

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



УДК 621.315

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-1-3-21

МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛЭП 6-10 кВ И ИСТОЧНИКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ

Брамм А.М., Хальясмаа А.И., Матренин П.В., Ерошенко С.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
am.bramm@urfu.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Рост доли нелинейных нагрузок и силовой электроники в распределительных сетях 6-10 кВ вызывает увеличение уровня гармонических и интергармонических искажений, что приводит к нарушению синусоидальности напряжения и ускоренному старению оборудования. При этом традиционные контактные методы измерения параметров качества электроэнергии (ПКЭ) ограничены эксплуатационными условиями и требуют сложной организации измерений. **ЦЕЛЬ.** Разработать алгоритм контроля источников искажений в сетях 6-10 кВ на основе сигналов бесконтактных индуктивных и емкостных датчиков электромагнитного поля. **МЕТОДЫ.** Для выделения гармонических и интергармонических составляющих использованы методы спектрального анализа (БПФ и КВПФ), а также метод формирования «спектральных подписей», включающий информативные признаки: изменение амплитуды и фазы основной гармоники (50 Гц), коэффициента ТНД, а также суммарных амплитуд четных и нечетных гармоник. Эксперименты выполнены на лабораторной установке, имитирующей участок ЛЭП 6-10 кВ. Исследованы режимы работы с нагрузкой в виде асинхронного двигателя, диодного моста и однофазной нелинейной нагрузки. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Показано, что индуктивные датчики чувствительны к изменению токовых нагрузок и динамике магнитного потока, в то время как емкостные сенсоры фиксируют искажения электрического поля и асимметрию фаз. Для асинхронного двигателя наблюдалось снижение ТНД до -12% и рост амплитуды основной гармоники до 65%. Для диодного моста характерен рост высокочастотных четных гармоник до +1550%, а для однофазной нелинейной нагрузки – появление фазной несимметрии и увеличение ТНД на 2-4%. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показано, что совмещенное использование индуктивных и емкостных бесконтактных датчиков формирует отличающиеся спектральные подписи для трех рассмотренных типов источников искажений. Разработанный алгоритм позволяет формализовать процедуру формирования эталонной библиотеки «источник–спектр» и может служить основой для построения интеллектуальных систем бесконтактного контроля качества электроэнергии в распределительных сетях 6-10 кВ.

Ключевые слова: *параметры качества электроэнергии; гармонические искажения; бесконтактные датчики; электромагнитное поле; КВПФ; БПФ; ЛЭП 6-10 кВ.*

Для цитирования: Брамм А.М., Хальясмаа А.И., Матренин П.В., Ерошенко С.А. Метод бесконтактного контроля параметров электромагнитного поля ЛЭП 6-10 кВ и источников гармонических искажений, основанный на спектральном анализе данных // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 3-21. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-3-21.

METHOD FOR NON-CONTACT CONTROL OF ELECTROMAGNETIC FIELD PARAMETERS OF 6-10 kV OVERHEAD TRANSMISSION LINE AND HARMONIC DISTORTION SOURCES BASED ON SPECTRAL DATA ANALYSIS

Bramm A.M., Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V., Eroshenko S.A.

**Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia
am.bramm@urfu.ru**

Abstract: *RELEVANCE* of the study lies in the increasing number of nonlinear loads and power electronic devices in 6-10 kV distribution networks is causing an increase in harmonic and interharmonic distortion. This distortion is disrupting the sinusoidal nature of the voltage and accelerating equipment aging. Traditional contact-based methods for measuring power quality parameters are limited by their operating conditions and require complex measurement setups. *OBJECTIVE* of this study aims to develop an algorithm for identifying distortion sources in 6-10 kV networks by analyzing signals from non-contact electromagnetic field sensors that measure inductive and capacitive fields. *METHODS* of the study include spectral analysis techniques, such as Fast Fourier Transform (FFT) and Short-Time Fourier Transform (STFT), to extract harmonic and interharmonic components from the data. These techniques form spectral fingerprints, which include informative features like the variation in amplitude and phase of the fundamental harmonic (50 Hz), total harmonic distortion (THD), and the sum of even and odd harmonic amplitudes. Laboratory experiments were conducted on a 6-10 kV distribution line segment, simulating different operating modes with asynchronous motors, three-phase diodes, and single-phase non-linear loads. *THE RESULTS.* show that inductive sensors are sensitive to changes in current load and magnetic flux, while capacitive sensors can detect electric field distortions and phase asymmetries. For the asynchronous motor, the total harmonic distortion (THD) decreased by up to 12% and the amplitude of the main harmonic increased by 65%. High-frequency even harmonics were generated by the diode bridge with an amplitude growth of up to +1550%. Single-phase nonlinear loads introduced phase asymmetry and increased the THD by 2-4%. *CONCLUSION* states that combination of inductive and capacitive non-contact sensors allows for distinct spectral signatures which can be used as features for further identification algorithms of distortion sources. The developed algorithm can form a reference spectrum library and serve as a basis for intelligent non-contact monitoring systems for power quality control in distribution networks of 6-10 kV

Keywords: *power quality; harmonic distortion; non-contact sensors; electromagnetic field; spectral analysis; FFT; STFT; distribution networks 6-10 kV.*

For citation: Bramm A.M., Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V., Eroshenko S.A. Method for non-contact control of electromagnetic field parameters of 6-10 kV overhead transmission line and harmonic distortion sources based on spectral data analysis. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 3-21. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-3-21.

Введение (Introduction)

Современные распределительные электрические сети 6-10 кВ характеризуются высоким уровнем подключенной в качестве электрической нагрузки силовой электроники, что приводит к усложнению спектрального состава токов и напряжений. Нелинейные элементы – преобразователи частоты, импульсные источники питания и сварочные установки – создают гармонические и интергармонические искажения, нарушающие синусоидальность напряжения и увеличивающие электромагнитные нагрузки на оборудование. Согласно исследованиям Arranz-Gimon A. и соавт. [1], суммарное гармоническое искажение (THD) в современных сетях распределения может достигать

5-8% при преобладании 5-й и 7-й гармоник, что приводит к росту потерь в трансформаторах и снижению ресурса изоляции. Кроме того, при совпадении ряда условий может наблюдаться резонанс высших гармоник, приводящий к более значительному искажению [2].

Проблема усугубляется тенденцией к увеличению доли генераторов на основе возобновляемых источников. Каур J. и Bath S. [3] показали, что преобразователи

инверторного типа, применяемые в системах с солнечными и ветряными установками, формируют специфические спектры искажений, содержащие комбинации субгармоник. Эти компоненты оказывают влияние на устойчивость и управляемость распределительных сетей, что требует уточнения нормативных методов их измерения и оценки.

Традиционно контроль параметров электромагнитного поля линий электропередачи (ЛЭП) выполняется контактными методами [4-5], либо при помощи дистанционного тепловизионного контроля [6-7]. Однако наиболее частой причиной аварийности ЛЭП 6-10 кВ являются замыкания на землю одной или нескольких фаз [8-9]. Для контроля возникновения таких событий могут быть использованы данные об искажениях параметров качества электроэнергии.

Контроль параметров качества электроэнергии осуществляется при помощи измерений токов и напряжений с использованием контактных датчиков и измерительных трансформаторов. Однако такой подход не всегда возможен в действующих установках. Основными ограничениями для эффективного применения контактных методов контроля выступают: эксплуатационные и пространственно-конструктивные ограничения; сложности с масштабируемостью и охватом сетей.

Эксплуатационные ограничения выражены в необходимости снятия напряжения с токоведущих частей (проводов ЛЭП или измерительных цепей ТП) для подключения контактных датчиков и измерительных приборов. Конструктивные ограничения заключаются в отсутствии внутри большинства ТП необходимого пространства и возможности подключения питания для размещения измерительных приборов для регистрации ПКЭ. Проблемы масштабируемости и охвата выражаются в том, что для локализации источников искажений ПКЭ необходимо организовать множество точек измерения (равномерно покрывающих участок распределительной сети). При использовании регистраторов ПКЭ или контактных датчиков покрытие участка сети с необходимой плотностью потребует колоссальных временных, трудовых и финансовых затрат.

Таким образом, вопросы измерения и идентификации источников гармонических искажений сохраняют актуальность как с точки зрения метрологического обеспечения, так и в аспекте внедрения цифровых технологий контроля. Существующие методы регистрации параметров тока и напряжения не обеспечивают требуемую точность при мониторинге сетей 6-10 кВ в условиях действия помех и изменчивых нагрузок.

Цель исследования заключается в разработке алгоритма и методики диагностики источников искажений на основе анализа сигналов, регистрируемых бесконтактными датчиками электромагнитного поля.

Научная значимость исследования состоит в развитии подходов к спектральному анализу сигналов бесконтактных датчиков электромагнитного поля в распределительных сетях 6-10 кВ и в формализации набора спектральных признаков для последующей автоматизированной идентификации источников искажений.

Практическая значимость исследования заключается в возможности построения автономных интеллектуальных систем бесконтактного контроля параметров качества электроэнергии на основе предложенного алгоритма и набора спектральных признаков.

Ожидается, что предложенный подход обеспечит идентификацию источников возмущений с точностью не ниже 80% и станет основой для построения аппаратно-программного комплекса мониторинга качества электроэнергии в распределительных сетях 6-10 кВ.

Литературный обзор (Literature Review)

Качество электрической энергии в распределительных сетях 6-10 кВ определяется совокупностью факторов, включая параметры питающего напряжения, характер нагрузки и наличие нелинейных элементов. Гармонические искажения вызывают дополнительные потери, нагрев трансформаторов, ускоренное старение изоляции и сбои в работе электроники. Проблема их контроля подробно рассмотрена в Handbook of Power Quality под редакцией A. Baghini¹, где обоснована необходимость оценки гармонического состава напряжения и тока в точках общего присоединения (РСС).

Среди работ по этой теме выделяется обзор Ali Z. M., Calasan M., Jurado F. и Abdel Aleem S. H. E. [10], в котором детализированы физические механизмы возникновения гармоник, методы компенсации реактивной мощности и подходы к анализу

¹Baghini A. (ed.) Handbook of Power Quality. – Chichester: John Wiley & Sons, 2013. – 642 p. – ISBN 9781119969480. – URL: <https://www.academia.edu/> (дата обращения: 10.10.25).

несимметричных токов. Авторы подчеркнули, что гармонические составляющие существенно влияют на режимы работы сетей среднего напряжения и требуют системного регулирования.

В монографии Power System Harmonics J. Arrillaga и N. R. Watson [11] приведены математические модели генерации гармоник силовыми преобразователями и методики их учета при проектировании фильтров. Авторы предложили применять разложение Фурье с оконными функциями для анализа токов в цепях с насыщением трансформаторов и асимметрией фаз.

Российская нормативная база основывается на стандарте ГОСТ 32144-2013², который устанавливает предельные значения индивидуальных гармоник и коэффициента суммарного гармонического искажения напряжения ($THD \leq 8\%$). Документ определяет допустимые уровни гармоник по номерам и напряжениям, а также порядок контроля на стороне потребителя. ГОСТ 32144–2013 является базовым документом для электроэнергетических компаний при оценке соответствия качества электроэнергии требованиям технических регламентов.

В международной практике применяются несколько ключевых документов.

Руководство IEC/TR 61000-3-6:2008³ регламентирует распределение допустимых эмиссий гармоник между присоединенными установками на средних и высоких напряжениях. Стандарт вводит понятие «планового уровня напряжения» в точке общего присоединения и задает процедуру расчета лимитов по напряжению и току в зависимости от мощности установки.

В документе IEEE Std 519-2014⁴ приведены рекомендации по ограничению гармонических искажений на стороне как нагрузки, так и источника. Стандарт устанавливает граничные значения THD для напряжения (не более 5% в сетях 1-69 кВ) и для тока ($TDD \leq 8\%$ при коэффициенте короткого замыкания менее 20). Этот подход ориентирован на предотвращение перегрузки генераторов и кабельных линий.

Европейский стандарт EN 50160:2010⁵ определяет параметры качества напряжения, обеспечиваемые в распределительных сетях общего пользования. В документе закреплены допустимые отклонения частоты, формы волны, уровня напряжения и мгновенных колебаний, включая ограничение 6% и 5% для 5-й и 7-й гармоник соответственно.

Методы практического контроля гармоник в электроэнергетике детально проанализированы Al-Feilat E. a. A., El-Amin I. и Bettayeb M. [12]. В их сравнительном исследовании показано, что традиционные измерения, основанные на трансформаторах тока и напряжения, обеспечивают высокую точность, но чувствительны к насыщению магнитопроводов и шумам на частотах выше 2 кГц.

В области бесконтактных технологий Chen K. L., Hu W. J. и Xu W. [13] разработали датчик для воздушных линий, использующий комбинированный принцип регистрации электрического и магнитного полей. Испытания подтвердили возможность получения напряжения с погрешностью менее 3% без прямого подключения к фазному проводнику.

Sun S. и соавт. [14] представили метод измерения напряжения по инверсии ближнего электрического поля, позволяющий оценивать распределение потенциалов вокруг линии электропередачи. Работа продемонстрировала устойчивость метода к внешним помехам и его пригодность для мониторинга сетей среднего класса напряжения.

В исследовании Zhang W. и соавт. [15] описан многоэлектродный датчик, обеспечивающий пространственное разрешение измерений электрического поля и формирование многомерных спектров. Реализованный алгоритм обработки позволил разделять вклад отдельных фаз и источников искажений.

Работа Testa A. И соавт. [16] содержит обоснование методов моделирования интергармоник, возникающих вследствие работы преобразователей. Разработанная ими

²ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

³IEC/TR 61000-3-6:2008. Electromagnetic compatibility (EMC) – Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems. – IEC, 2008.

⁴IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – IEEE, 2014.

⁵EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. – CENELEC, 2010.

процедура идентификации частотных составляющих позволила повысить точность выделения подгармоник в диапазоне 40-48 Гц.

Barros J., Diego R. I. и de Apraiz M. [17] применили вейвлет-преобразование для обнаружения кратковременных отклонений напряжения. Метод продемонстрировал возможность локализации событий во времени и частоте, что делает его эффективным для анализа динамических возмущений.

Dash P. K., Pradhan A. K. и Panda G. [18] исследовали использование S-преобразования для анализа мгновенных характеристик качества электроэнергии. Полученные результаты показали, что этот подход обеспечивает высокую устойчивость к шумам и подходит для автоматизированной классификации событий.

Современная практика мониторинга качества электроэнергии показывает, что для сетей 6-10 кВ необходимо объединение нормативных требований (ГОСТ 32144–2013, IEC 61000-3-6, IEEE 519, EN 50160) с внедрением бесконтактных методов измерения и усовершенствованных алгоритмов спектрального анализа. Это обеспечивает повышение достоверности диагностики и согласованность результатов измерений между различными приборами и системами мониторинга.

Объектом данного исследования являются распределительные электрические сети 6-10 кВ, в которых электромагнитные процессы определяются совокупностью гармонических и интергармонических составляющих токов и напряжений. Эти составляющие возникают вследствие работы нелинейных нагрузок и устройств силовой электроники, что приводит к искажению формы сигнала и усложнению диагностики режимов работы сети.

Регистрация таких искажений традиционно выполняется контактными средствами – трансформаторами тока и напряжения. Однако, как показано в исследованиях Schirmer P. A. and Mrogas I. и соавт. [19], более эффективным решением являются бесконтактные датчики электромагнитного поля. Авторы продемонстрировали, что использование магнитных и электрических антенн позволяет фиксировать распределение тока и напряжения в линии без непосредственного подключения к проводнику. Этот подход обеспечивает непрерывный контроль состояния сети с минимальным вмешательством в силовую часть.

Одним из ключевых элементов системы бесконтактного мониторинга являются индуктивные датчики. Sandler R., Brehm M., Slomovitz D. и Barreto G. [20] предложили конструкцию измерительной катушки типа Роговского, оптимизированной для регистрации гармонических токов высокого напряжения. В работе приведены параметры проектирования магнитопровода, число витков и методы компенсации фазового сдвига, что делает возможным точное измерение токов до 5 кГц.

Для измерения напряжения без подключения к токоведущим частям используются емкостные датчики. Коллектив авторов Peng H., Liu H., Shang K., Li G., Zhao L и соавт. [21] разработали емкостный датчик с несколькими электродами, предназначенный для установки на проводах распределительных линий. Экспериментальные результаты показали, что измеряемое напряжение пропорционально скорости изменения потенциала, а фазовая коррекция может быть обеспечена программной интеграцией сигнала.

Исследование Kuphalan T.S. и соавт. [22] подтверждает эффективность магнитных датчиков для регистрации токов в кабельных линиях. Авторы применили высокочастотные катушки с ферритовым сердечником, что позволило снизить влияние шумов и повысить чувствительность устройства. Такие катушки можно использовать в составе мобильных систем диагностики и лабораторных установок.

Методы измерения распределения электрического поля развиты в работе Roman H. и соавт. [23], где описан емкостный делитель напряжения для бесконтактных измерений на высоковольтных линиях. Авторы показали, что корректный выбор геометрии электродов и расстояния между ними обеспечивает линейную зависимость измеряемого тока от напряженности поля в диапазоне до 10 кВ/м.

В исследовании Nan Z. и соавт. [24] представлена конструкция многоэлектродного емкостного датчика, предназначенного для измерений в сильных электрических полях. Устройство позволяет одновременно регистрировать распределение потенциалов вдоль изолятора, что важно для диагностики состояния высоковольтных вводов и шинных разъемов.

Для спектрального анализа сигналов измерительных каналов используется быстрое

преобразование Фурье (БПФ). В стандарте IEC 61000-4-7:2008⁶ приведена методика усреднения спектров и определения гармоник в окне длительностью 200 мс. Документ определяет алгоритмы дискретизации, вычисления амплитудных и фазовых характеристик, а также правила округления значений THD.

В качестве альтернативы БПФ применяются методы с временной локализацией. Stockwell R.G., Mansinha L. и Lowe R.P. [25] предложили S-преобразование, позволяющее совместно анализировать временную и частотную структуру сигнала. Этот метод используется при анализе интергармоник, кратковременных перенапряжений и переходных процессов в распределительных сетях.

Практическое применение вейвлет-преобразования для задач диагностики показано Yan R. и Gao R.X. [26]. Авторы использовали энергию отдельных вейвлет-компонент в качестве диагностических признаков для оценки качества электроэнергии. Такой метод обеспечивает повышенную чувствительность к слабым гармоникам и устойчивость к шуму.

Для анализа нестационарных сигналов предложены адаптивные методы декомпозиции. Chand P., Davari A., Liu B. и Sedghisigarchi K. [27] разработали метод адаптивного гармонического вейвлет-преобразования (АНWT), обеспечивающий автоматическую подстройку базисных функций под форму сигнала. Это позволило повысить точность выделения информативных признаков при классификации возмущений.

Метрологические аспекты функционирования систем датчиков исследованы Peng H. и соавт. [28]. Авторы показали, что ориентация датчиков и расстояние до проводников существенно влияют на амплитуду и фазу измеренного сигнала, а также предложили алгоритм компенсации погрешностей, связанных с перекрестными наводками.

Проблема точности измерений гармонических составляющих подробно рассмотрена Diqiu S. и соавт. [29], которые предложили методы проектирования катушек Роговского с учетом влияния частоты и добротности цепи. Результаты моделирования подтвердили, что оптимизация геометрии катушки снижает фазовую ошибку измерений до 0,2°.

Сравнение различных методов определения вклада отдельных источников искажений проведено Gianesini B.M., Santos I.N. и Ribeiro P.F. [30]. Авторы предложили использовать эталонную тестовую систему IEEE Benchmark Test System для калибровки алгоритмов анализа гармоник и оценки вклада отдельных потребителей в общий спектр.

Таким образом, совокупность исследований [27-30] демонстрирует переход от контактных методов измерений к бесконтактным датчикам, интегрированным с современными методами спектрального анализа. Применение таких подходов позволяет создать основу для интеллектуальных систем диагностики состояния распределительных сетей и повышения достоверности оценки параметров качества электроэнергии.

Anggriawan D. O. и соавт. [31] предложили использовать нейронную сеть с адаптивной структурой для классификации событий качества электроэнергии по спектральным характеристикам. Авторы показали, что использование обучаемых весов позволяет распознавать тип возмущения по комбинации амплитуд гармоник и коэффициенту THD.

Bosnic J. A. и соавт. [32] продемонстрировали возможность идентификации нагрузки на основе гармонического состава токов.

Samanta I.S. и соавт. [33] применили решающие деревья для классификации PQ-событий. Предложенная структура позволила выполнять распознавание в реальном времени при минимальных вычислительных затратах, что особенно важно для встроженных систем мониторинга.

Gaouda A.M. и соавт. [34] исследовали многомасштабную декомпозицию сигналов методом вейвлетов и показали, что комбинация энергии и энтропии вейвлет-коэффициентов позволяет различать типы нарушений качества.

Janani K. и Himavathi S. [35] разработали алгоритм неинвазивной идентификации нагрузки с использованием гармонических признаков и машинного обучения. Работа подтвердила, что спектральные профили разных потребителей можно эффективно классифицировать без прямого доступа к электрическим цепям.

Rodrigues Junior W. L. и соавт. [36] предложили использовать сверточные нейронные сети (CNN) для автоматической классификации возмущений. Их модель

⁶IEC 61000-4-7:2008. Electromagnetic compatibility (EMC) – General guide on harmonics and interharmonics measurements. – IEC, 2008.

извлекает признаки непосредственно из временных диаграмм и обеспечивает высокую устойчивость к шуму.

Shafiullah M. и соавт. [37] разработали гибридную интеллектуальную систему, сочетающую методы вейвлет-анализа и нечеткой логики. Этот подход продемонстрировал улучшенную точность классификации по сравнению с классическими статистическими методами.

Gu I.Y.H. и Bollen M.H.J. [38] исследовали взаимосвязь между временной и частотной областями анализа. Авторы показали, что совмещение этих подходов позволяет не только классифицировать возмущения, но и оценивать их энергетическую значимость.

