.М. Численные методы. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. 630 с.
4. Каханер Д., Маулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. М.: Мир, 1998. 575 с.



5. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
6. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. Минск: Наука и техника, 1976. 144 с.
7. Бухмиров В.В. Разработка и использование математических моделей для решения актуальных теплотехнических задач металлургического производства: Дис... д-ра техн. наук: 05.16.02. М.: МИСИС, 1998. 464 с.
8. Созинова Т.Е. Разработка метода расчета и исследование теплового и термонапряженного состояния крепи геотермальных скважин: Дис... канд. техн. наук: 05.14.04. Иваново: ИГЭУ, 1997. 238 с.
9. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Созинова Т.Е. Оценка эффективности разностных схем решения задач теплопроводности // Известия Вузов. Черная металлургия. 1999. № 9. С. 58–60. EDN: [XQKQFC](#)
10. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Созинова Т.Е. Критерий эффективности разностных схем решения задач теплообмена // Автоматизированный печной агрегат – основа энергосберегающих технологий металлургии XXI века. Международная научно-практическая конференция. М.: МИСИС, 2000. С. 109–110.
11. Бровкин Л.А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах. Иваново: ИЭИ им. Ленина, 1973. 364 с.
12. Бухмиров В.В. Тепломассообмен: учеб. пособие. Иваново: ИГЭУ, 2014. 360 с.
13. Метод расчёта термообработки абразивной садки в электрической печи сопротивления / В.В. Бухмиров, Е.Н. Гнездов, Д.В. Ракутина и др. // Промышленная энергетика. 2023. № 1. С. 18-23. EDN: [PSJOPD](#). DOI: [10.34831/EP.2023.18.31.003](#)
14. Выбор оптимального режима сушки керамического кирпича / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Е.Н. Бушуев // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения): материалы Международной научно-технической конференции. Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет", 2023. Т.2. С. 319-322. EDN: [DUCZOY](#)

References

1. Kudinov, V. A., Kartashov, E. M., & Kalashnikov, V. V. (2005). *Analiticheskie resheniya zadach teplomassoperenosa i termouprugosti dlya mnogoslojnyh konstrukcij* [Analytical solutions of problems of heat and mass transfer and thermoelasticity for multilayer structures]. Higher School. [In Russian]
2. Samarskiy, A. A., & Gulin, A. V. (2000). *Chislennyye metody matematicheskoy fiziki* [Numerical methods of mathematical physics]. Scientific world. [In Russian]
3. Bakhvalov, N. S., Zhidkov, N. P., & Kabelkov, G. M. (2001). *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Laboratory of Basic Knowledge. [In Russian]
4. Kahaner, D., Mauer, K., & Nash, S. (1998). *Chislennyye metody i programmnoe obespechenie* [Numerical methods and software]. Mir. [In Russian]
5. Samarskiy, A. A., & Vabishevich, P. N. (2003). *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational heat transfer]. Uitorial URSS. [In Russian]
6. Berkovsky, B. M., & Nogotov E. F. (1976). *Raznostnye metody issledovaniya zadach teploobmena* [Difference methods for studying heat transfer problems]. Science and Technology. [In Russian]
7. Bukhmirov, V. V. (1998). *Razrabotka metoda rascheta i issledovanie teplovogo i termonapryazhennogo sostoyaniya krepki geotermal'nyh skvazhin* [Development and use of mathematical models for solving actual thermal engineering problems of metallurgical production] [Dissertations of Doctor of Technical Science, MISIS, Moscow]. MISIS [In Russian]
8. Sozinova, T. E. (1997). *Razrabotka metoda rascheta i issledovanie teplovogo i termonapryazhennogo sostoyaniya krepki geotermal'nyh skvazhin* [Development of a calculation method and investigation of the thermal and thermally stressed state of geothermal well supports] [Dissertations of Candidate of Technical Sciences, IGEU, Ivanovo]. IGEU. <https://elibrary.ru/xqkqfc> [In Russian]
9. Bukhmirov, V. V., Krupennikov, S. A., & Sozinova, T. E. (1999). *Ocenka effektivnosti raznostnyh skhem resheniya zadach teploprovodnosti* [Evaluation of the effectiveness of difference schemes]



- for solving thermal conductivity problems]. *Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya*, 9, 58-60. [In Russian]
10. Bukhmirov, V. V., Krupennikov, S. A., & Sozinova T. E. (2000). Kriterij effektivnosti raznostnykh skhem resheniya zadach teploobmena [Criterion of efficiency of difference schemes for solving heat exchange problems]. In *Proc. of the International Scientific and Practical conference* (pp. 109-110). MISIS. [In Russian]
 11. Brovkin, L. A. (1973). *Temperaturnye polya tel pri nagreve i plavlenii v promyshlennyyh pechah* [Temperature fields of bodies during heating and melting in industrial furnaces]. IEL. [In Russian]
 12. Bukhmirov, V. V. (2014). *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. IGEU. [In Russian]
 13. Bukhmirov, V. V., Gnezdov, E. N., Rakutina, D. V., Gusenkova, N. P., & Suleymanov, M. G. (2023) Metod raschyota termoobrabotki abrazivnoj sadki v elektricheskoy pechi soprotivleniya [Method of calculating the heat treatment of an abrasive cage in an electric resistance furnace]. *Promyshlennaya energetika*, 1, 18-23. <https://doi.org/10.34831/EP.2023.18.31.003> [In Russian]
 14. Bukhmirov, V. V., Rakutina, D. V., & Bushuev, E. N. (2023). Vybora optimal'nogo rezhima sushki keramicheskogo kirpicha [Choosing the optimal mode of drying ceramic bricks]. In *Proc. of the International Scientific and Technical Conference "XXII Benardos readings"* (Vol. 2, pp. 319-322). Ivanovo State Power Engineering University. <https://elibrary.ru/duczoj> [In Russian]

Сведения об авторах

Бухмиров Вячеслав Викторович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет», кафедра теоретических основ теплотехники.

SPIN-код: [7815-6947](https://elibrary.ru/7815-6947)

E-mail: buhmirov@tot.ispu.ru.

Ракутина Дарья Валериевна, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет», кафедра теоретических основ теплотехники.

SPIN-код: [2097-3256](https://elibrary.ru/2097-3256)

E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Светушков Илья Игоревич, аспирант, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет», кафедра теоретических основ теплотехники.

E-mail: kafedra@tot.ispu.ru.

Authors about

Vyacheslav Bukhmirov, Dr. of Tech. Sciences, Department of Theoretical Bases of Heat Engineering, Ivanovo State Power University.

E-mail: buhmirov@tot.ispu.ru.

Daria Rakutina, Cand. of Tech. Sciences, Department of Theoretical Bases of Heat Engineering, Ivanovo State Power University.

E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Ilya Svetushkov, postgraduate student, Department of Theoretical Bases of Heat Engineering, Ivanovo State Power University.

E-mail: kafedra@tot.ispu.ru.



Научное издание
«Энергетические системы»
№ 1, 2023 г.

Научный журнал



Учредитель журнала
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Главный редактор
Трубаев Павел Алексеевич

Подписано в печать 30.07.2023 г.

Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, УК2, оф. 306.