Lip W. -M. и соавт. [39] предложили алгоритм обнаружения множественных возмущений, основанный на вейвлет-пакетном преобразовании и адаптивной нейронной сети. Их метод обеспечивает автоматическую настройку параметров модели и высокую точность при перекрывающихся PQ-событиях.

Indu S. S. и соавт. [40] провели обширный сравнительный анализ машинных алгоритмов для идентификации событий качества электроэнергии. Авторы показали, что методы глубокого обучения превосходят традиционные подходы по устойчивости к шумам и скорости обучения.

Анализ литературных источников показывает, что совмещение классических методов спектрального анализа с алгоритмами машинного обучения обеспечивает комплексный подход к диагностике источников искажений. Применение гибридных архитектур (кратковременное преобразование Фурье (КВПФ) /вейвлет + ML) позволяет не только классифицировать возмущения по их спектральному признаку, но и выполнять адаптивную калибровку систем мониторинга. Это делает возможным внедрение интеллектуальных программно-аппаратных комплексов для идентификации источников искажений в сетях 6-10 кВ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для повышения достоверности выявления источников гармонических и интергармонических искажений в распределительных сетях 6-10 кВ предложен алгоритм, основанный на комплексной обработке сигналов, регистрируемых бесконтактными индуктивными и емкостными датчиками электромагнитного поля. Алгоритм предусматривает последовательное выполнение следующих этапов:

- регистрация сигналов бесконтактных датчиков;
- спектральный анализ сигналов;
- формирование информативных признаков;
- сопоставление с эталонной базой и идентификация источника искажения ПКЭ.

Регистрация сигналов бесконтактных датчиков

Сигналы, формируемые бесконтактными датчиками, зависят от протекающих по проводам ЛЭП токов и уровня напряжения проводов. Таким образом сигналы бесконтактных датчиков содержат косвенную информацию о токах и напряжениях в линии. Для обеспечения корректного анализа высших гармонических составляющих сигналы бесконтактных датчиков оцифровывались с частотой дискретизации 3,2 кГц, что обеспечило регистрацию диапазона высших гармоник сигнала вплоть до 32 порядка (1,6 кГц). Такая частота дискретизации является достаточной для анализа высших гармонических составляющих, характерных для процессов передачи электроэнергии на промышленной частоте электрического тока 50 Гц, что подтверждается в том числе нормативной документацией, принятой в РФ (ГОСТ 32144-2013). Данный диапазон близок к предлагаемому в работе Ribeiro P.F. [30] (до 2 кГц) для анализа спектра в общем случае при построении промышленных систем мониторинга.

Спектральный анализ сигналов

Для выделения гармонических и интергармонических составляющих применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Однако, как в [38], использование только БПФ не позволяет корректно фиксировать кратковременные изменения сигнала во времени. Поэтому дополнительно используется метод КВПФ, позволяющий анализировать локальные временные участки.

Формирование информативных признаков

Ключевым этапом алгоритма является извлечение информативных признаков из спектра сигнала. Метод анализа «спектральных подписей» (harmonic fingerprinting) стал основой для формирования спектральных характеристик для источников искажений сигналов бесконтактных датчиков различного типа.

Сопоставление с эталонной базой и идентификация источника искажения ПКЭ

Полученные спектральные характеристики формируют эталонную библиотеку

«спектральных подписей» различных источников искажений.

В качестве информативных признаков для формирования «спектральной подписи» источника искажения используются следующие интерпретируемые параметры:

- процентное изменение амплитуды основной гармоники (50 Гц);
- изменение фазы основной гармоники (50 Гц);
- изменение коэффициента нелинейных искажений (THD);
- суммарные процентные изменения амплитуды для четных и нечетных высших гармоник;
- пять высших гармоник с наибольшим процентным изменением амплитуды.

Процентное изменение амплитуды основной гармоники (50 Гц) вычисляется согласно выражению:

$$\Delta A_{50}^{\%} = 100 \cdot \frac{A^{aft}(n_1) - A^{bef}(n_1)}{A^{bef}(n_1)}, \quad (1)$$

где $\Delta A_{50}^{\%}$ – процентное изменение амплитуды основной гармоники 50 Гц, %; $A^{bef}(n_1)$ – амплитуда основной гармоники (50 Гц) до возмущения; $A^{aft}(n_1)$ – амплитуда основной гармоники (50 Гц) после возмущения.

В случае, если амплитуда основной гармоники близка к нулю:

$$\Delta A_{50}^{\%} = 100 \cdot \frac{2 \cdot (A^{aft}(n_1) - A^{bef}(n_1))}{|A^{aft}(n_1)| - |A^{bef}(n_1)| + \varepsilon}, \quad (2)$$

где ε – близкая к нулю положительная константа (10^{-12}), о.е.

Изменение фазы основной гармоники (50 Гц) определяется по следующему выражению:

$$\Delta \varphi_{50} = \left((\varphi^{aft}(n_1) - \varphi^{bef}(n_1) + 180^\circ) \bmod 360^\circ \right) - 180^\circ, \quad (3)$$

где $\Delta \varphi_{50}$ – изменение фазы основной гармоники (50 Гц), град; $\varphi^{bef}(n_1)$ – фаза основной гармоники (50 Гц) до возмущения, град; $\varphi^{aft}(n_1)$ – фаза основной гармоники (50 Гц) после возмущения, град.

Изменение THD рассчитывается следующим образом:

$$\Delta THD^{\%} = 100 \cdot \left(\frac{\sqrt{\frac{1}{K}} \cdot \sum_{n \in N} (A^{bef}(n_1))^2}{A^{bef}(n_1)} - \frac{\sqrt{\frac{1}{K}} \cdot \sum_{n \in N} (A^{aft}(n_1))^2}{A^{aft}(n_1)} \right), \quad (4)$$

где $\Delta THD^{\%}$ – изменение коэффициента нелинейных искажений, %; $K = |N|$ – число гармоник в рассматриваемом частотном спектре; $N = \{n \mid n \neq n_0, n \neq n_1\}$ – множество номеров гармоник за исключением постоянной составляющей и основной гармоники.

Суммарные процентные изменения амплитуды для четных и нечетных высших гармоник рассчитываются согласно выражениям:

$$\sum \Delta A_{even} = 100 \cdot \frac{\sum_{m \in \{2,4,6,\dots\}} (A^{aft}(n_m) - A^{bef}(n_m))}{A^{bef}(n_1)}, \quad (5)$$

$$\sum \Delta A_{odd} = 100 \cdot \frac{\sum_{m \in \{3,5,7,\dots\}} (A^{aft}(n_m) - A^{bef}(n_m))}{A^{bef}(n_1)}, \quad (6)$$

где $\sum \Delta A_{even}$, $\sum \Delta A_{odd}$ – суммарные процентные изменения амплитуды для четных и нечетных высших гармоник, %; m – множество номеров гармоник (четных/нечетных).

Процентное изменение амплитуды для высших гармоник определяется аналогично выражениям (1) и (2), но с использованием амплитуд заданных гармоник вместо основной гармоники.

Схема проведения экспериментов

Для верификации разработанного алгоритма диагностики источников искажений были проведены лабораторные испытания на основе масштабной имитационной модели ЛЭП 6-10 кВ, реализованной на напряжении 0,4 кВ. Целью экспериментов являлась оценка возможности идентификации источников гармонических и интергармонических

искажений на основе сигналов, полученных от индуктивных и емкостных датчиков.

Лабораторная установка состояла из трехфазного источника питания напряжением 0,4 кВ, управляемой нагрузки (основная резистивная нагрузка 1250 Вт на каждой фазе и дополнительные нагрузки), измерительного прибора для регистрации значений токов и напряжений и комплекта бесконтактных датчиков (3 индуктивных и 3 емкостных). Измерения выполнялись при различных типах нагрузок – активных, индуктивных и нелинейных. Схема лабораторной установки и расположения бесконтактных датчиков представлена на рисунке 1.

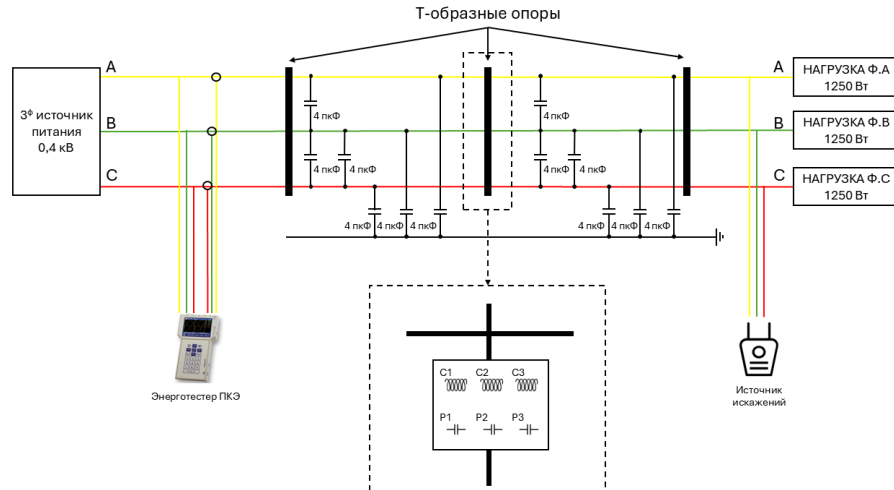


Рис. 1. Схема лабораторной установки и Fig. 1. The laboratory stand scheme and non-contact
расположения бесконтактных датчиков sensors placement

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

В качестве экспериментов были промоделированы следующие режимы работы лабораторной установки:

- асинхронный двигатель 3 кВт на холостом;
- резистивная нагрузка (900 Вт), подключенная через трехфазный диодный мост;
- однофазная нелинейная нагрузка в фазе В (150 Вт).

Вблизи фазных проводов лабораторной установки (на расстоянии 1 м) устанавливались три индуктивных (C1, C2, C3) и три емкостных (P1, P2, P3) датчика, сигналы которых подавались на АЦП с частотой дискретизации 3,2 кГц и разрешением 16 бит. В качестве индуктивных датчиков использовались катушки индуктивности, а в качестве емкостных датчиков – пластины электрических конденсаторов. Данные обрабатывались программным комплексом с реализацией БПФ, КВПФ.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

В результате проведенных экспериментов были записаны сигналы бесконтактных датчиков и время произведения переключения режимов работы лабораторной установки. На рисунках 2, 4, 6 представлены результаты определения времени момента переключения (вертикальная пунктирная линия) на основе вычисления производной энергии основной гармоники (50 Гц) сигналов при помощи скользящего окна размером 256 отсчетов с шагом скольжения 64 отсчета (с агрегацией расчетов по группам датчиков – индуктивные и емкостные). На рисунках 3, 5, 7 представлены результаты БПФ на окне размером 256 отсчетов до и после определенного момента переключения (для одного из бесконтактных датчиков – датчика C2).

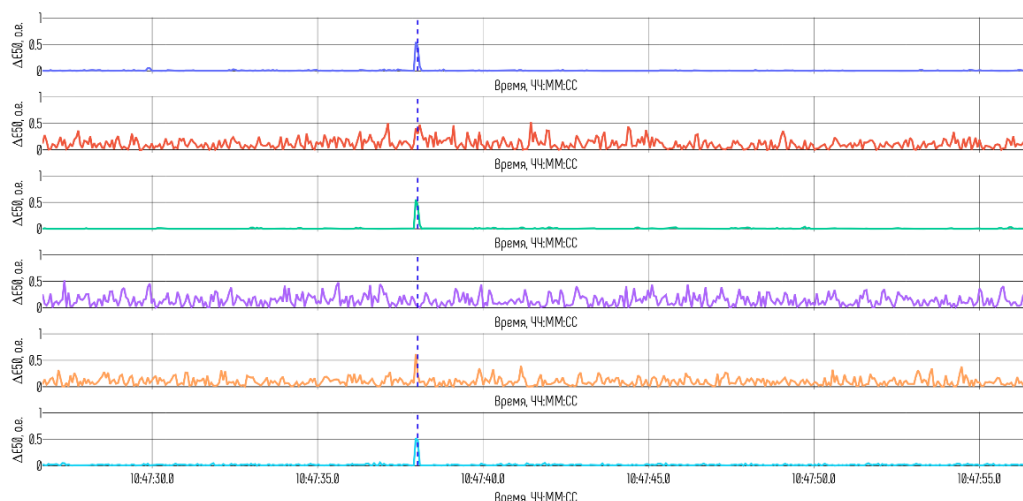


Рис. 2. Результаты определения времени момента подключения асинхронного двигателя (3 кВт) на холостом ходу (сигналы датчиков сверху-вниз – C1, C2, C3, P1, P2, P3)

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

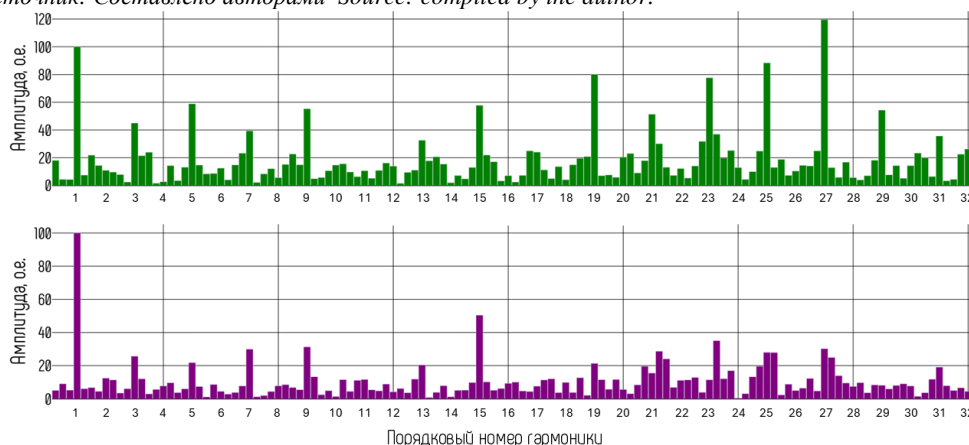


Рис. 3. Результаты БПФ для датчика C2 до и после момента подключения асинхронного двигателя (3 кВт) на холостом ходу

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

Таблица 1
Table 1

Спектральная подпись режима с дополнительным подключением асинхронного двигателя (3 кВт) на холостом ходу

Spectral signature for asynchronous motor connection (3 kW) at idle

Сигнал	ΔA_{50}	$\Delta \varphi_{50}$	THD _{bef}	THD _{aft}	Δ THD	$\Sigma \Delta A_{\text{even}}$	$\Sigma \Delta A_{\text{odd}}$
C1	48.7	-31.3	18.26	10.96	-7.3	19	-248
C2	65.6	-68.6	25.15	12.64	-12.51	-9.6	-279.9
C3	12.1	-38.1	10.13	8.61	-1.52	-34.5	-26.3
P1	5.5	-1.8	14.58	13.63	-0.96	35.6	-49.3
P2	-2.5	-5	5.77	5.36	-0.4	-13	-20.1
P3	2.1	-5.2	9.29	9.32	0.03	-61.9	38.3

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

Высшие гармоники, для которых наблюдалось наибольшее изменение амплитуды в эксперименте с подключением асинхронного двигателя:

- Для датчика C1 – $\Delta A_{11} = +1476.2\%$; $\Delta A_{32} = +900.0\%$; $\Delta A_{31} = +601.6\%$; $\Delta A_{10} = +264.6\%$; $\Delta A_7 = +162.0\%$.
- Для датчика C2 – $\Delta A_4 = +378.9\%$; $\Delta A_{18} = +295.2\%$; $\Delta A_{18} = +130.2\%$; $\Delta A_{16} = +117.2\%$; $\Delta A_{28} = +116.3\%$.
- Для датчика C3 – $\Delta A_2 = +445.7\%$; $\Delta A_{22} = +177.9\%$; $\Delta A_{17} = +145.9\%$; $\Delta A_{32} = -$

93.7%; $\Delta A4 = -91.1\%$.

- Для датчика P1 – $\Delta A4 = +539.1\%$; $\Delta A22 = +460.8\%$; $\Delta A28 = +356.7\%$; $\Delta A24 = +272.9\%$; $\Delta A8 = +197.2\%$.

- Для датчика P2 – $\Delta A27 = +1141.9\%$; $\Delta A18 = +116.5\%$; $\Delta A10 = +92.3\%$; $\Delta A8 = -89.7\%$; $\Delta A4 = -77.0\%$.

- Для датчика P3 – $\Delta A23 = +281.8\%$; $\Delta A21 = +267.0\%$; $\Delta A7 = +246.8\%$; $\Delta A15 = +206.0\%$; $\Delta A28 = +143.6\%$.

В режиме подключения асинхронного двигателя мощностью 3 кВт на холостом ходу у индуктивных датчиков (C1, C2, C3) наблюдалось отчетливое снижение THD – в среднем на 7-12%. При этом амплитуда основной гармоники возрастала до 65% (датчик C2), что согласуется с возрастанием магнитной составляющей поля. Наиболее значительные изменения амплитуд высоких порядков гармоник зарегистрированы для датчиков C1 и C2 – увеличение A_{11} на 1476%, A_{32} на 900%. Это указывает на чувствительность индуктивных элементов к быстрым изменениям магнитного потока, связанным с пуском двигателя. Емкостные датчики (P1, P2, P3) в тех же условиях демонстрировали слабую динамику THD (менее 1%) и значительно меньшие фазовые отклонения (до $\pm 5^\circ$), что объясняется их ориентацией на электрическую составляющую поля и меньшей восприимчивостью к токовым переходным процессам.

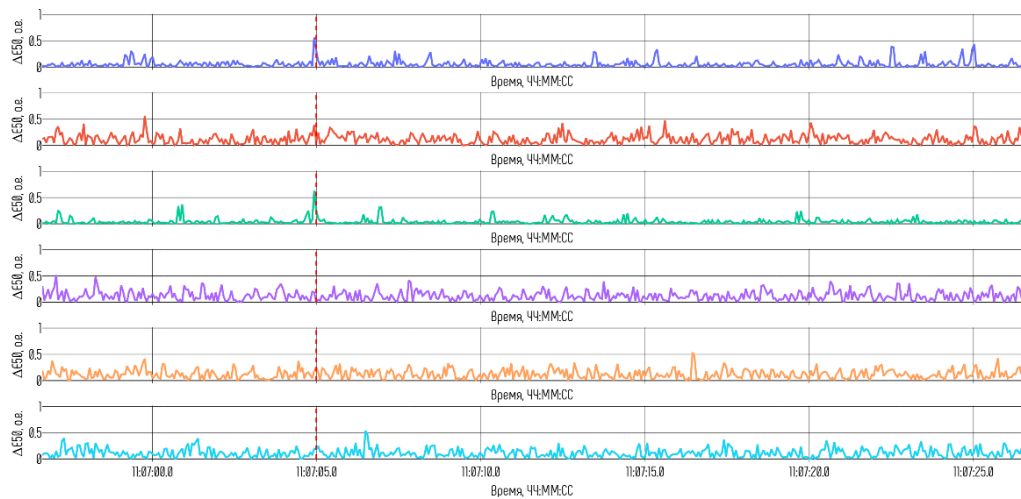


Рис. 4. Результаты определения времени момента подключения дополнительной резистивной нагрузкой (900 Вт), подключенной через трехфазный диодный мост (сигналы датчиков сверху-вниз – C1, C2, C3, P1, P2, P3) *Fig. 4. Results for the moment when additional resistive load (900 W) was connected via a three-phase diode bridge (sensor signals are shown from top to bottom: C1, C2, C3, P1, P2, and P3)*

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

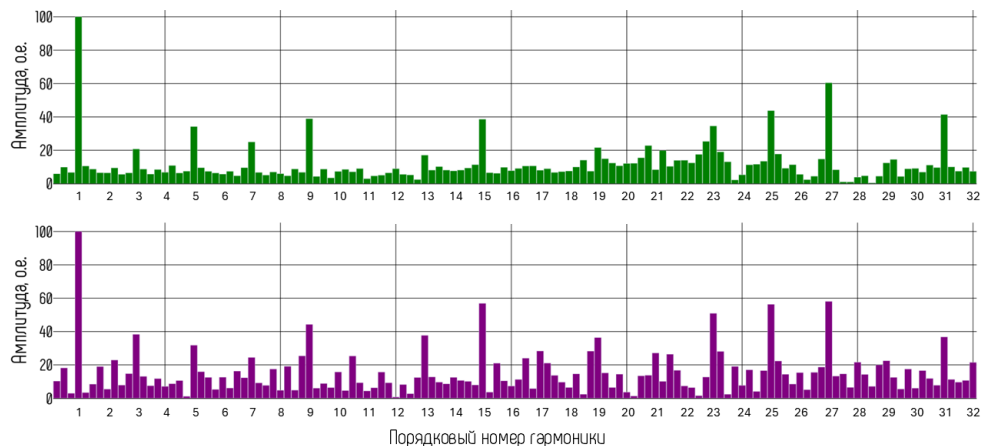


Рис. 5. Результаты БПФ для датчика C2 до и после момента подключения дополнительной резистивной нагрузкой (900 Вт), подключенной через трехфазный диодный мост *Fig. 5. FFT results for the C2 sensor before and after connection of additional resistive load (900 W) connected via a three-phase diode bridge*

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

Таблица 2
Table 2

Спектральная подпись режима с дополнительной резистивной нагрузкой (900 Вт), подключенной через трехфазный диодный мост

Spectral signature for additional resistive load (900 W) connected via a three-phase diode bridge

Сигнал	ΔA_{50}	$\Delta \varphi_{50}$	THD _{bef}	THD _{aft}	Δ THD	$\Sigma \Delta A_{\text{even}}\%$	$\Sigma \Delta A_{\text{odd}}$
C1	48.4	-3.8	16.48	10.85	-5.63	21.2	19.4
C2	1.8	-19.6	15.8	17.04	1.24	63.2	63
C3	26.8	-0.8	9.61	6.27	-3.34	-54.5	-44.9
P1	17.6	-5.2	16.58	15.1	-1.47	-4.8	66.5
P2	0.8	0.3	5.41	5.43	0.02	-5.4	-2.9
P3	-15.5	1.1	9.47	11.83	2.36	-4.5	13.1

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

Высшие гармоники, для которых наблюдалось наибольшее изменение амплитуды в эксперименте с подключением дополнительной резистивной нагрузки, подключенной через трехфазный диодный мост:

- Для датчика C1 – $\Delta A_{19} = +2313.1\%$; $\Delta A_4 = +399.2\%$; $\Delta A_6 = +382.2\%$; $\Delta A_{22} = +275.6\%$; $\Delta A_{10} = +150.1\%$.
- Для датчика C2 – $\Delta A_{30} = +491.2\%$; $\Delta A_{14} = +407.7\%$; $\Delta A_6 = +215.5\%$; $\Delta A_{22} = +189.3\%$; $\Delta A_{25} = +183.3\%$.
- Для датчика C3 – $\Delta A_{29} = +244.9\%$; $\Delta A_{12} = -81.7\%$; $\Delta A_8 = -74.5\%$; $\Delta A_{28} = -69.8\%$; $\Delta A_{19} = -69.0\%$.
- Для датчика P1 – $\Delta A_{29} = +1355.2\%$; $\Delta A_{26} = +209.3\%$; $\Delta A_7 = +184.1\%$; $\Delta A_6 = +148.2\%$; $\Delta A_{21} = +142.5\%$.
- Для датчика P2 – $\Delta A_{16} = +1550.8\%$; $\Delta A_{24} = +1015.2\%$; $\Delta A_{30} = +531.7\%$; $\Delta A_4 = +254.5\%$; $\Delta A_6 = +109.1\%$.
- Для датчика P3 – $\Delta A_{11} = +176.3\%$; $\Delta A_{26} = +155.0\%$; $\Delta A_8 = +148.0\%$; $\Delta A_7 = +144.4\%$; $\Delta A_{30} = +128.5\%$.

При подключении дополнительной резистивной нагрузки 900 Вт через трехфазный диодный мост реакция датчиков изменилась. Для индуктивных сенсоров зафиксировано снижение THD на 3-6% (датчик C1) и рост амплитудных коэффициентов в области 5-й и 7-й нечетных гармоник. Емкостные датчики, напротив, показали значительный рост отдельных спектральных компонент: датчик P1 – A_{29} до +1355%, датчик P2 – A_{16} до +1551%. Это может быть связано с тем, что при выпрямлении формируется пульсирующее напряжение с ярко выраженными четными гармониками, воспринимаемыми преимущественно емкостными сенсорами.

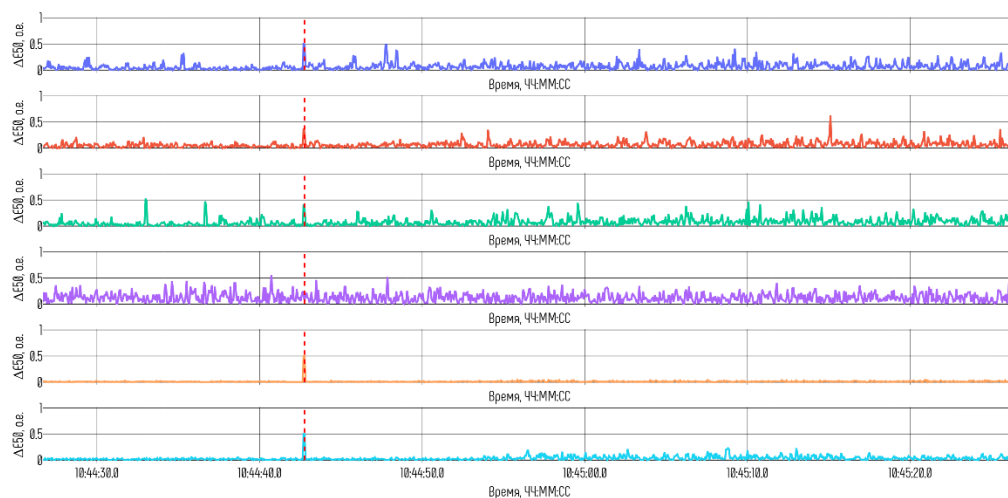


Рис. 6. Результаты определения времени момента подключения дополнительной однофазной нелинейной нагрузки в фазе В (150 Вт) (сигналы датчиков сверху-вниз – C1, C2, C3, P1, P2, P3)

Fig. 6. Results for the moment when additional single-phase nonlinear load in phase B (150 W) (sensor signals are shown from top to bottom: C1, C2, C3, P1, P2, and P3)

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

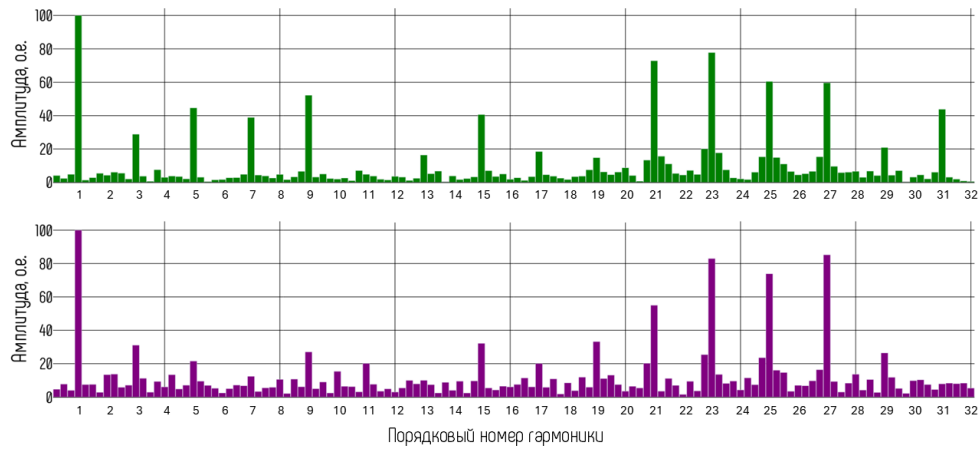


Рис. 7. Результаты БПФ для датчика C2 до и после момента подключения дополнительной однофазной нелинейной нагрузки в фазе В (150 Вт)

Fig. 7. FFT results for the C2 sensor before and after connection of additional single-phase nonlinear load in phase B (150 W)

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

Таблица 3

Table 3

Спектральная подпись режима с дополнительной однофазной нелинейной нагрузкой в фазе В (150 Вт)

Spectral signature for additional single-phase nonlinear load in phase B (150 W)

Сигнал	ΔA_{50}	$\Delta \varphi_{50}$	THD_{bef}	THD_{aft}	ΔTHD	$\Sigma \Delta A_{even}^{\%}$	$\Sigma \Delta A_{odd}$
C1	1.3	7.3	17.92	21.9	3.98	52.9	103.1
C2	6.1	0.2	17.67	15.7	-1.97	-35.5	-88.6
C3	11.2	0.4	10.94	8.91	-2.03	-71.1	-58.3
P1	-8.5	-0.4	12.85	13.63	0.78	-33.4	14.5
P2	-3.4	0.9	4.87	5.33	0.45	-8.7	8.6
P3	-3.6	4.5	9.19	8.98	-0.21	-53.6	-10.3

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

Высшие гармоники, для которых наблюдалось наибольшее изменение амплитуды в эксперименте с подключением однофазной нелинейной нагрузки в фазе В:

- Для датчика C1 – $\Delta A_{32} = +818.8\%$; $\Delta A_{19} = +375.4\%$; $\Delta A_{22} = +299.4\%$; $\Delta A_{18} = +217.1\%$; $\Delta A_{17} = +201.8\%$.

- Для датчика C2 – $\Delta A_{32} = +2190.9\%$; $\Delta A_4 = +612.5\%$; $\Delta A_{29} = +131.5\%$; $\Delta A_{27} = +101.0\%$; $\Delta A_7 = -80.2\%$.

- Для датчика C3 – $\Delta A_{31} = +186.9\%$; $\Delta A_{32} = -83.1\%$; $\Delta A_{22} = -73.9\%$; $\Delta A_9 = -66.8\%$; $\Delta A_8 = -66.5\%$.

- Для датчика P1 – $\Delta A_9 = +669.5\%$; $\Delta A_{28} = +299.2\%$; $\Delta A_{27} = +255.6\%$; $\Delta A_{20} = +189.5\%$; $\Delta A_{19} = +154.3\%$.

- Для датчика №P2 – $\Delta A_{31} = +211.4\%$; $\Delta A_{12} = +175.6\%$; $\Delta A_{21} = +146.6\%$; $\Delta A_{26} = +146.1\%$; $\Delta A_{18} = +133.9\%$.

- Для датчика P3 – $\Delta A_{26} = +460.0\%$; $\Delta A_{21} = +306.1\%$; $\Delta A_{17} = +152.3\%$; $\Delta A_{14} = -89.6\%$; $\Delta A_{30} = -88.0\%$.

В режиме подключения однофазной нелинейной нагрузки 150 Вт в фазе В выявлено увеличение THD на 2-4% и появление асимметрии спектра. Индуктивные датчики (C1, C2, C3) продемонстрировали рост амплитуд 17-22 гармоник до 300-400% и появление отрицательных изменений на высших порядках (например, $A_{32} = -83\%$ у датчика C3), что свидетельствует о подавлении высокочастотных составляющих магнитного поля. Емкостные сенсоры (P1, P2, P3) зафиксировали преимущественно рост гармоник 9-27 порядков: у датчика P1 $\Delta A_9 = +669\%$, у P2 $\Delta A_{31} = +211\%$, у P3 $\Delta A_{26} = +460\%$. Это демонстрирует их высокую чувствительность к фазным несбалансированным возмущениям электрического поля.

Таким образом, индуктивные датчики показали более высокую чувствительность к изменениям токовой нагрузки и динамике магнитного потока, а емкостные – к асимметрии и нелинейным искажениям напряжения. Различие реакций двух групп датчиков показывает, что их совместное использование формирует различающиеся

«спектральные подписи» для рассмотренных типов источников гармонических искажений.

Следует отметить, что для датчиков одного типа (С1–С3 или Р1–Р3) наблюдаются отличия в показаниях (как исходных сигналов, так и результатов спектральной обработки). Данные различия связаны с различиями взаимного расположения бесконтактных датчиков относительно проводов лабораторной установки и погрешностей в электрических параметрах датчиков (индуктивность, емкость), обусловленных допуском погрешности при изготовлении.

Заключение (Conclusions)

В работе рассмотрены современные подходы к контролю параметров качества электроэнергии в распределительных сетях 6-10 кВ с акцентом на использование бесконтактных методов измерения. Показано, что традиционные контактные системы мониторинга ограничены эксплуатационно-конструктивными условиями и не обеспечивают требуемую масштабируемость при поиске источников гармонических искажений. Проведенный анализ отечественных и международных нормативных документов (ГОСТ 32144–2013, IEC 61000-3-6, IEEE 519, EN 50160) выявил необходимость внедрения унифицированных алгоритмов измерений, способных учитывать динамические изменения спектра.

Разработан алгоритм контроля источников гармонических искажений, включающий этапы регистрации сигналов бесконтактных индуктивных и емкостных датчиков, спектрального преобразования (БПФ, КВПФ) и формирования спектральных признаков источников искажений. Экспериментальная проверка на лабораторной модели показала высокую корреляцию результатов между каналами разных типов. Индуктивные датчики продемонстрировали наибольшую чувствительность к вариациям токов и магнитного поля ($\Delta THD \approx -7-12\%$), а емкостные – к асимметрии и высоким гармоникам (рост отдельных компонент $> +1000\%$).

Анализ точного влияния взаимного расположения бесконтактных датчиков относительно проводов установки на различия в показаниях однотипных датчиков может быть рассмотрен в дальнейших исследованиях по данной тематике. Полученные в ходе лабораторных экспериментов «спектральные подписи» могут быть рассмотрены в качестве исходных данных для формирования эталонной библиотеки признаков и использованы в качестве входных параметров в алгоритмах классификации типов источников искажения. Построение и валидация конкретных моделей идентификации по этим признакам относится к задачам дальнейших исследований.

Научная новизна работы заключается в формировании и экспериментальном обосновании набора интерпретируемых спектральных признаков, описывающих влияние источников гармонических искажений (асинхронный двигатель, трехфазный диодный мост, однофазная нелинейная нагрузка) на сигналы бесконтактных индуктивных и емкостных датчиков электромагнитного поля. Дополнительно предложен критерий для автоматического определения момента возникновения события по сигналам бесконтактных датчиков по изменению основной гармоники (50 Гц). Практическая значимость состоит в возможности построения автономных интеллектуальных систем бесконтактного контроля параметров качества электроэнергии на основе предложенного алгоритма и набора спектральных признаков.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются расширение эталонной базы и интеграция разработанного алгоритма с методами машинного обучения для интеллектуальной классификации источников гармонических искажений и адаптации системы к реальным условиям эксплуатации.

Литература

1. Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., Duque-Perez O. A review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 20. – P. 6467. – DOI: 10.3390/en14206467.
2. Зубова Е.В., Федосов Д.С. Исследование условий возникновения резонанса на высших гармониках в электрической сети, питающей нелинейную нагрузку. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 83-95. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95.
3. Kaur J., Bath S.K. Harmonic distortion in power systems due to electronic control and renewable energy integration: a comprehensive review // *Discover Electronics*. – 2025. – Vol. 2. – Article 67. – DOI: 10.1007/s44291-025-00111-9.
4. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Кондуктометрический метод неразрушающего

- контроля параметров электрических кабелей / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2025. – Т. 27. – №2. – С. 3–19. – DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-3-19.
5. Минуллин Р.Г. Способы подключения аппаратуры локационного мониторинга к воздушным линиям электропередачи // Р.Г. Минуллин, А.А. Гранская, Э.Ю. Абдуллазянов, И.Г. Ахметова, Р.Г. Мустафин, В.А. Касимов / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 16–32. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-16-32.
6. Левин В.М., Боярова Д.А. Распределенная система предиктивного управления состоянием оборудования электрических сетей по наработке на дефект / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2025. – Т. 27. – № 3. – С. 123–134. – DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-123-134.
7. Зарипов Д.К. Экспериментальное лабораторное исследование возможности выявления загрязнения высоковольтных изоляторов с помощью тепловизора / Д.К. Зарипов, Д.Ф. Закиров, Б.П. Тарасов, Е.А. Миронова, Р.А. Насибуллин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2024. – Т. 26. – № 6. – С. 5–19. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19.
8. Крюков А.В., Овечкин И.С., Сулов К.В. Моделирование режимов двойных замыканий на землю в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2024. – Т. 26. – № 2. – С. 138–148. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-2-138-148.
9. Тюрин А.Н., Солюянов Ю.И., Ахметшин А.Р. Проверка на работоспособность при замыкании на землю аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2024. – Т. 26. – № 4. – С. 41–54. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-4-41-54.
10. Ali Z. M., Calasan M., Jurado F. and Abdel Aleem S. H. E. Complexities of Power Quality and Harmonic-Induced Overheating in Modern Power Grids Studies: Challenges and Solutions // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 151554–151597. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3477729.
11. Arrillaga J., Watson N.R. Power System Harmonics. – 2nd ed. – Wiley, 2003. – 382 p. – DOI: 10.1002/0470871229.
12. Al-Feilat E. a. A., El-Amin I., Bettayeb M. Power system harmonic estimation: a comparative study // Electric Power Systems Research. – 1994. – № 2(29). – P. 91–97. – DOI: 10.1016/0378-7796(94)90066-3.
13. Chen K.L., Hu W.J., Xu W. Contactless Voltage Sensor for Overhead Transmission Lines // IET Gener., Transm. & Distrib. – 2018. – Vol. 12, No. 3. – P. 687–693. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.1181.
14. Sun S., Ma F., Yang Q., Ni H., Bai T., Ke K., Qiu Z. Research on Non-Contact Voltage Measurement Method Based on Near-End Electric Field Inversion // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 18. – P. 6468. – DOI: 10.3390/en16186468.
15. Zhang W., Yang Y., Zhao J., Huang R., Cheng K., He M.. Research on a Non-Contact Multi-Electrode Voltage Sensor and Signal Processing Algorithm // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 21. – DOI: 10.3390/s22218573.
16. Testa A. et al. Interharmonics: Theory and Modeling // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. – №. 4. – P. 2335–2348. – DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905505.
17. Barros J., Diego R.I., de Apraiz M. Applications of wavelets in electric power quality: Voltage events // Electric Power Systems Research. – 2012. – 88. – P. 130–136. – DOI: 10.1016/j.epsr.2012.02.009.
18. Dash P.K., Pradhan A.K., Panda G. Power quality analysis using S-transform // IEEE Power Engineering Review. – 2002. – Vol. 22. – № 18(2). – P. 60–60. – DOI: 10.1109/MPER.2002.4312414.
19. Schirmer P. A., Mporas I. Non-Intrusive Load Monitoring: A Review // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2023. – Vol. 14. – № 1. – P. 769–784. – DOI: 10.1109/TSG.2022.3189598.
20. Sandler R., Brehm M., Slomovitz D., Barreto G. Rogowski Coil Design for the Measurement of High Voltage Harmonics // Proc. 2020 IEEE PES T&D Latin America. – Montevideo, Uruguay, 2020. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/TDLA47668.2020.9326218.
21. Peng H., Liu H., Shang K., Li G., Zhao L. Design and Simulation Test of Non-Contact Voltage Sensor // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – DOI: 10.3390/s25103118.
22. Kruphalan T.S., Olof A. F., Daniel M., Fatemeh G., Nathaniel T., Martin N. Non-contact Current Measurement in Power Transmission Lines // Procedia Technology. – 2015. – Vol. 21. – P. 498–506. – DOI: 10.1016/j.protcy.2015.10.034.
23. Roman H., Vaclav K., Mikolaj B., Tomas M., Petr O., Jacob V. A Development of a Capacitive Voltage Divider for High Voltage Measurement as Part of a Combined Current and Voltage Sensor // electronic measurements. – 2020. – Vol. 26. – № 4. – P. 25–31. – DOI: 10.5755/j01.eie.26.4.25888.
24. Han Z., Xue F., Yang G., Yu Z., Hu J., He J. Micro-Cantilever Capacitive Sensor for High-Resolution Measurement of Electric Fields // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 32. – № 8. – P. 4317–4324. – DOI: 10.1109/JSEN.2020.3031291.

25. Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P. Localization of the complex spectrum: the S transform // IEEE Trans. Signal Processing. – 1996. – 44(4). – P. 998–1001. – DOI: 10.1109/78.492555.
26. Yan R., Gao R.X. Energy-Based Feature Extraction for Defect Diagnosis in Rotary Machines // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Vol. 58. – № 9. – P. 3130–3139. – DOI: 10.1109/TIM.2009.2016886.
27. Chand P., Davari A., Liu B., Sedghisigarchi K. Feature extraction of Power Quality disturbances using Adaptive Harmonic Wavelet Transform // Proc. 39th Southeastern Symp. on System Theory. – Macon, GA, USA, 2007. – P. 266–269. – DOI: 10.1109/SSST.2007.352362.
28. Peng H., Liu H., Shang K., Li G., Zhao L. Design and Simulation Test of Non-Contact Voltage Sensor // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – № 10. – DOI: 10.3390/s25103118.
29. Diqiu S., Bei H., Xufeng W., Mingdong Z., Liang W., Wenxing L. Research on Harmonic Characteristic of Electronic Current Transformer Based on the Rogowski Coil // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 199. – DOI: 10.1088/1757-899X/199/1/012123.
30. Giancesini B.M., Santos I.N., Ribeiro P.F. Comparison of Methods for Determining Harmonic Distortion Contributions Using the IEEE Benchmark Test System // IEEE Trans. Power Delivery. – 2023. – 38(4). – P. 2398–2407. – DOI: 10.1109/TPWRD.2023.3242942.
31. Anggriawan D. O., Amsyar A., Prasetyono, E., Wahjono E., Sudiharto I., Tjahjono, A. Load Identification Using Harmonic Based on Probabilistic Neural Network // EMITTER International Journal of Engineering Technology. – 2019. – Vol. 7. – № 1. – P. 71–82. – DOI: 10.24003/emitter.v7i1.330.
32. Bosnic J. A., Petrovic G., Putnik A., Mostarac P. Power quality disturbance classification based on wavelet transform and support vector machine // In Proceedings of the 2017 11th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia/ – 2017. – P. 9–13. – DOI: 10.23919/MEASUREMENT.2017.7983524.
33. Samanta I.S., Rout P.K., Mishra S. Feature extraction and power quality event classification using Curvelet transform and optimized extreme learning machine // Electr Eng. – 2021. – Vol. 103. – P. 2431–2446. – DOI: 10.1007/s00202-021-01243-3.
34. Gaouda A. M., Kanoun S. H., Salama M. M. A., Chikhani A. Y. Pattern recognition applications for power system disturbance classification // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – Vol. 17. – № 3. – P. 677–683. – DOI: 10.1109/TPWRD.2002.1022786.
35. Janani K., Himavathi S. Non-intrusive harmonic source identification using neural networks // In Proceedings of the 2013 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, India. – 2013. – P. 59–64. – DOI: 10.1109/ICCPEIC.2013.6778499.
36. Rodrigues Junior W. L., Silva Borges F. A., Lira Rabelo R. d. A., de Lima B. V. A., Almeida de Alencar J. E. Classification of Power Quality Disturbances Using Convolutional Network and Long Short-Term Memory Network // 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Budapest, Hungary. – 2019. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8852287.
37. Shafiullah M. et al. An Intelligent Approach for Power Quality Events Detection and Classification // In Proceedings of the 2021 1st International Conference on Artificial Intelligence and Data Analytics (CAIDA), Riyadh, Saudi Arabia, – 2021. – P. 194–199, – DOI: 10.1109/CAIDA51941.2021.9425215.
38. Gu Y.H., Bollen M.H.J. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15. – № 4. – P. 1279–1284. – DOI: 10.1109/61.891515.
39. Lin W. -M. Wu C. -H., Lin C. -H, Cheng F. -S. Detection and Classification of Multiple Power-Quality Disturbances With Wavelet Multiclass SVM // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23. – № 4. – P. 2575–2582/ – doi: 10.1109/TPWRD.2008.923463.
40. Indu S. S., et al. Artificial intelligence and machine learning techniques for power quality event classification: a focused review and future insights // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 25. – DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103873.

Авторы публикации

Брамм Андрей Михайлович – мл. научный сотрудник научной лаборатории цифровых двойников в электроэнергетике Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-1868-4389>. *am.bramm@urfu.ru*.

Хальясмаа Александра Ильмаровна – канд. техн. наук, доцент, заведующий научной лабораторией цифровых двойников в электроэнергетике Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5327-6076>. a.i.khaliasmaa@urfu.ru.

Матренин Павел Викторович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории цифровых двойников в электроэнергетике Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>. p.v.matrenin@urfu.ru.

Ерошенко Станислав Андреевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника» Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9617-2154>. s.a.eroshenko@urfu.ru.

References

1. Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., Duque-Perez O. A review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 20. – P. 6467. – DOI: 10.3390/en14206467.
2. Zubova E.V., Fedosov D.S. Study of resonance conditions on higher harmonics in an electrical network supplying a nonlinear load / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2024. – Vol. 26. – № 3. – P. 83-95. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95.
3. Kaur J., Bath S.K. Harmonic distortion in power systems due to electronic control and renewable energy integration: a comprehensive review // *Discover Electronics*. – 2025. – Vol. 2. – Article 67. – DOI: 10.1007/s44291-025-00111-9.
4. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Conductometric method of nondestructive testing of electric cable parameters / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2025. – Vol. 27. – №2. – P. 3–19. – DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-3-19.
5. Minullin R.G. Connecting methods of location monitoring equipment to overhead power lines // R.G. Minullin, A.A. Granskaya, E.Yu. Abdullazyanov, I.G. Akhmetova, R.G. Mustafin, V.A. Kasimov / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2024. – Vol. 26. – № 3. – P. 16–32. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-16-32.
6. Levin V.M., Boyarova D.A. Distributed predictive control system for the condition of power grid equipment based on the operating time for a defect / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2025. – Vol. 27. – № 3. – P. 123–134. – DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-123-134.
7. Zaripov D.K. Experimental study of the possibility of detecting contamination of high-voltage insulators with the help of a thermal imager / D.K. Zaripov, D.F. Zakirov, B.P. Tarasov, E.A. Mironova, R.A. Nasibullin // *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2024. – Vol. 26. – № 6. – P. 5–19. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19.
8. Kryukov A.V., Ovechkin I.S., Suslov K.V. Modeling of double ground fault modes in power supply systems of non-traction consumers of railway transport / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2024. – Vol. 26. – № 2. – P. 138–148. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-2-138-148.
9. Tyurin A.N., Soluyanov Yu.I., Akhmetshin A.R. Testing the operation of protection devices against parallel arc breakdown and spark gaps in the event of a ground fault / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2024. – Vol. 26. – № 4. – P. 41–54. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-4-41-54.
10. Ali Z. M., Calasan M., Jurado F. and Abdel Aleem S. H. E. Complexities of Power Quality and Harmonic-Induced Overheating in Modern Power Grids Studies: Challenges and Solutions // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – P. 151554–151597. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3477729.
11. Arrillaga J., Watson N.R. *Power System Harmonics*. – 2nd ed. – Wiley, 2003. – 382 p. – DOI: 10.1002/0470871229.
12. Al-Feilat E. a. A., El-Amin I., Bettayeb M. Power system harmonic estimation: a comparative study // *Electric Power Systems Research*. – 1994. – № 2(29). – P. 91–97. – DOI: 10.1016/0378-7796(94)90066-3.
13. Chen K.L., Hu W.J., Xu W. Contactless Voltage Sensor for Overhead Transmission Lines // *IET Gener., Transm. & Distrib.* – 2018. – Vol. 12, No. 3. – P. 687–693. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.1181.
14. Sun S., Ma F., Yang Q., Ni H., Bai T., Ke K., Qiu Z. Research on Non-Contact Voltage Measurement Method Based on Near-End Electric Field Inversion // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, No. 18. – P. 6468. – DOI: 10.3390/en16186468.
15. Zhang W., Yang Y., Zhao J., Huang R., Cheng K., He M.. Research on a Non-Contact Multi-Electrode Voltage Sensor and Signal Processing Algorithm // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – № 21. – DOI: 10.3390/s22218573.

16. Testa A. et al. Interharmonics: Theory and Modeling // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2007. – Vol. 22. – № 4. – P. 2335–2348. – DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905505.
17. Barros J., Diego R.I., de Apraiz M. Applications of wavelets in electric power quality: Voltage events // *Electric Power Systems Research*. – 2012. – 88. – P. 130–136. – DOI: 10.1016/j.epsr.2012.02.009.
18. Dash P.K., Pradhan A.K., Panda G. Power quality analysis using S-transform // *IEEE Power Engineering Review*. – 2002. – Vol. 22. – № 18(2). – P. 60–60. – DOI: 10.1109/MPER.2002.4312414.
19. Schirmer P. A., Mporas I. Non-Intrusive Load Monitoring: A Review // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2023. – Vol. 14. – № 1. – P. 769–784. – DOI: 10.1109/TSG.2022.3189598.
20. Sandler R., Brehm M., Slomovitz D., Barreto G. Rogowski Coil Design for the Measurement of High Voltage Harmonics // *Proc. 2020 IEEE PES T&D Latin America*. – Montevideo, Uruguay, 2020. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/TDLA47668.2020.9326218.
21. Peng H., Liu H., Shang K., Li G., Zhao L. Design and Simulation Test of Non-Contact Voltage Sensor // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25. – DOI: 10.3390/s25103118.
22. Kruphalan T.S., Olof A. F., Daniel M., Fatemeh G., Nathaniel T., Martin N. Non-contact Current Measurement in Power Transmission Lines // *Procedia Technology*. – 2015. – Vol. 21. – P. 498–506. – DOI: 10.1016/j.protcy.2015.10.034.
23. Roman H., Vaclav K., Mikolaj B., Tomas M., Petr O., Jacob V. A Development of a Capacitive Voltage Divider for High Voltage Measurement as Part of a Combined Current and Voltage Sensor // *electronic measurements*. – 2020. – Vol. 26. – № 4. – P. 25–31. – DOI: 10.5755/j01.eie.26.4.25888.
24. Han Z., Xue F., Yang G., Yu Z., Hu J., He J. Micro-Cantilever Capacitive Sensor for High-Resolution Measurement of Electric Fields // *IEEE Sensors Journal*. – 2021. – Vol. 32. – № 8. – P. 4317–4324. – DOI: 10.1109/JSEN.2020.3031291.
25. Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P. Localization of the complex spectrum: the S transform // *IEEE Trans. Signal Processing*. – 1996. – 44(4). – P. 998–1001. – DOI: 10.1109/78.492555.
26. Yan R., Gao R.X. Energy-Based Feature Extraction for Defect Diagnosis in Rotary Machines // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2009. – Vol. 58. – № 9. – P. 3130–3139. – DOI: 10.1109/TIM.2009.2016886.
27. Chand P., Davari A., Liu B., Sedghisigarchi K. Feature extraction of Power Quality disturbances using Adaptive Harmonic Wavelet Transform // *Proc. 39th Southeastern Symp. on System Theory*. – Macon, GA, USA, 2007. – P. 266–269. – DOI: 10.1109/SSST.2007.352362.
28. Peng H., Liu H., Shang K., Li G., Zhao L. Design and Simulation Test of Non-Contact Voltage Sensor // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25. – № 10. – DOI: 10.3390/s25103118.
29. Diqiu S., Bei H., Xufeng W., Mingdong Z., Liang W., Wenxing L. Research on Harmonic Characteristic of Electronic Current Transformer Based on the Rogowski Coil // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 199. – DOI: 10.1088/1757-899X/199/1/012123.
30. Giancesini B.M., Santos I.N., Ribeiro P.F. Comparison of Methods for Determining Harmonic Distortion Contributions Using the IEEE Benchmark Test System // *IEEE Trans. Power Delivery*. – 2023. – 38(4). – P. 2398–2407. – DOI: 10.1109/TPWRD.2023.3242942.
31. Anggriawan D. O., Amsyar A., Prasetyono, E., Wahjono E., Sudiharto I., Tjahjono, A. Load Identification Using Harmonic Based on Probabilistic Neural Network // *EMITTER International Journal of Engineering Technology*. – 2019. – Vol. 7. – № 1. – P. 71–82. – DOI: 10.24003/emitter.v7i1.330.
32. Bosnic J. A., Petrovic G., Putnik A., Mostarac P. Power quality disturbance classification based on wavelet transform and support vector machine // *In Proceedings of the 2017 11th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia/* – 2017. – P. 9–13. – DOI: 10.23919/MEASUREMENT.2017.7983524.
33. Samanta I.S., Rout P.K., Mishra S. Feature extraction and power quality event classification using Curvelet transform and optimized extreme learning machine // *Electr Eng*. – 2021. – Vol. 103. – P. 2431–2446. – DOI: 10.1007/s00202-021-01243-3.
34. Gaouda A. M., Kanoun S. H., Salama M. M. A., Chikhani A. Y. Pattern recognition applications for power system disturbance classification // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2002. – Vol. 17. – № 3. – P. 677–683. – DOI: 10.1109/TPWRD.2002.1022786.
35. Janani K., Himavathi S. Non-intrusive harmonic source identification using neural networks // *In Proceedings of the 2013 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, India*. – 2013. – P. 59–64. – DOI: 10.1109/ICCPEIC.2013.6778499.
36. Rodrigues Junior W. L., Silva Borges F. A., Lira Rabelo R. d. A., de Lima B. V. A., Almeida de Alencar J. E. Classification of Power Quality Disturbances Using Convolutional Network and Long Short-Term Memory Network // *2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Budapest, Hungary*. – 2019. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8852287.
37. Shafiullah M. et al. An Intelligent Approach for Power Quality Events Detection and Classification // *In Proceedings of the 2021 1st International Conference on Artificial Intelligence and*

Data Analytics (CAIDA), Riyadh, Saudi Arabia, – 2021. – P. 194–199, – DOI: 10.1109/CAIDA51941.2021.9425215.

38. Gu Y.H., Bollen M.H.J. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15. – № 4. – P. 1279–1284. – DOI:10.1109/61.891515.

39. Lin W. -M. Wu C. -H., Lin C. -H, Cheng F. -S. Detection and Classification of Multiple Power-Quality Disturbances With Wavelet Multiclass SVM // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23. – № 4. – P. 2575–2582/ – doi: 10.1109/TPWRD.2008.923463.

40. Indu S. S., et al. Artificial intelligence and machine learning techniques for power quality event classification: a focused review and future insights // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 25. – DOI:10.1016/j.rineng.2024.103873.

Authors of the publication

Andrey M. Bramm – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-1868-4389>. am.bramm@urfu.ru.

Alexandra I. Khalyasmaa – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5327-6076>. a.i.khalyasmaa@urfu.ru.

Pavel V. Matrenin – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>. p.v.matrenin@urfu.ru.

Stanislav A. Eroshenko – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-9617-2154>. s.a.eroshenko@urfu.ru.

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

Получено **21.10.2025 г.**

Отредактировано **17.01.2026 г.**

Принято **26.01.2026 г.**

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 620.92

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-1-22-41

«ЗЕЛЁНЫЙ» ЭНЕРГОПЕРЕХОД: СИСТЕМНЫЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ И СКРЫТЫЕ ИЗДЕРЖКИ

Давыдов Д.А.¹, Никитин К.И.¹, Загоруйко А.А.², Татевосян А.А.¹

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

7shaq7@gmail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ работы заключается в её своевременной и критически важной «ревизию» тренда «зелёной» энергетики. Она выполняет функцию «взгляда со стороны», призывающего к взвешенной оценке, учёту всех рисков и отказу от идеологизированного подхода в пользу научно-обоснованного, комплексного анализа на пути к реальной, а не декларативной, устойчивости. Это делает её ценным вкладом не только в академическую дискуссию, но и в выработку практической государственной политики и корпоративных стратегий. **ЦЕЛЬ.** Проведение комплексного критического анализа современных тенденций, технологических решений и системных проблем в области «зеленой» энергетики и декарбонизации, с оценкой их реальной эффективности, экономической целесообразности и экологических последствий на всех этапах жизненного цикла. **МЕТОДЫ.** В основе работы лежит системный обзор и сравнительный анализ широкого круга научных исследований и технологических кейсов в области возобновляемой энергетики (ветровой, солнечной, водородной), методов улавливания углерода (CCUS), гибридных систем и накопителей энергии. Оценка проводится с учетом технологических, экономических и экологических параметров, включая коэффициенты полезного действия, уровеньзатраченную стоимость энергии (LCOE), капитальные и операционные расходы (CAPEX/OPEX), а также углеродный след. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Выявлены существенные противоречия и системные вызовы, связанные с переходом на возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Показано, что многие технологические решения (водородная энергетика, CCUS, гибридные системы) находятся на ранних стадиях развития, характеризуются высокой стоимостью, низким EROI и нерешенными проблемами утилизации отходов (лопасти ветрогенераторов, солнечные панели, аккумуляторы). Озвучена проблема рентабельности ВИЭ в регионах с низким потенциалом без государственных субсидий. Установлено, что массовое внедрение inverter-based генерации снижает совокупную инерцию энергосистем, создавая риски для их стабильности. Выявлены значительные экологические и социальные издержки добычи критически важных материалов (литий, кобальт) для «зеленой» экономики. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Сделан вывод о том, что декларируемые преимущества «зеленой» энергетики зачастую нивелируются комплексом скрытых технологических, экономических и экологических проблем. Кардинальная трансформация энергосистем не является однозначно позитивной и создает многогранные вызовы, требующие сбалансированного подхода, глубокого системного анализа и разработки комплексных стратегий с участием государства, бизнеса и науки, а не лишь следования трендам. Необходим пересмотр методологий оценки для учета полного жизненного цикла технологий ВИЭ.

Ключевые слова: зеленая энергетика; современная цивилизация; утилизация отходов; добыча редких ресурсов; социальная справедливость; PR стратегия; зеленая экономика; солнечные панели; карбоновый след; аккумуляторные батареи; лопасти ветрогенераторов; возобновляемые источники энергии; электромобили.

Для цитирования: Давыдов Д.А., Никитин К.И., Загоруйко А.А., Татевосян А.А. «Зелёный» энергопереход: системные противоречия и скрытые издержки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 22-41. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-22-41.

THE GREEN ENERGY TRANSITION: SYSTEMIC CONTRADICTIONS AND HIDDEN COSTS

Davydov D.A.¹, Nikitin K.I.¹, Zagoruyko A.A.², Tatevosyan A.A.¹

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²Omsk State Transport University, Omsk, Russia

7shaq7@gmail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE* of this article lies in its timely and critical reassessment of the "green" energy trend. It serves as a "sober voice," advocating for a balanced evaluation, comprehensive risk assessment, and a shift from ideological approaches to scientifically-grounded, holistic analysis aimed at achieving genuine sustainability. This makes it a valuable contribution not only to academic discourse but also to the development of practical government policies and corporate strategies. *THE PURPOSE.* This paper conducts a comprehensive critical analysis of the modern trends, technological solutions, and systemic challenges within the green energy sector and decarbonization efforts. It aims to evaluate their actual effectiveness, economic viability, and full lifecycle environmental impacts, moving beyond the prevailing optimistic narratives to provide a balanced assessment. *METHODS.* The research employs a systematic review and comparative analysis of a wide range of scientific studies and technological case studies. The methodology critically examines wind, solar, and hydrogen energy, carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies, hybrid systems, and various energy storage solutions. The assessment incorporates key technological, economic, and environmental metrics, including energy return on investment (EROI), levelized cost of energy (LCOE), capital and operational expenditures (CAPEX/OPEX), and carbon footprint across the entire value chain. *RESULTS.* The study identifies significant contradictions and systemic challenges in the transition to renewables. It demonstrates that many promoted solutions, such as hydrogen economy and CCUS, remain at early development stages, characterized by high costs, low EROI, and unresolved end-of-life waste management issues for wind turbine blades, solar panels, and batteries. The analysis confirms the non-viability of renewable energy sources in regions with low natural potential without substantial government subsidies. Furthermore, the mass integration of inverter-based generation reduces the overall system inertia, creating substantial risks for grid stability and reliability. The research also highlights severe environmental and social costs associated with the extraction of critical materials like lithium and cobalt, revealing a hidden negative footprint of the green energy supply chain. *CONCLUSIONS.* The study concludes that the declared benefits of the green energy transition are often offset by a complex array of hidden technological, economic, and environmental problems. The radical transformation of energy systems is not an unequivocally positive process and presents multifaceted challenges. It necessitates a balanced approach, deep systemic analysis, and the development of comprehensive strategies involving the state, business, and scientific community, rather than merely following trends. A critical revision of current assessment methodologies is required to fully account for the entire lifecycle of green technologies and their true systemic costs.

Keywords: green energy; modern civilization; waste management; rare resource extraction; social justice; PR strategy; green economy; solar panels; carbon footprint; battery storage; wind turbine blades; renewable energy sources; electric vehicles.

For citation: Davydov D.A., Nikitin K.I., Zagoruyko A.A., Tatevosyan A.A. The green energy transition: systemic contradictions and hidden costs. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 22-41. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-22-41.

Введение (Introduction)

Глобальный спрос на энергетические ресурсы неуклонно возрастает под влиянием демографической динамики, повсеместной цифровизации и технологизации быта и промышленности. Мощным катализатором перехода к «зеленой» энергетике послужил многократный рост мирового энергопотребления со скромных 5600 ТВт·ч в XIX веке до колоссальных 170 000 ТВт·ч сегодня, сопровождающийся огромным разбросом в уровнях душевого потребления между регионами (от 98 до 105 540 кВт·ч). Нарастающая угроза истощения углеводородных ресурсов, усугубляемая их доказанным вредом для

окружающей среды, сделала этот переход не просто трендом, а императивом для современной цивилизации.

Ядро «зеленой» энергетики составляют технологии, преобразующие неисчерпаемые природные ресурсы, такие как: солнечное излучение, ветер, гидроэнергия и биотопливо – в полезную энергию. Хотя термин «зеленая экономика» был введен Майклом Джейкобсом еще в 1991 году, его повсеместное принятие стало прямым следствием финансового кризиса 2008 года, который обнажил уязвимости традиционной модели развития. В этих условиях «зеленая» экономика стала восприниматься как жизнеспособная стратегия для обеспечения стабильности и нового качества экономического роста.

Таким образом, «зеленая» энергетика и «зеленая» экономика образуют симбиотическую связь, где общий эпитет «зеленый» универсально характеризует их основополагающие принципы в обеих сферах. Совокупность антропоморфных, а вслед за ними и антропогенных факторов оказывает негативное влияние на экологические системы Земли, при том, что основная идея зеленой экономики – снижение этого влияния на экосистемы и рост равномерное развитие экономики без существенного роста производственных мощностей. Однозначно можно утверждать, что благополучное существование человеческой цивилизации связано с ресурсами, которые в свою очередь связаны с экологией и существование концепций, предложений и идей для получения этих ресурсов с минимальным воздействием на экосистемы, в которых живёт человечество были, есть и будут. Тем самым это можно отнести к попыткам людей снизить отрицательные эффекты воздействия на экологию, что вызвано заботой о себе и будущих поколениях. Несмотря на обилие позитивной риторики, подчеркивающей экологичность «зеленой» экономики, ее практическая реализация сталкивается с кризисом эффективности – отсутствием работающих инструментов для реализации масштабных проектов по восстановлению экосистем. Это приводит к парадоксу: при тотальном медийном охвате тем сохранения природы и декларативных усилиях, реальные экологические показатели улучшаются незначительно. В научной литературе высказывается мнение, что «зеленая» экономика используется скорее для пропаганды, нежели для решения экологических проблем [1, с. 97]. Данный дискурс активно используется рядом левых политических сил на Западе, которые абсолютизируют антропогенное воздействие на природу. Подобная радикализация порождает экстремальные формы протеста, вплоть до экотерроризма. При этом ключевые решения в области «зеленых» технологий зачастую определяются лоббистскими интересами и политической конъюнктурой, что малозаметно для рядового потребителя [2]. Таким образом, хотя переход на ВИЭ и снижение выбросов несут неоспоримые бенефиты, системные вызовы – нестабильность генерации, ресурсоемкость, высокая стоимость и необходимость в системах хранения энергии – создают новые комплексные проблемы.

Литературный обзор (Literature Review)

Одна из основных проблем экономического роста увеличение выбросов парниковых газов в атмосферу, происходит в первую очередь за счёт энергоемких отраслей, таких как металлургия [3]. Для решения необходимо внедрение прорывных технологий, включая технологии прямого восстановления железа (DRI) на основе водорода, улавливание и хранение CO₂ (CCUS), электролиза железной руды. Однако эти технологии пока находятся на ранней стадии разработки и сталкиваются со значительными техническими, экономическими и инфраструктурными ограничениями [3]. На данном этапе развития энергетики наиболее распространено применение технологии с использованием твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ), где имеет место факт выброса углекислого газа в атмосферу. Поэтому даже в этом современном источнике энергии CO₂ необходимо улавливать и утилизировать. Авторы [4] фокусируются на декарбонизации энергетики через улавливание CO₂, выделяемого при работе ТОТЭ на ископаемом топливе. Изоляция CO₂ на ТОТЭ снижает КПД на 10-15% и не устраняет выбросов при производстве абсорбентов – 6% NaOH и 6% CaO, т.к. предлагаемая регенерация CaO требует нагрева до 95°C, что увеличивает эксплуатационные затраты (ОРЕХ), а производство NaOH связано с выбросами Cl₂ (электролиз NaCl). Шлам, возникающий в рассматриваемом процессе улавливания углекислого газа – CaCO₃ может содержать примеси тяжёлых металлов, ограничивающие его утилизацию. В исследовании [5] более подробно рассмотрена технология захвата, хранения и утилизации углекислого газа, применение которой осложняется следующими факторами:

1. Высокие капитальные вложения и длительный срок окупаемости проектов;
2. Отсутствие методологической базы по оценке выбросов парниковых газов и стоимости углеродной единицы;

3. Геологические риски при хранении CO₂, связанные с оценкой структуры пластов-коллекторов и возможными утечками;

4. Организационно-технологические риски, связанные с отсутствием опыта реализации и сертифицированных технологий по улавливанию, транспортировке и захоронению CO₂;

5. Технологические риски, связанные с коррозионными повреждениями трубопроводов при транспортировке агрессивного CO₂.

В работе [6] рассматриваются эксплуатационные характеристики газотурбинной установки (ГТУ), применяющей в качестве топлива на синтез-газ, извлеченный из угля методом кислородной газификации. Авторы считают, что это позволит увеличить энергоэффективность ГТУ и декарбонизировать такой источник энергии как ископаемый уголь, но этот путь не является «зелёным решением», т.к. провоцирует высокие выбросы CO₂ на всех этапах (добыча, газификация, сжигание). Авторы игнорируют углеродный след, хотя упоминают «декарбонизацию энергетики». В работе не приведены данные по эмиссии NO_x/SO₂, хотя другие исследования отмечают рост NO_x при использовании синтез-газа. При такой технологии наблюдается рост расхода топлива в 4-5 раз, что сделает электроэнергию дорогой, особенно при текущих ценах на уголь и затратах на сложные системы очистки синтез-газа (из-за высокой зольности угля), что увеличивает капитальные затраты.

Существует подход [7] к безотходному принципу работы производств, отходы которых, такие как опилки и шелуха, могут быть переработаны в топливные гранулы для собственных мини-ТЭС и покрытия своих энергетических нужд (электроэнергия, пар). Но при рассмотрении подобного решения не учитывается, что сжигание соломы повышает выбросы NO_x из-за высокого содержания азота (2.36%), а также упущены из виду: углеродный след от транспортировки и подготовки биотоплива (сушка, измельчение) и высокая зольность соломы (4.5-6.1%) и низкая температура плавления золы увеличивают риск шлакования котла, снижая КПД. Отсутствие решений для очистки или модификации топлива усугубляет проблему. Коррозионная активность, вызванная содержанием хлора в соломе, ускоряет износ оборудования также не рассматривается как проблема.

В качестве альтернативного топлива в работе [8] рассматриваются методы получения биодизельного топлива с помощью установки проточного типа с реакторами периодического и непрерывного действия. Высокие температуры (до 400°C) и давления (до 45 МПа) технологического процесса данного способа требуют дорогостоящего оборудования и повышают риски эксплуатации, а энергозатраты на рециркуляцию избыточного спирта могут нивелировать экономические выгоды, при и без того высоких капитальных затратах и конкуренции с дешевыми ископаемыми видами топлива. При этом термическая деградация ненасыщенных жирных кислот при 300°C снижает качество получаемого биодизеля. Также ряд ученых рассматривает [9] печное бытовое топливо (ПБТ) в качестве основного резервного топлива для котельных в РФ и Беларуси. Производство которого осуществляется путём переработки продуктов прямой перегонки нефти, дистиллятов, полученные в результате вторичных процессов нефтепереработки – термического и каталитического крекинга, а также коксования. Исследования авторов [9] в лабораторных условиях показывают, что ПБТ снижает выбросы SO₂ в 70 раз, зольность – в 7 раз, образование сажи – в 2 раз по сравнению с мазутом. Но хотя выбросы SO₂ снижаются, выбросы NO_x и CO₂ при сжигании ПБТ выше, чем у мазута. Это не учтено в выводах авторов. Есть также нерешенные препятствия в разделе логистики и безопасности: ПБТ требует хранения в герметичных ёмкостях, что сложнее мазутных резервуаров, а также низкая температура вспышки (62°C против 110°C у мазута) повышает пожарную опасность. Не существует оценки затрат на переоборудование котельных (замена форсунок, системы подогрева), а зависимость ПБТ от нефти делает систему уязвимой к ценам на сырьё.

Неоднозначные эффекты от следования требованиям по кардинальной трансформации энергетических систем в сторону декарбонизации, повышения энергоэффективности и увеличения доли ВИЭ рассматриваются в работах [10-15]. Построение эконометрических моделей на основе панельных данных по 83 регионам России за 2016-2020 годы (с учетом индивидуальных различий регионов) показывает о наличии двойных эффектов взаимного влияния в триаде «инновации-энергоэффективность-декарбонизация» [10]. Водородный же энергопереход для России, рассмотренный в работе [11] не анализирует КПД цепочки «производство-хранение-транспортировка» «зелёного» водорода, включая потери при электролизе (~30%), сжижении/компрессии. Также при массовом использовании водорода не рассмотрены риски утечек водорода и его влияние на парниковый эффект, усиливающее эффект метана. Себестоимость «зелёного» водорода

(€3,5–7,5/кг) в 4-7 раз выше «серого» [12] является важным экономическим барьером развития водородной энергетики в России. Исследование [12] стратегических документов Европейского Союза (European Green Deal, Водородная стратегия-2020) и России (Энергостратегия-2035, «дорожная карта» по водороду) показывает, что водород станет важнейшим энергоносителем в декарбонизированной экономике, при этом Европейский Союз планирует развивать «зелёный» водород, но до 2050 года будет импортировать «голубой» водород, что создаёт возможности для России благодаря её конкурентным преимуществам, однако медлительность в принятии решений может привести к упущению рыночных перспектив.

В исследовании [13] авторы применяют комплексный подход к анализу водородной энергетики в России, используя сравнительный анализ технологий производства водорода (электролиз, паровая конверсия метана, пиролиз) с оценкой их себестоимости. Особое внимание уделяется предприятиям Татарстана. При этом в работе выявляются существенные проблемы: высокая энергоёмкость криогенного хранения (10.5 кВт·ч/кг), значительные капитальные затраты на электролизёры, отсутствие детального анализа углеродного следа «голубого» водорода и его рисков, нерешённые вопросы масштабирования инновационных решений вроде гидрида магния, а также недостаточная проработка логистических аспектов планируемого экспорта водорода.

Противоречия между развитыми и развивающимися странами по вопросам темпов, приоритетов и финансирования энергетического перехода рассмотрены на примере Туниса [14]. Изучив текущее состояние планов и программ по развитию «зеленой» энергетики, статистических данных по структуре энергобаланса и парниковых выбросов с учетом сложностей интеграции прерывистой генерации от ВИЭ в энергосистему Туниса [14] и Индонезии [15] авторы приходят к выводу, что, несмотря на амбициозные планы стран по развитию «зеленой» энергетики существуют проблемы на фоне текущей доминирующей роли ископаемых видов топлива в энергетике Туниса [14]. Индонезия же, повторяя амбициозный курс Туниса уже сейчас сталкивается с растущим разрывом между спросом на энергию и ее предложением [15], а также ограничена внутренними ресурсами и технологиями для стремительного перехода к ВИЭ, что делает ее зависимой от технологий и финансирования иностранных государств (Франция, Германия) в области «зеленой» энергетики.

Анализ [16] текущих тенденций и прогнозов в области спроса на ископаемое топливо свидетельствует о снижении спроса на нефть и газ по мере наращивания инвестиций в ВИЭ, технологии улавливания и хранения углерода. В результате проведенного исследования понятно, что нефть и газ не обречены на немедленное исчезновение, а крупнейшие игроки нефтегазовой отрасли стремятся адаптироваться, сосредоточившись на чистых технологиях и стратегическом партнерстве с растущим сектором ВИЭ, для обеспечения своего будущего в «зеленом» мире, чего нельзя сказать о странах сильно зависящих от экспорта нефти и газа, ведь для них «зеленый» мир может привести к бюджетному дефициту.

Адаптация к новым рыночным реалиям является императивом для современных энергетических транснациональных компаний (ТНК), что выражается в активной интеграции генерации на основе ВИЭ в их стратегии развития. Наглядной иллюстрацией данной тенденции служит трансформация бизнес-модели (BP) (UK, London). Отправной точкой стало признание необходимости изменений после кризисного инцидента в Мексиканском заливе, которое переросло в последовательную реализацию новой стратегии.

Первой фазой стало вхождение в капитал компании Lightsource BP (UK, London), активов в области солнечной энергетики. На второй фазе BP осуществила стратегические инвестиции в высокотехнологичные сегменты, приобретя компании Chargemaster (UK, Milton Keynes) и FreeWire Technologies (USA, San Leandro), что позволило закрепиться в смежных сегментах – зарядной инфраструктуре и системах накопления энергии. Ключевыми драйверами данной трансформации выступают: стремление сохранить рыночную долю на европейском рынке АЗС, необходимость соответствия регуляторным требованиям ЕС в области ВИЭ, а также создание новых статей дохода для компенсации растущих экологических издержек, таких как затраты на «зеленые» квоты [17]. Компания заявляет о планах сокращения планов по добычи полезных ископаемых на 40% к 2030 году и инвестировать ежегодно в зеленую экономику порядка \$500 млн., но какие мероприятия будут включены и проведены в рамках этой инвестиционной программы? Инвестиции в биотопливо, либо покупках зеленых евробондов и других компании из зеленого сектора экономики – о чём говорится в отчетности о стратегии развития корпорации [17].

Одна из крупнейших европейских ТНК – Royal Dutch Shell (RDS) (UK, London) конкурирует с вышеупомянутой BP на рынке. Помимо схожих с BP стратегических и

маркетинговых ходов, RDS дальше продвинулась в своём желании соответствовать европейским правилам и сменила наименование вида деятельности корпорации став «энергетической компанией переходного периода», а также объявила о создании подразделения ответственного за разработки в области альтернативных источников энергии [18].

Исключить ассоциацию себя как компании причастной к добыче углеводородов решила и норвежская Statoil (один из крупнейших поставщиков сырой нефти), сменив название на Equinor. В качестве осязаемых попыток, сигнализирующих о беспокойстве за состоянием окружающей среды, компания приняла участие в разработке плавучего ветрогенератора [19].

Total продающая в сутки порядка 1,5 млн. тонн баррелей нефтепродуктов по всему миру учредила Total Capital Venture (TCV) (UK, London). Цель – вписаться в общепринятую повестку зеленой экономики, инвестируя в стартапы разрабатывающие технологии ВИЭ. Следующим этапом стала покупка разработчика маломощных ветрогенераторов United Wind (USA, New York City) [20].

Экологический след от эксплуатации ветроэнергетических установок наземного базирования пренебрежимо мал, поскольку их работа основана на прямом преобразовании кинетической энергии воздушных масс без процессов сгорания или химических реакций. Данный фактор ставит ветроэнергетику в ряд наиболее экологически безопасных технологий генерации. Первым шагом для применения этого рода источников энергии является оценка ветроэнергетического потенциала региона, где рассматривается установка турбин [21-24].

На примере Туркестана проведен анализ данных 72 метеостанций в регионе за 16 лет (2004-2020 годы) [21]. Средние скорости ветра равные 3,3-4,4 м/с недостаточны для рентабельности. Для сравнения в наиболее наполненных ветряками Дании и Германии они составляют 7-9 м/с, а рассматриваемая удельная мощность 22-150 Вт/м² (при высоте 10 м) в 3-5 раз ниже порога рентабельности (500+ Вт/м²). В работе отсутствует расчёт LCOE (Levelized Cost of Energy), срок окупаемости, а также не учтена стоимость интеграции в сеть (например, необходимость накопителей для сглаживания генерации и применение специальных турбин с большим диаметром ротора и низким cut-in speed). Всё это свидетельствует о нерентабельности технологии при текущих скоростях ветра, т.к. применение ветроэнергетических установок мощностью >1 МВт потребует субсидий или политики «зелёных» тарифов.

Различные методики оценки ветропотенциала на примере Крыма [22] несут практико-ориентированный анализ с помощью распределения Рэля смоделирована скорость ветра и влияние агрегирования данных на погрешность: доказана допустимость интервалов 1-2 м/с, что упрощает прогнозирование. С помощью учета рельефа через методику Милевского, анализируя данные затененности датчиков метеостанции можно корректировать данные для горных/прибрежных зон. Одновременно и недостатком проведенной оценки ветропотенциала является распределения Рэля, так как для генерации «идеальных» данных игнорирует локальные аномалии ветра (турбулентность, сезонные колебания). Авторы не учитывают инерционные характеристики новых турбин. ВЭУ мощностью 5+ МВт иначе реагируют на изменение ветра, чем анализируемые модели, а отсутствие анализа влияния высоты ротора недопустимо для современных ВЭУ (хабы на 150+ м) корреляция между данными датчиков (10-30 м) и реальной скоростью слабее.

В рамках ветромониторинга трёх площадок в Татарстане (Камско-Устьинский, Спасский, Рыбно-Слободский районы) для оценки целесообразности строительства ветропарков были применены мачты высотой 100 м, калиброванные анемометров (точностью ±0,5%), флюгеров, датчики температуры, влажности и давления, анализировались данные полученные с июля 2018 по январь 2019 года на высотах 50, 75, 95, 100 м с интервалом 10 минут. В рамках этого исследования [23] подтверждено, что увеличение высоты ВЭУ критически важно для рентабельности в условиях среднегодовой скорости ветра равной 6 м/с (что в свою очередь близко к минимально допустимому порогу для ВЭУ), а в густонаселенном Татарстане размещение ВЭУ высотой >100 м потребует значительных зон отчуждения и вызовет ряд неудобств населения. Помимо всего этого в ходе анализа данных [23] выявлен летний провал генерации (в январе скорость ветра до 10 м/с, в июле она составляет ≤6,5 м/с), который критичен в совокупности с пиковым спросом на электроэнергию в этот период (кондиционирование).

На примере исследования Монголии [24] авторами сделан акцент на решении проблемы нестабильности ветрогенерации из-за стохастической природы ветра, что критично для балансировки энергосистем с высокой долей ВИЭ. С применением

ансамблевых методы машинного обучения, таких как: Random Forest (RF), AdaBoost (ADA) и XGBoost (XGB) на основе данных почасовых временных рядов скорости ветра и выработки трёх ВЭУ Монголии (2019-2021 годы). Наименьшая нормализованная средняя абсолютная ошибка прогноза скорости ветра при использовании метода ADA составила 12,3-13,3%, что неприемлемо для систем с долей ВЭУ >20%, где ошибка в 5-7% мощности вызывает риски небаланса, а отдельные суточные ошибки прогнозирования скорости ветра достигают 31%, что критично для управления энергосистемой.

Предлагаемая модель [25] на примере Мурманской области предполагает прямое замещение топлива ветром (гибридная система «ВЭУ + котельная»), но не учитывает несовпадение графиков генерации и потребления тепла, упущены КПД электродкотлов/нагревательных элементов, а также необходимость тепловых аккумуляторов для сглаживания генерации. В рамках модели игнорируются потери в сетях, управление нагрузкой, роль резервирования при слабом ветре. Без аккумулирования избытков ветровой энергии может теряться.

Сравнительный анализ [26] четырёх типов ВЭУ для систем электроснабжения подтверждает эти неутешительные выводы, авторы анализа склоняются к двум наиболее подходящим типам ВЭУ, а именно: генератору с двойным питанием (Тип 3) и системе с полномасштабным преобразователем (Тип 4). Но и в этом анализе утверждения о «перспективности Типа 4» опираются на общие тенденции, а не конкретные экономические модели, при этом Тип 3 требует частой замены щеток (каждые 6-12 месяцев), что увеличивает затраты для удалённых и морских объектов.

Попытка исследователей [27] получить универсальную модель для оценки технико-экономических показателей (ТЭП) ВЭУ определили ключевые зависимости, а именно:

1. Глубина воды увеличивает стоимость фундаментов (на 48% при переходе с 8 м до 20 м);
2. Системы HVDC (High Voltage Direct Current) экономически оправданы при удалении от берега >60 км;
3. LCOE для оффшорных ВЭУ составляет 60-70 €/МВт;
4. Тип 4 (прямой привод + полный преобразователь) – наиболее перспективен для снижения LCOE в долгосрочной перспективе.

Характерной методологической проблемой ряда публикаций является минимизация климатических рисков, таких как коррозионное разрушение оборудования, обледенение турбин и высокая стоимость обслуживания оффшорных объектов. Параллельно игнорируется фундаментальная проблема интеграции ВИЭ в сети – отсутствие адекватных решений для компенсации реактивной мощности в высоковольтных сетях переменного тока HVAC (High Voltage Alternating Current), что создаёт существенные барьеры для надежности всей энергетической инфраструктуры. Несмотря на эксплуатационный срок службы наземных ветроэнергетических установок (ВЭУ) в 20-25 лет, их экологический баланс омрачается проблемой утилизации композитных материалов лопастей. В настоящее время отсутствуют экономически жизнеспособные и технологически отработанные методы их переработки, в связи с чем большинство отработавших лопастей направляется на полигоны для захоронения.

Согласно исследованию Университета Стратклайда (2023), глобальный объем таких отходов в 2023 году достиг 400 тысяч тонн, а к 2050 году может превысить 2 миллиона тонн [28]. Оценочные данные, предоставляемые основателем Глобального совета по ветроэнергетике, указывают на формирование в Европе значительного потока отходов в виде отработавших лопастей ветроэнергетических установок (ВЭУ), объем которого к 2025 году может достигать четырех тысяч единиц в год [29].

В данном контексте особую актуальность приобретают результаты исследований заключительной стадии жизненного цикла. Так, исследование, выполненное СПбПУ (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого), в рамках которого анализировалось негативное влияние по нескольким ключевым направлениям (экологическое состояние природных систем, глобальные климатические изменения и здоровье населения) приводит к выводу об отсутствии в настоящее время технологически и экономически реализуемого способа утилизации, который был бы полностью лишен негативных экологических последствий [30, с. 418]. Указанная проблема формирует комплексный вызов, ставящий под вопрос абсолютную экологическую чистоту ветроэнергетики.

Налицо системное противоречие: с одной стороны, эксплуатация ВЭУ мощностью 1 МВт способствует значительному сокращению выбросов в атмосферу, включая примерно 1800 тонн CO₂-эквивалента парниковых газов, 9 тонн оксида углерода и 4 тонн азотных

оксидов [31]. С другой стороны, экологическая нагрузка от конструкции самих установок, в частности от лопастей, масса которых может достигать до 14 тонн при длине более 35 метров, возникает на самом раннем этапе их утилизации – в ходе транспортировочных операций к объектам последующего размещения или технологической переработки. Существующие методы утилизации, такие как со-сжигание в цементных печах (при 400-700 °С) с предварительным измельчением, требуют значительных энергозатрат и оставляют несгораемый остаток в виде стекловолокна. Указанные факторы вступают в противоречие с декларируемыми принципами замкнутого цикла и устойчивого развития, лежащими в основе концепции «зеленой» энергетики.

Исследователи из Новосибирска [32] проанализировали наиболее популярный у сторонников «зеленой» энергетики метод Levelized Cost Of Energy (LCOE), который используется для оценки стоимости электроэнергии из возобновляемых источников в отчете Управления энергетической информации США за 2021 год. Пришли к выводу, что метод не учитывает влияние погодных факторов на системы ВИЭ и последующий за ухудшением погоды и дефицит мощности в энергосистемах с «зеленой» генерацией, а также рассматривает источники с максимальным набором функций и систем (ветрозащитные рамы, система слежения за солнцем) не закладывая при этом в расчет услуги по эксплуатации таких усложненных вариантов механизмов. Авторы [32] предлагают собственный метод оценки на примере установки ветряной турбины мощностью 2,5 МВт, в результате которого при первоначальных инвестициях 4 миллиона долларов прогнозируется убыток в 2,35 миллиона долларов, а выход на безубыточность для данного случая подразумевается лишь при увеличении стоимости электроэнергии, что в свою очередь, превышает в 3 раза стоимость энергии от традиционных источников.

Результаты этого исследования находят свое подтверждение и в работе [33] посвященной системному анализу устройства рынков энергосбыта стран БРИКС, где отражено наличие высоких капитальных издержек и неопределенность в отношении фактической выработки электроэнергии ВИЭ. А это в свою очередь актуализирует необходимость государственной поддержки с целью минимизации системных рисков. Предложены оптимальные варианты становления институциональной среды, корректировки механизмов субсидирования проектов ВИЭ.

Глобальное распространение технологий использования солнечной энергии стимулировало формирование мощной производственной цепочки и активную политику стимулирования во многих странах. Индустрия характеризуется рекордными темпами роста: в 2021-2024 гг. прирост потребления электроэнергии от фотоэлектрических установок достигал 40% в год [34]. Согласно прогнозам, совокупная генерирующая мощность объектов солнечной энергетики в мировом масштабе увеличится с примерно 400 ГВт в настоящее время до 4500 ГВт к 2050 году [35, с. 16].

Анализ динамики развития солнечной энергетики в России с 2014 по 2022 год в совокупности с принятыми нормативно-правовыми актами, направленными на поддержку и развитие ВИЭ [36], указывает на заинтересованность страны в «зеленой» генерации. Но вкуче с этим рассматриваются и проблемы реализации солнечной генерации в России, а именно: высокая стоимость строительства таких объектов, наличие уже существующих атомных электростанций (АЭС), тепловых электростанций (ТЭС), которые покрывают потребности крупных промышленных агломераций, что делает невыгодным инвестиции в развитие солнечной энергетики вкуче с проблемами по стабильной (зависимость от погодных условий) и бесперебойной передаче больших объемов мощности от солнечных электростанций до потребителя [36].

Существуют разные идеи гибридных энергокомплексов [37, 38]. Для совместного производства водорода (методом электролиза), кислорода, тепловой и электрической энергии [37] утверждается, что достаточной можно принять мощность фотоэлектрических установок 1,5 МВт, при этом экономическая эффективность проекта сильно зависит от цены водорода: при высокой стоимости (19,2 тыс. руб./кг) проект окупается за 4,7 года с чистым дисконтированным доходом (ЧДД) 2558 млн руб., а даже при низкой цене (0,48 тыс. руб./кг) остаётся прибыльным благодаря продаже тепла, электроэнергии и кислорода. Однако исследование имеет существенные ограничения: комплекс не является полностью «зелёным» из-за использования газопоршневых двигателей на природном газе, что создаёт выбросы CO₂. Экономическая модель построена на завышенных ценах на водород, существенно превышающих рыночные показатели. Кроме того, авторы не учли возможности интеграции накопителей энергии и альтернативных методов хранения водорода, таких как аммиак. Также вызывает вопросы масштабируемость решения, рассчитанного лишь на заправку 40 автомобилей в сутки, и отсутствие оценки углеродного

следа проекта. В итоге предложенная модель может рассматриваться только как переходное решение для промышленных хабов с доступом к дешёвой солнечной энергии.

Оценка энергетической эффективности гибридной гелио-геотермальной электростанции комбинирующей геотермальный ресурс и солнечную энергию (параболоцилиндрические концентраторы) [38] показала, что станция генерирует 7158 кВт при добавлении 5 МВт солнечной тепловой энергии, что на 8% больше, чем суммарная мощность автономных станций (5116 кВт геотермальной + 1887 кВт солнечной). Но при этом в исследовании не учтена прерывистость солнечного ресурса, ведь при падении солнечной активности геотермальный цикл работает в неоптимальном режиме (без перегрева), что снижает общую эффективность. Паразитные же нагрузки гибридной системы оценены условно (10% от мощности), без детального анализа дополнительных потерь в теплообменнике и насосах, без учёта факта коррозии и отложений, что при перегреве геотермального пара (содержащего H_2S , CO_2 и соли) не рассмотрены. Это сокращает срок службы оборудования и увеличивает эксплуатационные расходы.

Авторы исследования [39] предлагают решение по замене дизельных генераторов (ДГ) на гибридные ветро-солнечные установки для электроснабжения задвижек нефтепроводов в Восточной Сибири и Дальнем Востоке, демонстрируя, что система мощностью 25 кВт (10 кВт солнечных панелей и 15 кВт ветрогенераторов) способна обеспечить нагрузку с сокращением потребления дизтоплива на 80%, утверждая, что схема с общими накопителями надёжнее раздельной, а срок окупаемости составляет 4,12 года. Однако работа имеет существенные ограничения: низкая средняя скорость ветра (3,2 м/с) близка к порогу запуска ветрогенераторов, что создаёт риски при длительных безветренных периодах. Не учтены проблемы работы оборудования при экстремально низких температурах (ниже -40 °С), включая обледенение лопастей и снижение КПД солнечных панелей. Использование свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (АКБ) в арктических условиях вызывает опасения из-за быстрой деградации при холоде и короткого срока службы (3-5 лет). Экономические расчёты основаны на заниженных ценах на оборудование, а также не учитывают затраты на утилизацию. Кроме того, заявленное повышение надёжности до I категории не подтверждается при длительных периодах низкой генерации ВИЭ, когда зависимость от ДГ сохраняется.

Современные ученые разрабатывают разнообразные алгоритмы оптимизации гибридных фотоэлектрических систем. Рассмотрим на примере подобной системы для спортзала в Ираке [40], которая сочетает электрохимическое и тепловое накопление энергии. Авторы доказали экономическую эффективность прямого преобразования солнечной энергии в тепло (КПД 95-99%) по сравнению с аккумуляцией через батареи (КПД 70-90%). В работе показано, что в тёплое время года система мощностью 76 кВт способна полностью обеспечить потребности объекта, а зимой требуется лишь 5-6 часов работы дизель-генератора. Однако работа имеет существенные ограничения: не учтён критический фактор высоких летних температур (до 50°C), снижающих КПД солнечных модулей на 15-25%. Отсутствует детальный экономический анализ, включая сравнение с альтернативными решениями, что особенно важно для Ирака с относительно низким ВВП. Модель ограничена масштабами малого объекта, а для промышленных нагрузок предложенное решение менее эффективно, чем тепловые насосы или прямые солнечные коллекторы, не оценены потери в инверторе и тепловом контроллере.

Задачи краткосрочного прогнозирования выработки солнечной электростанции мощностью 15 МВт относительно успешно решена в работе [41]. Ученые, достигнув точности среднеквадратической ошибки около 4% с помощью алгоритма Random Forest предложили архитектуру системы сбора данных на базе стандарта МЭК 61850. Однако анализ проведён всего на 9 днях данных, полученных в октябре, а этого недостаточно для надёжной оценки работы моделей в различных сезонных условиях, а использование исключительно исторических данных, без учета физических принципов работы СЭС, что может привести к нестабильности модели при нетипичных погодных условиях.

В работе [41] не раскрыт вопрос интеграции метеопрогноза для предсказания выработки на сутки вперёд, а также отсутствует связь между результатами прогноза и процессом принятия решений системным оператором. Предложенный метод оптимизации сети методом «грубой силы» непрактичен для реальных систем среднего и крупного масштаба. Кроме того, не исследована масштабируемость результатов на СЭС другой мощности или в других географических условиях.

Известен случай, произошедший 23 июня 2023 года, когда град серьёзно повредил солнечную электростанцию в Скоттсблaffe, штат Небраска. Непогода серьёзно повредила фотоэлектрические модули, что привело к снижению их эффективности и необходимости

ремонта, а в худших случаях и замены [42]. Фактическая продолжительность эффективной эксплуатации фотоэлектрических модулей часто оказывается меньше заявленного 20-летнего срока из-за прогрессирующей деградации, которая может достигать 10% выходной мощности в первые 10 лет. Столь значительная потеря производительности в условиях изначально переменной генерации делает экономически невыгодной дальнейшую эксплуатацию панелей, провоцируя их преждевременную замену. Как следствие, уже в обозримой перспективе мир столкнется с кризисом управления отходами: прогнозируемый IRENA объем фотоэлектрических отходов в 78 млн тонн к 2050 году [43] свидетельствует о необходимости срочного развития инфраструктуры для их утилизации и рециклинга.

Но какие варианты переработки для подобного рода источников энергии предлагает современная цивилизация? Первый этап по переработке электронных отходов – грубая обработка, а именно снимается каркас, соединяющие планки, извлекаются алюминий и медь. Механическое дробление модуля приводит к получению композитного материала, доминирующую фракцию в котором составляет стекло. Однако его высокая загрязненность металлами (Pb, Al, Ag, Si) препятствует эффективному рециклингу.

В существующей практике сложилось два основных сценария: термическая обработка (при 500°C) либо, реже, использование в качестве вторичного сырья для фотоэлектрической промышленности, что подтверждается данными IRENA [43]. Следует подчеркнуть, что второй, более устойчивый сценарий, в настоящее время реализован лишь в единичных промышленных кластерах в Западной Европе. По итогам исследований специалистов из Университета Аризоны, за полученные в ходе утилизации панели самого распространённого вида из 60 модулей полезные компоненты, перерабатывающая компания может получить порядка \$3. Себестоимость всех мероприятий по переработке оценивается специалистом Recycle PV Сэмом Вандерхурфом на уровне \$25, при том, что разместит панель на свалке, как вид твёрдых отходов стоит около \$1 [43].

Традиционные виды топлива (нефть, газ, уголь) являются более эффективными с точки зрения показателя EROI по сравнению с «зелеными» технологиями [44]. Повышение эффективности и надежности солнечной генерации напрямую зависит от интеграции в энергосистему накопителей энергии (storage systems), включая аккумулирующие устройства и суперконденсаторы. Данные системы позволяют оптимизировать энергобаланс: аккумулировать избыточную электроэнергию в периоды высокой инсоляции с последующей ее выдачей в часы пикового спроса, тем самым повышая коэффициент использования установленной мощности (capacity factor) и общую ценность солнечной генерации для энергосистемы.

Исследование [45] современных технологий хранения энергии, выявило, что некоторые системы достигли коммерческой зрелости: гидроаккумулирующие станции и литий-ионные батареи подходят для сетевой балансировки, а маховики эффективны для краткосрочной стабилизации частоты. Они прогнозируют снижение стоимости литий-ионных батарей до 160 долларов за кВт·ч к 2025 году и отмечают рост интереса к гибридным системам. Однако работа имеет существенные ограничения: использованные данные устарели, так как основаны на информации до 2016 года, при этом не учтён прорыв в твердотельных литий-ионных батареях и водородных технологиях. Авторы не провели оценку удельной стоимости хранения энергии (LCOES) и проигнорировали новейшие разработки, такие как проточные цинк-воздушные батареи и термальные накопители. Экономический анализ неполный: не рассмотрены экологические издержки литий-ионных батарей и проблема их утилизации, а также риски увеличения углеродного следа при зарядке от угольных станций. Кроме того, не учтены ресурсные ограничения массового внедрения литий-ионных систем, зависящих от редких металлов.

Предлагаемый авторами [46] сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии (СПЭНЭ-1) на основе высокотемпературных сверхпроводников, по их утверждению, способен эффективно решать задачи локальных энергосетей с ВИЭ: выравнивать пики нагрузки, обеспечивать резервирование и коммерциализацию избыточной энергии. Они подчёркивают преимущества технологии, включая отсутствие механических потерь и использование доступного жидкого азота вместо гелия. Однако работа имеет существенные ограничения: не представлены данные о капитальных и операционных затратах, а также об удельной стоимости хранения энергии. Практическая реализация осложняется необходимостью постоянного охлаждения до экстремально низких температур (–196°C), что требует энергозатратной инфраструктуры и контроля утечек азота и осложняется их эффективностью для краткосрочного хранения энергии. В работе [46] отсутствуют экспериментальные данные по КПД и сроку службы в реальных условиях, не проработана интеграция с другими типами накопителей для компенсации инерционности

системы. В результате идея остаётся перспективной, но пока нишевой разработкой, требующей существенной доработки для практического применения.

Существует также и концепция автономных гибридных систем электроснабжения с интеграцией умных сетей [47], авторы подтверждают, что гибридные системы ВИЭ с накопителями способны обеспечивать стабильное энергоснабжение удалённых объектов при условии сложного управления стохастической генерацией. Однако работа имеет существенные ограничения: модели АКБ в Simulink упрощены и не учитывают их деградацию и температурную зависимость, а анализ ограничен данными всего за 3 дня. Экономическая составляющая не проработана – не учтена стоимость инфраструктуры smart grid, включая IoT-устройства и системы кибербезопасности. Выявлены технологические проблемы: низкая плотность энергии накопителей, риски нестабильности при совместной работе разных источников, отсутствие анализа гармоник в сети. Для практического применения необходима более глубокая проработка всех этих аспектов.

Авторы исследования [48] разработали гибридный накопитель энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов для защиты промышленных потребителей от кратковременных нарушений электроснабжения, доказав эффективность такой системы: суперконденсаторы обеспечивают мгновенный отклик (1 мкс) при сбоях длительностью до 60 мс, а аккумуляторы поддерживают питание при более длительных нарушениях. Однако работа не содержит в себе оценки экономической эффективности внедрения. Авторами не учтена деградация литий-ионных батарей при частых циклах и пиковых нагрузках, чувствительность к экстремальным температурам. Сложность интеграции системы увеличивает риски сбоев и затраты на обслуживание. Моделирование, проведенное авторами упрощено: не учтены эффект Пекерта и работа при несимметричных коротких замыканиях. В результате предложенное решение остаётся в разделе перспективных способов.

В работе [49] проведен анализ эксплуатационных особенностей литий-ионных накопителей энергии на примере погрузчика с батареей 48В/300Ач, установлено, что оптимальная балансировка ячеек (6 циклов) устраняет разброс напряжений и увеличивает полезную ёмкость. Однако работа имеет существенные ограничения: пассивная система балансировки приводит к потере до 20% энергии на резисторах, что неприемлемо для крупных накопителей, нет данных о долгосрочной деградации ёмкости после 500+ циклов и при различных температурных режимах, проигнорированы критические риски Li-ion технологий, такие как пожарная опасность при коротких замыканиях и ускоренная деградация при глубоком разряде. Экономическая составляющая проработана слабо – отсутствует сравнение с альтернативными технологиями хранения энергии и не учтена стоимость системы контроля, которая может достигать 30% от цены накопителя. Экологические аспекты требуют доработки во всех выше представленных технологиях накопления – не рассмотрены вопросы утилизации АКБ и углеродный след от производства оборудования.

На данном этапе развития подобных технологий необходимо согласованное управление накопителями электроэнергии и турбогенераторам, с прогнозами их влияния на стабильность энергосистем. Произведенное моделирование в MATLAB трёх сценариев (переходный процесс в основной режим, трёхфазное короткое замыкание, наброс нагрузки) с применением прогностических регуляторов системы электроснабжения (сети 6 кВ) железной дороги, подключённой через вставку постоянного тока в связке с турбогенератором мощностью 3,125 МВА, солнечными панелями мощностью 1МВт и накопителем энергии [50]. В рамках моделирования получены результаты по снижению коэффициента несимметрии с 5,8% до 0,08% и сокращении времени переходного процесса с 35 секунд до 5 секунд, но эти результаты сталкиваются с рядом практических ограничений, а именно: не указан тип накопителей энергии, нет анализа экономической целесообразности, не оценен жизненный цикл, порядок обслуживания системы, не ясно сохранится ли эффективность для кластеров электроснабжения с высокой долей ВИЭ.

Симуляционная модель [51] имитирующая микросеть с узлами (трансформаторы 10/0,4 кВ, ВИЭ, свинцово-кислотные накопители, нагрузка) с реализацией балансировки нагрузки через централизованный управляющий центр (УЦ) для минимизации потребления из внешней сети при полном использовании ВИЭ обеспечивает «оптимальное» распределение энергии при условии полного использования ВИЭ для локальных нужд и демонстрирует перспективность Smart Grid для децентрализованных систем. Но в то же время применение в модели устаревшей технологической базы в виде свинцово-кислотных АКБ (низкий КПД, срок службы) и солнечных панелей мощностью 1,5 кВт нерелевантных для промышленных решений (современные СЭС >100 кВт). Модель [51] не адаптирована

для сетей с высокой долей ВИЭ, где нестабильность требует прогнозирования и управления, а также не интегрирована с рынком.

В целом общий тренд в направлении разработок накопителей энергии характеризуется ростом патентов в области накопления энергии (+171% за 2018-2022 годы) [52]. В общем интеграция ВИЭ и вспомогательных систем сопряжена с проблемами по части обеспечения надежности и устойчивости энергосистем [53-56]. Внедрение большого объема ВИЭ с силовыми преобразователями в энергосистему приводит к увеличению скорости изменения частоты, колебаниям параметров режима, а также частоты скольжения при асинхронном ходе [53]. Это подтверждается и моделированием [54] возмущения в виде небаланса активной мощности во внешней электрической сети на основе скорости изменения частоты генератора доказывают снижение совокупной инерции энергосистемы при интеграции в нее солнечной электростанции. Известны так же и ряд серьезных инцидентов [55], связанных с нарушением частоты в системах с высокой долей ВИЭ.

Существует мнение [57], что инверторные системы возобновляемой энергетики оказывают эффективное действие при концентрированном размещении электронной генерации в дефицитных районах, повышая пропускную способность сети на 2,5-8%. Моделирование оценивающие только положительную сторону их влияния на статическую аperiodическую устойчивость энергосистем при интеграции в сети переменного тока (на примере сетей 35кВ Монголии) имеет существенные ограничения: модель упрощена и не учитывает динамические процессы, гармоники и стохастичность ВИЭ. Авторы не провели анализ обратной устойчивости и влияния сетевых возмущений на инверторы. Параллельно с потребностями энергосистемы, стремительно растущий сектор электромобильности формирует дополнительный масштабный спрос на технологии аккумулирования.

Так, в 2023 году прирост регистраций электромобилей в мире составил 31% в годовом исчислении, что оказывает прямое влияние на объемы производства и развитие технологий аккумуляторных батарей. [58]. Сверх этого необходимо отметить рост спроса на гражданские средства передвижения наблюдается и рост количества большегрузов, электробусов. Это все без учета потребности в аккумуляторах у растущего год за годом рынка носимых электронных устройств. Переориентация мировой экономики на технологии накопления энергии закономерно активизировала геологоразведку и разработку месторождений стратегических металлов, прежде всего лития и кобальта. Вместе с тем, производственный цикл их извлечения из недр сопряжен с формированием устойчивой нагрузки на экосистемы, масштабы которой приобретают тревожные очертания в регионах с высокой концентрацией запасов.

Яркой иллюстрацией данной проблемы является ситуация в Южной Америке, где Республика Чили, располагая более чем третью (36%) общемировых подтвержденных ресурсов лития по состоянию на 2022 финансовый год [59], столкнулась с лавинообразным развитием горнодобывающей инфраструктуры, последствия которого становятся предметом пристального внимания экологов. Наиболее рентабельной и распространенной технологией является добыча из соляных рассолов: подземные воды откачиваются и направляются в испарительные пруды, где в условиях аридного климата происходит концентрирование за счет естественной солнечной и ветровой инсоляции. Исследования Аризонского университета документально подтвердили, что данный метод приводит к нарушению гидрологического баланса и, как следствие, истощению водоносных горизонтов, деградации растительного покрова, опустыниванию и последующему коллапсу локальных экосистем [60, с. 150]. Альтернативным способом добычи лития является его получение из горных пород. Данный способ является более трудоёмким и не получил широкого распространения, так как требует наличие буровых установок, взрывчатки, дробилок, сгустителей и печей для обжига. Но и данный процесс нельзя считать зеленым в виду его влияния на природный ландшафт. Наряду с литием для перехода на зеленую экономику у человеческой цивилизации возникает потребность в таком многофункциональном минеральном ископаемом как кобальт. Данное сырье критически важно во всех сегментах зеленых технологий: от производства накопителей энергии до электропроводящих элементов автомобилей на электрической тяге. 70% мирового производства кобальта приходится на Демократическую Республику (ДР) Конго [61].

Как современная человеческая цивилизация, так озабоченная своим влиянием на экологию добывает такой важный минерал? В исключительно благих целях зеленой экономики для добычи кобальта кустарным путем и в ужасных условиях задействованы жители ДР Конго [62]. В лучших традициях технико-экономических расчётов и целесообразности ВИЭ, заработная плата мужчин на рудниках составляет \$1, у женщин – \$0.8, да и их дети, вместо того чтобы ходить в школу и начать свой путь к работе в

передовом участнике зеленой экономики – Tesla, заняты добычей полезных ископаемых для этой корпорации [63]. Кустарность добычи полезных ископаемых в ДР Конго и Замбии оказывает негативное влияние на экосистемы этих государств. Чаще всего встречается эрозия почв и загрязнение их тяжелыми металлами (медь, кобальт, цинк, свинец). Это всё вызывает превышение предельно допустимых концентраций веществ в съедобных овощах и дикорастущих травяных растений в 10-50 раз [64, с. 27]. Резюмируя все вышеописанное, кардинальная трансформация энергетических систем создает сложные технологические, экономические и социальные вызовы, требующие комплексного подхода с участием государства, бизнеса и общества [65].

Заключение (Conclusions)

Концепция «зеленой» энергетики, представляемая как панацея, на текущем этапе сталкивается с комплексом противоречий, где декларируемые выгоды зачастую нивелируются скрытыми технологическими, экономическими и экологическими издержками:

1. Технологико-экономическая незрелость и скрытые затраты. Многие прорывные технологии (водород, CCUS, накопители) остаются на стадии разработки, отличаются высокой стоимостью и низким энергетическим возвратом на вложенную энергию (EROI). Заявления об их эффективности зачастую основаны на упрощенных моделях, игнорирующих полный жизненный цикл – от производства оборудования до утилизации. Проблема утилизации лопастей ВЭУ, солнечных панелей и аккумуляторов становится новым экологическим вызовом, подрывающим саму концепцию «чистой» энергии;

2. Угроза стабильности энергосистем. Массовое внедрение генерации на основе возобновляемых источников, не обладающей собственной инерцией, ведет к снижению общей устойчивости энергосистем. Нестабильность и стохастичность ветра и солнца создают риски для балансировки и требуют дорогостоящих решений в виде резервных мощностей и систем накопления, что увеличивает общие системные издержки;

3. Экологические и социальные издержки цепочек поставок. Парадоксальным образом, «зеленая» экономика порождает новый ресурсный голод на такие материалы, как литий и кобальт. Их добыча сопряжена с масштабным экологическим ущербом (истощение водоносных горизонтов, загрязнение почв) и неприемлемыми социальными условиями, что ставит под сомнение этичность всей цепочки создания стоимости;

4. Экономическая несостоятельность без внешней поддержки. В отсутствие значительных государственных субсидий, «зеленых» тарифов и политического лоббирования многие проекты ВИЭ в регионах со средним и низким энергопотенциалом являются нерентабельными. Это создает риски «зеленого пузыря» и перекладывает финансовое бремя трансформации на конечных потребителей и налогоплательщиков.

Кардинальная трансформация энергетического сектора не должна осуществляться исключительно под давлением политической конъюнктуры или трендов. Она требует холистического, сбалансированного и научно-обоснованного подхода, учитывающего:

- Полный жизненный цикл технологий, а не только фазу их эксплуатации;
- Системный эффект для надежности и устойчивости энергосетей;
- Реальные, а не виртуальные экологические и социальные последствия по всей цепочке создания стоимости.

Таким образом, будущее энергетики лежит не в слепом замещении одних источников другими, а в построении сложной, диверсифицированной и гибкой системы, где место «зеленых» технологий будет определяться их реальной, а не декларативной эффективностью и устойчивостью.

Литература

1. Бардин А., Сигачёв М. Зеленый дискурс как разновидность нового левого популизма // *Мировая экономика и международные отношения*. 2020. Т. 64. № 11. С. 96–105.
2. Как экологический терроризм в Европе превратился в бизнес [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3A8uJn>. Ссылка активна на 19.06.2025.
3. Кочергина И.Н., Кочергин Н.В. Перспективы использования «зелёных» технологий в металлургии // *Материалы девятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. наука и производство»*. Старый Оскол: изд-во Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова, 2023. С. 33–38.
4. Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф. Методы декарбонизации процесса получения электроэнергии в твердооксидном топливном элементе // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24. № 6. С. 72–82.

5. Диковенко А.Г. Современные направления декарбонизации нефтегазовой отрасли // *Наукофера*. 2024. № 3-1. С. 171–174.
6. Новоселова М.С., Мингалеева Г.Р., Марьин Г.Е., и др. Перспективы использования синтез-газа в газотурбинных установках // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. № 1. С. 131–143.
7. Набиуллина М.Ф., Мингалеева Г.Р., Афанасьева О.В., и др. Использование растительных отходов для обеспечения функционирования сельскохозяйственных энергокомплексов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. № 3. С. 120–131.
8. Мазанов С.В., Гумеров Ф.М., Усманов Р.А., и др. Биодизельное топливо. Часть I. Способы получения // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24. № 4. С. 16–49.
9. Макеева Е.Н., Зверева Э.Р., Морозова О.Ю. Перевод котельных на альтернативное топливо // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. № 1. С. 107–117.
10. Мельник А., Наумова И., Ермолаев К. Трансформация управления инновационным развитием для решения проблем декарбонизации и роста энергоэффективности // *Форсайт*. 2023. Т. 17. № 1. С. 51–66.
11. Плетнев М.А., Копысов А.Н. Социально-экономические проблемы развития водородной энергетики // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23. № 2. С. 36–45.
12. Януш О.Б. Политические дилеммы водородной энергетики // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23. № 2. С. 173–180.
13. Яруллин Р.С., Салихов И.З., Черезов Д.С., и др. Перспективы водородных технологий в энергетике и в химической промышленности // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23. № 2. С. 70–83.
14. Соловьева З.А. Энергопереход в Тунисе: реальность и планы // *Восточная аналитика*. 2024. Т. 15. № 1. С. 115–126.
15. Григорьян Г.В. Особенности политики энергетического перехода Индонезии: роль иностранного бизнеса в достижении целей декарбонизации // *Анализ и прогноз. журнал ИМЭМО РАН*. 2024. № 2. С. 57–71.
16. Аллакулиев М.М., Гелдиева М., Мырадова С. Экономические особенности нефтегазовых ресурсов в условиях перехода к зеленой энергетике // *Академическая публицистика*. 2024. № 2-2. С. 50–53.
17. Gas & low carbon energy [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3A8uLL>. Ссылка активна на 19.06.2025.
18. Renewables and energy solutions [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3DekpU>. Ссылка активна на 19.06.2025.
19. Floating wind [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3Dekuа>. Ссылка активна на 19.06.2025.
20. Pickl M.J. The renewable energy strategies of oil majors -- From oil to energy? // *Energy Strategy Reviews*. 2019. Vol. 26. P. 50–58.
21. Сарыев К.А. Определение ветроэнергетических ресурсов в Туркменистане // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. Т. 22. № 6. С. 143–154.
22. Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Рамазанова З.У., и др. Методики расчета выработки электрической энергии ветроэнергетическими установками и влияние на них скорости ветра // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25. № 5. С. 30–41.
23. Насырова Е.В., Тимербаев Н.Ф., Леухина О.В., и др. Анализ данных ветромониторинга в Республике Татарстан // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 6. С. 39–50.
24. Русина А.Г., Осгонбаатар Тувшин, Матренин П.В., и др. Ансамблевая модель для прогнозирования выработки ветровых электростанций // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. № 1. С. 64–76.
25. Бежан А.В., Званорева Ю.Н., Пономарев Р.А. Снижение себестоимости тепловой энергии за счет использования ветроэнергетических установок совместно с котельными на нужды теплоснабжения в удаленных районах арктической зоны Российской Федерации (на примере Мурманской области) // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25. № 3. С. 128–138.
26. Шерьязов С.К., Исенов С.С., Исаков Р.М., и др. Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23. № 5. С. 24–33.
27. Давыдов Д.Ю., Обухов С.Г. Модель оценки технико-экономических показателей оффшорных ветроэлектростанций // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23. № 5. С. 115–130.

28. Research project targets mass recycling of turbine blades [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3A8uMa>. Ссылка активна на 19.06.2025.
29. Retired Wind Turbine Blades Live on as Park Benches and Picnic Tables [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3A8uP3>. Ссылка активна на 19.06.2025.
30. Денисов И.Е. Оценка негативного воздействия при утилизации лопастей ветрогенераторов на экологию // Экология и природопользование: устойчивое развитие сельских территорий: сборник статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции. Краснодар: Издательство КубГАУ, 2023. С. 416–419.
31. Wind Energy and Wildlife: The Three C's. American Wind Energy Association [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3A8uQq>. Ссылка активна на 19.06.2025.
32. Шевцов А.С., Проворная И.В. Перспективы возобновляемой энергетики в России // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 2. № 4. С. 106–112.
33. Дениз Д.С. Институциональные производные и механизмы поддержки возобновляемой энергетики: страны группы БРИКС // Экономические Отношения. 2022. Т. 12. № 2. С. 249–264.
34. Solar Energy Outlook 2023 [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3A8uSr>. Ссылка активна на 19.06.2025.
35. Mathur D., Gregory R., Simmons T. End-of-life Management of Solar PV Panels // International Renewable Energy Agency. 2020. Vol. 1. P. 1–104.
36. Быковский А.Е. Развитие солнечной энергетики в России // Актуальные вопросы современной науки и образования сборник статей XXXV Международной научно-практической конференции. Пенза: Издательство Наука и Просвещение, 2024. С. 63–66.
37. Николаев Ю.Е., Айдаров М.А. Оценка эффективности энергокомплексов с производством водорода, кислорода, тепла и электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 2. С. 114–127.
38. Гемечу Б.Д., Шарапов В.И. Оценка энергетической эффективности гибридной гелио-геотермальной электростанции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 3–11.
39. Сулов К.В., Шушпанов И.Н., Воронцов Д.В. Использование возобновляемых источников энергии для питания собственных нужд нефтепровода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 70–79.
40. Лукутин Б.В., Аль-Мажди Каррар Хамид. Оптимизация энергетических балансов фотоэлектрической станции с электрохимическим и тепловым аккумулярованием солнечной энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 2. С. 3–13.
41. Зацаринная Ю.Н., Реутин Г.В., Курилов С.С., и др. Прогнозирование выработки электроэнергии от ВИЭ методами машинного обучения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 3. С. 81–92.
42. Building resilient solar projects: Tips and best practices [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3Meh5D>. Ссылка активна на 19.06.2025.
43. Solar Panels Are Starting to Die, Leaving Behind Toxic Trash [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3A8uVB>. Ссылка активна на 19.06.2025.
44. Соловова Ю.В. Энергетика и социальная эффективность в контексте функционирования современной экономики // Дискуссия. 2022. № 3. С. 48–56.
45. Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Стриелковски В. Инновации в области хранения энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 33–40.
46. Смоленцев Н.И., Кондрин Н.А. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии для локальных электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 3-4. С. 53–60.
47. Четошников Л.М., Смоленцев Н.И., Четошников С.А., и др. Автономные системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии и умной сетью // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 5-6. С. 3–10.
48. Бахтеев К.Р. Создание гибридного накопителя электроэнергии большой мощности для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения промышленных потребителей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 20. № 3-4. С. 36–44.
49. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 9-10. С. 140–145.
50. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Сулов К.В., и др. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 6. С. 3–13.

51. Четошников Л.М., Смоленцев Н.И., Томских Н.В., и др. Управление потоками мощности в локальных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 5. С. 74–82.
52. Сафин А.Р., Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., и др. Анализ технического уровня разработок в области мобильных зарядных установок для электротранспорта // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 25. № 3. С. 55–64.
53. Рубан Н.Ю., Аскарлов А.Б., Андреев М.В., и др. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах // Вестник Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 36. С. 7–30.
54. Пасека В.А. Инерционный отклик солнечных электростанций при небалансах активной мощности во внешней электрической сети // Аспирант. 2021. № 6(63). С. 124–127.
55. Chen X., Jiang Y., Terzija V., et al. Review on measurement-based frequency dynamics monitoring and analyzing in renewable energy dominated power systems // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2024. Vol. 155. P. 1–16.
56. Tingyi H., Shengnan L., Shuijun W., et al. Small-Signal Stability Analysis for Power System Frequency Regulation with Renewable Energy Participation // Hindawi. Mathematical Problems in Engineering. 2021. Vol. 2021. P. 1–13.
57. Фишов А.Г., Мурашкина И.С., Марченко А.И., и др. Исследование влияния электронной генерации на статическую апериодическую устойчивость электроэнергетической системы // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 51–64.
58. Global electric car sales rose 31% in 2023 - Rho Motion [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3A8uY4>. Ссылка активна на 19.06.2025.
59. Chile, salt lakes and Lithium: Current status of Production [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3A8uaV>. Ссылка активна на 19.06.2025.
60. Wenjuan Liua, Datu B. Agusdinataa, Soe W. Myintb. Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. Vol. 80. P. 145–156.
61. Chinese and other cobalt mines boosting output despite price slide [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3DemKu>. Ссылка активна на 19.06.2025.
62. Congo Cobalt Miners' Slave for Capitalists, including Chinese [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3DemWz>. Ссылка активна на 19.06.2025.
63. Battery Push By Tesla And Other EV Makers Raises Child Labor Concerns [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://clck.ru/3DemgD>. Ссылка активна на 19.06.2025.
64. Сепеги Б., Чанда М., Чанда М. Загрязнение тяжелыми металлами почв техногенных территорий Республики Замбия // Сборник материалов научно-практической конференции с международным участием. Курск: Издательство КГУ, 2018. С. 25–29.
65. Оразов К., Оразов Т., Оразов М. Анализ и перспективы развития возобновляемых источников энергии // Наукосфера. 2024. № 2-1. С. 127–130.

Авторы публикации

Давыдов Дмитрий Александрович – аспирант кафедры теоретической и общей электротехники Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0004-2042-481X>. 7shaq7@gmail.ru.

Никитин Константин Иванович – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой теоретической и общей электротехники Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0003-4669-3973>. n-c-i@mail.ru.

Загоруйко Антон Андреевич – аспирант Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Россия. solidarnisonf@mail.ru.

Татевосян Андрей Александрович – д-р техн. наук, доцент, декан Энергетического Института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-0891-9244>. karo1@mail.ru.

References

1. Bardin A., Sigachev M. The green discourse as a type of new left populism Populism // World Economy and International Relations. 2020; 64(11): 96-105. (In Russ. DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-11-96-105.
2. How Environmental Terrorism in Europe Turned into Business. Available at: <https://clck.ru/3A8uJn>. Accessed: 19 Jun 2025. (In Russ).
3. Kochergina IN, Kochergin NV. Perspektivy ispol'zovaniya «zelenyh» tekhnologij v metallurgii [Prospects for the use of «green» technologies in metallurgy]. In: Materialy devyatnadcatoj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. nauka i proizvodstvo». Staryj Oskol: Izd-vo Staroskol'skogo tekhnologicheskogo instituta im. A.A. Ugrova; 2023. Pp.33-38. (In Russ). DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-72-82.
4. Filimonova A.A., Vlasova A.Yu., Kamaliev R.F. Generating electricity in a solid oxide fuel cell decarbonization methods. Power engineering: research, equipment, technology. 2022; 24(6): 72-82. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-72-82
5. Dikovenko A.G. Current areas in decarbonization of the oil and gas industry. Naukosfera. 2024; (3-1): 171-174. (In Russ). DOI: 10.5281/zenodo.10829617.
6. Novoselova M.S. Prospects for the Use of Syngas in Gas Turbine Installations / Novoselova M.S., Mingaleeva G.R., Mar'in G.E., Titov A.V. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2024 — Vol. 26, No. 1. — Pp. 131-143. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-1-131-143.
7. Nabiullina M.F. The Use of Plant Waste to Ensure the Functioning of Agricultural Energy Complexes / Nabiullina M.F., Mingaleeva G.R., Afanasyeva O.V., Timofeeva S.S. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2024 — Vol. 26, No. 3. — Pp. 120-131. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-120-131.
8. Mazanov S.V. Biodiesel Fuel. Part I. Methods of Production / Mazanov S.V., Gumerov F.M., Usmanov R.A., Gabitova A.R., Zaripov Z.I., Varfolomeev S.D., Vo'lyeva V.B., Shapovalov Yu.A. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2022 — Vol. 24, No. 4. — Pp. 16-49. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-4-16-49.
9. Makeeva E.N. Conversion of Boiler Houses to Alternative Fuel / Makeeva E.N., Zvereva E.R., Morozova O.Yu. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2024 — Vol. 26, No. 1. — Pp. 107-117. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-1-107-117.
10. Melnik A. Transformation of Innovation Development Management to Address Decarbonization Challenges and Energy Efficiency Growth / Melnik A., Naumova I., Ermolaev K. // Foresight, 2023 — Vol. 17, No. 1. — Pp. 51-66. DOI: 10.17323/2500-2597.2023.1.51.66.
11. Pletnev M.A. Socio-Economic Problems of Hydrogen Energy Development / Pletnev M.A., Kopysov A.N. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2021 — Vol. 23, No. 2. — Pp. 36-45. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-2-36-45.
12. Yanush O.B. Political Dilemmas of Hydrogen Energy / Yanush O.B. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2021 — Vol. 23, No. 2. — Pp. 173-180.
13. Yarullin R.S. Prospects of Hydrogen Technologies in Power and Chemical Industries / Yarullin R.S., Salikhov I.Z., Cherezov D.S., Nurislamova A.R. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2021 — Vol. 23, No. 2. — Pp. 70-83. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-2-70-83.
14. Solovieva Z.A. Energy Transition in Tunisia: Reality and Plans / Solovieva Z.A. // Eastern Analytics, 2024 — Vol. 15, No. 1. — Pp. 115-126. DOI: 10.31696/2227-5568-2024-01-115-126.
15. Grigoryan G.V. Features of Indonesia's Energy Transition Policy: The Role of Foreign Business in Achieving Decarbonization Goals / Grigoryan G.V. // Analysis and Forecast. IMEMO RAS Journal, 2024 — No. 2. — Pp. 57-71. DOI: 10.20542/afj-2024-2-57-71.
16. Allakuliev M.M. Economic Features of Oil and Gas Resources in the Context of Transition to Green Energy / Allakuliev M.M., Geldieva M., Myradova S. // Academic Publicism, 2024 — No. 2-2. — Pp. 50-53.
17. Gas & Low Carbon Energy [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3A8uLL> (accessed on 19.06.2025).
18. Renewables and energy solutions [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3DekpU> (accessed on 19.06.2025).
19. Floating wind [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3Dekya> (accessed on 19.06.2025).
20. Matthias J. Pickl The renewable energy strategies of oil majors – From oil to energy? / Matthias J. Pickl // 2019 Energy Strategy Reviews, 2019 — Vol. 26. — P.50-58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100370>.
21. Saryev K.A. Determination of Wind Energy Resources in Turkmenistan / Saryev K.A. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2020 — Vol. 24, No. 6. — Pp. 143-154. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-143-154.

22. Bekirov E.A. Methods for Calculating Electric Energy Generation by Wind Turbines and the Influence of Wind Speed on Them / Bekirov E.A., Voskresenskaya S.N., Ramazanova Z.U., Bekirov O.S. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2023 — Vol. 25, No. 5. — Pp. 30-41. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-30-41.
23. Nasyrova E.V. Analysis of Wind Monitoring Data in the Republic of Tatarstan / Nasyrova E.V., Timerbayev N.F., Leukhina O.V., Mazarov I.Yu. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2019 — Vol. 21, No. 6. — Pp. 39-50. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-6-39-50.
24. Rusina A.G. Ensemble Model for Wind Power Plant Generation Forecasting / Rusina A.G., Tuvshin Osgonbaatar, Matrenin P.V., Sergeev N.N. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2024 — Vol. 26, No. 1. — Pp. 64-76. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-1-64-76.
25. Bezhan A.V. Reducing the Cost of Thermal Energy through the Use of Wind Turbines in Conjunction with Boiler Houses for Heat Supply in Remote Areas of the Arctic Zone of the Russian Federation (Case Study of the Murmansk Region) / Bezhan A.V., Zvanoreva Yu.N., Ponomarev R.A. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2023 — Vol. 25, No. 3. — Pp. 128-138. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-3-128-138.
26. Sheryazov S.K. Main Types of Wind Turbine Generators in Power Supply Systems / Sheryazov S.K., Isenov S.S., Iskakov R.M., Kaidar A.B. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2021 — Vol. 23, No. 5. — Pp. 24-33. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-5-24-33.
27. Davydov D.Yu. Model for Assessing Technical and Economic Indicators of Offshore Wind Power Plants / Davydov D.Yu., Obukhov S.G. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2021 — Vol. 23, No. 5. — Pp. 115-130. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-5-115-130.
28. Research project targets mass recycling of turbine blades [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3A8uMa> (accessed on 19.06.2025).
29. Retired Wind Turbine Blades Live on as Park Benches and Picnic Tables [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3A8uP3> (accessed on 19.06.2025).
30. Denisov I.E. Assessment of Negative Environmental Impact of Wind Turbine Blade Disposal / Denisov I.E. // Ecology and Environmental Management: Sustainable Development of Rural Territories: Collection of Articles Based on the Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference (2023, Krasnodar, Russia) — KubSAU Publishing House, 2023 — Pp. 416-419.
31. Wind Energy and Wildlife: The Three C's. American Wind Energy Association [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3A8uQq> (accessed on 19.06.2025).
32. Shevtsov A.S. Prospects of Renewable Energy in Russia / Shevtsov A.S., Provornaya I.V. // Interexpo Geo-Siberia, 2022 — Vol. 2, No. 4. — Pp. 106-112.
33. Deniz D.S. Institutional Derivatives and Mechanisms of Support for Renewable Energy: BRICS Countries / Deniz D.S. // Economic Relations, 2022 — Vol. 12, No. 2. — Pp. 249-264. DOI: 10.18334/eo.12.2.114734
34. Solar Energy Outlook 2023 [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3A8uSr> (accessed on 19.06.2025).
35. Mathur D. End-of-life Management of Solar PV Panels / Mathur D., Gregory R., Simmons T., // 2020 International Renewable Energy Agency, 2020 — Vol. 1. — P.1-104.
36. Bykovskiy A.E. Development of Solar Energy in Russia / Bykovskiy A.E. // Topical Issues of Modern Science and Education: Collection of Articles of the XXXV International Scientific and Practical Conference (2024, Penza, Russia) — Science and Enlightenment Publishing House, 2024 — Pp. 63-66.
37. Nikolaev Y.E. Evaluation of the Efficiency of Energy Complexes with Hydrogen, Oxygen, Heat and Electricity Production / Nikolaev Y.E., Aidarov M.A. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2024 — Vol. 26, No. 2. — Pp. 114-127. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-2-114-127.
38. Ghemechu B.D. Assessment of Energy Efficiency of a Hybrid Solar-Geothermal Power Plant / Ghemechu B.D., Sharapov V.I. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2019 — Vol. 21, No. 4. — Pp. 3-11. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-3-11.
39. Suslov K.V. Use of Renewable Energy Sources for Powering Oil Pipeline's Internal Needs / Suslov K.V., Shushpanov I.N., Vorontsov D.V. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2018 — Vol. 20, No. 1-2. — Pp. 3-11. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-1-2 -70-79.
40. Лукутин Б.В. Оптимизация энергетических балансов фотоэлектрической станции с электрохимическим и тепловым аккумулярованием солнечной энергии / Лукутин Б.В., Аль-Мажди Каррар Хамид // 2022. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2022 — т.24, №2. — С.3-13. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13.
41. Zatsarinnyaya Yu.N. Forecasting of Electric Energy Generation from Renewable Energy Sources Using Machine Learning Methods / Zatsarinnyaya Yu.N., Reutin G.V., Kurilov S.S., Isaeva O.V., Kovalev

G.S. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2023 — Vol. 25, No. 3. — Pp. 81-92. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-3-81-92.

42. Building resilient solar projects: Tips and best practices [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3Mex5D> (accessed on 19.06.2025).

43. Solar Panels Are Starting to Die, Leaving Behind Toxic Trash [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3A8uVB> (accessed on 19.06.2025).

44. Solovova Yu.V. Energy and Social Efficiency in the Context of Modern Economy Functioning / Solovova Yu.V. // Discussion, 2022 — No. 3. — Pp. 48-56. DOI: 10.46320/2077-7639-2022-3-112-48-56.

45. Mukhametova L.R. Innovations in Energy Storage / Mukhametova L.R., Akhmetova I.G., Strielkowski W. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2019 — Vol. 21, No. 4. — Pp. 33-40. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40.

46. Smolentsev N.I. Superconducting Electrokinetic Energy Storage for Local Electrical Networks / Smolentsev N.I., Kondrin N.A. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2017 — Vol. 19, No. 3-4. — Pp. 53-60.

47. Chetoshnikova L.M. Autonomous Power Supply Systems with Renewable Energy Sources and Smart Grid / Chetoshnikova L.M., Smolentsev N.I., Chetoshnikov S.A., Gusarov G.V. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2018 — Vol. 20, No. 5-6. — Pp. 3-10. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-3-10.

48. Bakhteev K.R. Development of a High-Power Hybrid Energy Storage System to Prevent Short-Term Power Supply Failures for Industrial Consumers / Bakhteev K.R. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2017 — Vol. 20, No. 3-4. — Pp. 36-44.

49. Serdechny D.V. Features of Operation of an Energy Storage System Based on a Multi-Cell Lithium-Ion Battery / Serdechny D.V., Tomashevsky Yu.B. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2017 — Vol. 19, No. 9-10. — Pp. 140-145.

50. Bulatov Yu.N. Coordinated Management of Electricity Storages and Distributed Generation Plant with Predictive Controllers in a Power Supply System with Reduced Electricity Quality / Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V., Kizhin V.V. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2023 — Vol. 25, No. 6. — Pp. 3-13. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13.

51. Chetoshnikova L.M. Power Flow Control in Local Networks / Chetoshnikova L.M., Smolentsev N.I., Tomskikh N.V., Gimgina D.A. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2023 — Vol. 25, No. 5. — Pp. 74-82. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-74-82.

52. Safin A.R. Analysis of the Technical Level of Developments in the Field of Mobile Charging Installations for Electric Transport / Safin A.R., Basenko V.R., Nizamiev M.F., Tsvetkov A.N., Petrov T.I. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2022 — Vol. 25, No. 3. — Pp. 55-64. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64.

53. Ruban N.Yu. Analysis of the Impact of Renewable Energy Sources with Power Converters on Processes in Modern Power Systems / Ruban N.Yu., Askarov A.B., Andreev M.V., Kiyevets A.V., Rudnik V.E. // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technologies, Control Systems, 2020 — No. 36. — Pp. 7-30. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.01.

54. Paseka V.A. Inertial Response of Solar Power Plants under Active Power Imbalances in the External Electrical Network / Paseka V.A. // Postgraduate, 2021 — No. 6(63). — Pp. 124-127. DOI: 10.46320/2077-7639-2022-3-112-48-56.

55. Chen X. Review on measurement-based frequency dynamics monitoring and analyzing in renewable energy dominated power systems / Chen X., Jiang Y., Terzija V., Chao L. // 2024 International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2024 — Vol. 155. — P.1-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109520>.

56. Tingyi H. Small-Signal Stability Analysis for Power System Frequency Regulation with Renewable Energy Participation / Tingyi H., Shengnan L., Shuijun W., Ke L. // 2021 Hindawi. Mathematical Problems in Engineering, 2021 — Vol. 2021. — P.1-13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/5556062>.

57. Fishov A.G. Research on the Influence of Electronic Generation on Static Aperiodic Stability of the Electric Power System / Fishov A.G., Murashkina I.S., Marchenko A.I., Enkhsaihan E., Ivkin E.S. // News of Higher Educational Institutions. Power Engineering Problems, 2020 — Vol. 22, No. 2. — Pp. 51-64. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-51-64.

58. Global electric car sales rose 31% in 2023 - Rho Motion [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3A8uY4> (accessed on 19.06.2025).

59. Chile, salt lakes and Lithium: Current status of Production [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3A8uaV> (accessed on 19.06.2025).

60. Wenjuan Liua Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile. / Wenjuan Liua, Datu B. Agusdinataa, Soe W. Myintb. // 2019 International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019 — Vol. 80. — P.145-156.

61. Chinese and other cobalt mines boosting output despite price slide [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3DemKu> (accessed on 19.06.2025).

62. Congo Cobalt Miners' Slave for Capitalists, including Chinese [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3DemWz> (accessed on 19.06.2025).

63. Battery Push By Tesla And Other EV Makers Raises Child Labor Concerns [Electronic resource]: URL: <https://clck.ru/3DemgD> (accessed on 19.06.2025).

64. Sepeti B. Heavy Metal Pollution of Soils in Anthropogenically Altered Territories of the Republic of Zambia / Sepeti B., Chanda M., Chanda M. // 2018 Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation (2018, Kursk, Russia) — KSU Publishing House, 2018 — Pp. 25-29.

65. Orazov K. Analysis and Development Prospects of Renewable Energy Sources / Orazov K., Orazov T., Orazov M. // Naukosfera, 2024 — No. 2-1. — Pp. 127-130.

Authors of the publication

Dmitrii A. Davydov – Omsk State Technical University, Omsk, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0004-2042-481X>. 7shaq7@gmail.ru.

Konstantin I. Nikitin – Omsk State Technical University, Omsk, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0003-4669-3973>. n-c-i@mail.ru.

Anton A. Zagoruyko – Omsk State Transport University, Omsk, Russia. solidarnisonf@mail.ru

Andrey A. Tatevosyan – Omsk State Technical University, Omsk, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-0891-9244>. karoI@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **13.11.2025 г.**

Отредактировано **27.11.2025 г.**

Принято **17.01.2026 г.**



МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА КОНТАКТОВ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Петров А.Р., Грачева Е.И.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

petrova113@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В работе представлен алгоритм оценки температуры контактов аппаратов низкого напряжения на основе регрессионного анализа. *ЦЕЛЬ.* Разработка регрессионных моделей для определения температуры контактов автоматических выключателей, контакторов и магнитных пускателей. *МЕТОДЫ.* Проверка полученных моделей была проведена критерием Кохрена и Фишера, а также была оценена значимость каждого из коэффициентов критерием Стьюдента. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Были построены графические зависимости для определения температуры нагрева контактов аппаратов для ряда значений номинальных токов при температуре окружающей среды 40°C. Также построены графики для исследуемых аппаратов при изменении температуры окружающей среды от 5°C до 40°C. Построенные графики позволяют определить значение температуры нагрева без проведения предварительных расчетов для автоматических выключателей на номинальные токи 40А, 63А, 100А, 160А, 250А и для контакторов и магнитных пускателей на номинальные токи 40А, 63А, 100А, 250А, 400А. Полученные значения температуры нагрева контактов были сопоставлены с ГОСТ 403-73. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Модели для определения температуры нагрева контактов позволяют учитывать техническое состояние аппарата и легко могут быть изменены при изменении условий и режимов эксплуатации.

Ключевые слова: *низковольтная сеть; коммутационный аппарат; контактное соединение; нагрев контактов; регрессионный анализ.*

Для цитирования: Петров А.Р., Грачева Е.И. Моделирование температуры нагрева контактов низковольтных коммутационных аппаратов с учетом режимов эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 42-53. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-42-53.

MODELING OF CONTACT HEATING TEMPERATURE OF LOW-VOLTAGE SWITCHING DEVICES WITH REGARD TO OPERATING MODES

Petrov A.R., Gracheva E.I.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

petrova113@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The paper presents an algorithm for measuring the temperature of minimum voltage devices based on regression analysis. *THE PURPOSE.* Development of regression models for determining the contact temperature of circuit breakers, contactors and magnetic starters. *METHODS.* The obtained models were validated by Cochran and Fisher's criterion and the significance of each of the coefficients was assessed by Student's criterion. *RESULTS.* Graphical dependences for determining the contact heating temperature of the apparatuses for a number of values of rated currents at an ambient temperature of 40°C were plotted. The graphs were also constructed for the investigated devices when the ambient temperature changes from 5°C to 40°C. The constructed graphs allow to determine the value of heating temperature without preliminary calculations for circuit breakers for rated currents 40A, 63A, 100A, 160A, 250A and for contactors and magnetic starters for rated currents 40A, 63A, 100A, 250A, 400A. The obtained values of contact heating temperature were compared with GOST 403-73. *CONCLUSIONS.* Models for determining the contact heating temperature allow the

technical condition of the apparatus to be taken into account and can easily be modified when conditions and operating modes change.

Keywords: *low-voltage network; switching device; contact connection; contact heating; regression analysis.*

For citation: Petrov A.R., Gracheva E.I. Modeling of contact heating temperature of low-voltage switching devices with regard to operating modes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 42-53. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-42-53.

Введение (Introduction)

В составе систем промышленного электроснабжения низковольтные сети, как правило, имеют наибольшую протяженность, при этом на кабельных линиях и проводах устанавливаются низковольтные коммутационные аппараты (НКА) различных типов и назначения [1]. Как показали проведенные исследования, НКА имеют различные технические и эксплуатационные характеристики [2]. Вследствие значительной разветвленности и протяженности цеховые низковольтные сети характеризуются достаточно высоким уровнем потерь электроэнергии (ЭЭ). Поэтому при наблюдающемся в настоящее время повышении стоимости ЭЭ актуальной задачей является достоверное определение потерь в низковольтных цеховых сетях и, следовательно, учет потерь ЭЭ в НКА [3].

Как известно, надежность работы НКА является одним из необходимых условий для эффективной эксплуатации оборудования цеховых сетей [4, 5]. Повышение качества функционирования НКА в связи с усложнением конструкции аппаратов является актуальной задачей эксплуатационных служб промышленных предприятий [6, 7]. В настоящее время часто отсутствуют полные и точные статистические сведения о причинах и частоте выхода из строя НКА при различных условиях эксплуатации [8]. Поэтому необходим системный сбор сведений о выходе из строя оборудования, а также уточнению методов обработки и использования этих данных [9, 10].

Как известно, потери мощности в НКА определяются величиной протекающего тока по контактам [11, 12]. При этом превышение допустимой температуры нагрева контактов и контактных соединений НКА является одной из основных причин возникновения их отказа [13-15]. Допустимое значение температуры нагрева контактов определяется материалом их изготовления. Согласно ГОСТ 403-73 «Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов» для контактов, расположенных внутри аппаратов и выполненных из меди с защитным покрытием от коррозии, допустимое значение превышения температуры составляет 65°C. Если защитное покрытие от коррозии отсутствует, то значение превышения температуры составит 55°C.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для точного определения активных потерь мощности в НКА целесообразно применение специальных моделей, параметры которых легко определить для каждого конкретного случая. Параметры таких моделей вычисляются на основе вероятностно-статистического подхода и учитывают физические характеристики контактной системы исследуемых аппаратов. При определении температуры нагрева можно получить упрощенные выражения, обеспечивающие необходимую достоверность и позволяющие сократить объем требуемой информации.

В этой ситуации воспользуемся методами регрессионного анализа и теории планирования эксперимента, на основе которых можно получить вероятностно-статистические модели, реализующие зависимость температуры нагрева контактов аппаратов от обобщенных параметров.

Для решения поставленной задачи в качестве основных независимых факторов, влияющих на нагрев контактов НКА, приняты следующие параметры:

x_1 – номинальный ток аппарата, $I_{ном}$, А;

x_2 – коэффициент загрузки аппарата, k_3 ;

x_3 – температура окружающей среды, t_{oc} , °С.

Первоначальные границы изменения независимых факторов исследуемых аппаратов представлены в таблице 1.

Границы изменения факторов
Limits of change of factors

Фактор	$X_{i \min}$	$X_{i \text{cp}}$	$X_{i \max}$	ΔX_i
Автоматические выключатели, контакторы и магнитные пускатели				
$x_1 \rightarrow I_{\text{НОМ}}, \text{ A}$	5	202,5	400	197,5
$x_2 \rightarrow K_3$	0,1	0,8	1,5	0,7
$x_3 \rightarrow t_{\text{OC}}, \text{ }^\circ\text{C}$	5	22,5	40	17,5

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

где:

$$X_{i \text{cp}} = \frac{X_{i \min} + X_{i \max}}{2} \quad (1)$$

$$\Delta X_i = \frac{X_{i \max} - X_{i \min}}{2} \quad (2)$$

Температура нагрева контактов НКА определяется:

$$t = \frac{(I_{\text{НОМ}} \cdot K_3)^2 \cdot \rho + t_{\text{OC}} \cdot F \cdot k_T \cdot S}{F \cdot k_T \cdot S - (I_{\text{НОМ}} \cdot K_3)^2 \cdot \rho \cdot \alpha} \quad (3)$$

где: ρ – удельное электрическое сопротивление материала контактов, Ом·м; F – охлаждающая поверхность проводника, м²; k_T – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); S – площадь поперечного сечения контактов, м²; α – температурный коэффициент сопротивления.

Для многофакторной регрессионной модели рассматривается следующая форма связи результативного показателя температуры нагрева контактов от основных влияющих факторов:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (4)$$

Для разработки регрессионной модели зависимости температуры нагрева контактов от основных влияющих факторов используем полный факторный эксперимент (ПФЭ) вида 2³. Значения функции цели – температуры нагрева контактов – при различных диапазонах варьирования факторов вычисляем, используя выражение (3). В уравнении (4) коэффициенты $b_0 \dots b_{123}$ – коэффициенты уравнения регрессии, вычисляемые по методу наименьших квадратов.

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{iu}}{N}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{iu} \cdot x_{ju}}{N} \quad (5)$$

где: i, j – номера факторов; x_i, x_j – кодированные значения факторов (+1 или -1); y_u – значение функции цели – выходной величины (температура нагрева контактов); u – номер опыта; N – число опытов (в данном случае $N=8$).

Получив значения коэффициентов уравнения регрессии для кодированных факторов необходимо перейти к записи полиномов в натуральных величинах. Для такого преобразования используем выражение:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} \quad (6)$$

где:

 \tilde{x}_i – кодированное значение фактора; x_i – действительное значение фактора; x_{i0} – значение нулевого уровня фактора.Для оценки точности эксперимента для каждой i -ой точки факторного пространства проводят K опытов. В результате получают значения $y_{i1} \dots y_{iK}$ исследуемого параметра, для которых находят среднее значение:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^K y_i}{K} \quad (7)$$

В ходе эксперимента проведены 3 опыта, при этом рассчитана температура нагрева контактов y_1, y_2, y_3 при изменении значений факторов в пределах их варьирования. Данные для расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Пределы варьирования факторов для 3-х опытов
Limits of variation of factors for 3 experiments

Опыт К	Предел	Фактор		
		$x_1 \rightarrow I_{ном}, A$	$x_2 \rightarrow K_3$	$x_3 \rightarrow t_{ос}, ^\circ C$
Автоматические выключатели, контакторы и магнитные пускатели				
1	min	6	0,15	6
	max	400	1,45	41
2	min	8	0,15	3
	max	400	1,55	38
3	min	10	0,2	2
	max	400	1,45	37

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

Обсуждение результатов (Discussion of results)

Матрица планирования эксперимента для расчета параметров уравнения регрессии для автоматических выключателей представлена в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Матрица планирования эксперимента для определения зависимости функции цели (температуры нагрева контактов) автоматических выключателей ПФЭ типа 2³

Experiment planning matrix for determining the dependence of the target function (contact heating temperature) of FFE type 2³ circuit breakers

u	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁₂	x ₁₃	x ₂₃	x ₁₂₃	y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}	S _{y_i} ²	\hat{y}	S _{y_i} ²
1	+	-	-	-	+	+	+	-	6,01	3,02	2,05	3,69	4,26	2,45	1,54
2	+	+	-	-	-	-	+	+	6,52	3,52	2,92	4,32	3,73	3,12	1,44
3	+	-	+	-	-	+	-	+	6,94	4,90	4,59	5,48	1,63	4,37	1,23
4	+	+	+	-	+	-	-	-	67,49	75,02	62,46	68,32	40,02	71,9	12,8
5	+	-	-	+	+	-	-	+	41,01	38,02	37,06	38,70	4,25	39,9	1,45
6	+	+	-	+	-	+	-	-	41,60	38,59	38,06	39,42	3,65	40,6	1,4
7	+	-	+	+	-	-	-	-	42,08	40,18	39,98	40,75	1,34	41,86	1,24
8	+	+	+	+	+	+	+	+	111,5	120,7	106,5	112,9	52,2	109,3	12,6

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

Продолжение таблицы 3
Continuation of table 3

u	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃
1	3,69	-3,69	-3,69	-3,69	3,69	3,69	3,69	-3,69
2	4,32	4,32	-4,32	-4,32	-4,32	-4,32	4,32	4,32
3	5,48	-5,48	5,48	-5,48	-5,48	5,48	-5,48	5,48
4	68,32	68,32	68,32	-68,32	68,32	-68,32	-68,32	-68,32
5	38,70	-38,70	-38,70	38,70	38,70	-38,70	-38,70	38,70
6	39,42	39,42	-39,42	39,42	-39,42	39,42	-39,42	-39,42
7	40,75	-40,75	40,75	40,75	-40,75	-40,75	40,75	-40,75
8	112,90	112,90	112,90	112,90	112,90	112,90	112,90	112,90
\bar{b}_{ij}	39,20	17,04	17,67	18,74	16,71	1,18	1,22	1,15
t _p	51,52	22,40	23,22	24,64	21,96	1,55	1,6	1,51

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

Значение y₁ при u=1, K=1 определим по (3):

$$y_1 = \frac{(6 \cdot 0,15)^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} + 6 \cdot (2 \cdot (2,8 + 2,8) \cdot 10^{-3}) \cdot 16 \cdot (2,8 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6})}{(2 \cdot (2,8 + 2,8) \cdot 10^{-3}) \cdot 16 \cdot (2,8 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6}) - (6 \cdot 0,15)^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 6,01$$

Остальные значения y определяем аналогично, подставляя в выражение (3) необходимые значения факторов.

Определим среднее значение \bar{y} для трех опытов:

$$\bar{y}_{(u=1)} = \frac{6,01 + 3,02 + 2,05}{3} = 3,69 \quad ; \dots \quad \bar{y}_{(u=8)} = 112,9$$

Определяем коэффициенты регрессии для трех опытов по (5):

$$\bar{b}_0 = \frac{(+1) \cdot 3,69 + \dots (+1) \cdot 112,9}{8} = 39,2; \quad \bar{b}_1 = 17,04 \quad \dots \quad \bar{b}_{123} = 1,15$$

Коэффициенты регрессии приведены в таблице 3. После вычисления значений коэффициентов b полином (4) зависимости температуры нагрева контактов автоматических выключателей «у» примет следующий вид:

$$y = 39,2 + 17,04x_1 + 17,67x_2 + 18,74x_3 + 16,71x_1x_2 + 1,18x_1x_3 + 1,22x_2x_3 + 1,15x_1x_2x_3 \quad (8)$$

Гипотезу однородности (равенства) дисперсий проверяют с помощью критерия Кохрена. Расчетное значение параметра данного критерия определяют по выражению:

$$G_p = \frac{S_{\bar{y}_i \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_{\bar{y}_i}^2} \quad (9)$$

где: $S_{\bar{y}_i \max}^2$ – наибольшее значение $S_{\bar{y}_i}^2$ из совокупности значений каждой строчки;

$\sum_{i=1}^N S_{\bar{y}_i}^2$ – сумма построчных дисперсий.

Построчная дисперсия определяется:

$$S_{\bar{y}_i}^2 = \frac{\sum_{i=1}^K (y_i - \bar{y})^2}{K - 1} \quad (10)$$

Расчетное значение параметра критерия Кохрена:

$$G_p = \frac{52,23}{(4,26 + \dots + 52,23)} = 0,47$$

Полученное значение сравнивается с критическим значением $G_{кр}$. Значение $G_{кр}$ находят из таблицы распределения Кохрена по числу степеней свободы числителя $f_1=K-1$, знаменателя $f_2=N$ и уровню значимости q . Если $G_p < G_{кр}$, то гипотеза об однородности дисперсий принимается, в противном случае – отвергается, и тогда эксперимент необходимо повторить, изменив условия его проведения.

Для определения табличного значения параметра критерия Кохрена при 95%-ной доверительной вероятности, предварительно находим число степеней свободы $f_1=K-1=3-1=2$, а $f_2=N=8$.

$$G_p < G_{кр} \\ 0,47 < 0,52$$

Опыт воспроизводим, так как требование выполняется.

Гипотезу о статистической значимости коэффициентов регрессии проверяют по критерию Стьюдента. Расчетное значение параметра критерия t_p определяется по выражению:

$$t_p = \frac{|b_i|}{S_b} \quad (11)$$

Расчетное значение t_p приведено в таблице 3. Значение дисперсии определения коэффициентов регрессии:

$$S_b^2 = \frac{S^2}{N \cdot K} \quad (12)$$

где S^2 – оценка генеральной дисперсии воспроизводимости эксперимента, которая определяется:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{\bar{y}_i}^2}{N} \quad (13)$$

$$S^2 = \frac{4,26 + \dots + 52,23}{8} = \frac{111,13}{8} = 13,89$$

$$S_b^2 = \frac{13,89}{8 \cdot 3} = 0,58; \quad S_b = \sqrt{0,58} = 0,76$$

Критическое значение параметра критерия $t_{кр}$ определяют по таблице распределения Стьюдента по числу степеней свободы $f = N \cdot (K-1) = 8 \cdot (3-1) = 16$, уровень значимости принимается равным 5%. Тогда значение $t_{кр} = 2,12$, по выражению $S_b \cdot t_{кр} = 0,76 \cdot 2,12 = 1,61$. Таким образом, значимыми являются те коэффициенты регрессии, которые по абсолютной

величине больше данного значения, коэффициенты, значение которых меньше полученной величины, отбрасываются – это коэффициенты b_{13}, b_{23}, b_{123} .

Окончательный вид уравнения регрессии принимает вид:

$$y = 39,2 + 17,04x_1 + 17,67x_2 + 18,74x_3 + 16,71x_1x_2 \quad (14)$$

Ниже приведены значения кодированных факторов:

$$x_1 = \frac{I_{НОМ} - 202,5}{197,5} = \frac{I_{НОМ}}{197,5} - 1,025 ;$$

$$x_2 = \frac{k_3 - 0,8}{0,7} = \frac{k_3}{0,7} - 1,143 ;$$

$$x_3 = \frac{t_{ОС} - 22,5}{17,5} = \frac{t_{ОС}}{17,5} - 1,286$$

В натуральном масштабе:

$$t_{ав} = -3,01 - 0,011 \cdot I_{НОМ} + 0,85 \cdot k_3 + 1,07 \cdot t_{ОС} + 0,12 \cdot I_{НОМ} \cdot k_3 \quad (15)$$

Для оценки точности регрессионной модели определим погрешности при изменении факторов x_1, x_2, x_3 (табл. 4).

Таблица 4
Table 4

Результаты вычислений погрешности для автоматических выключателей
Results of error calculations for circuit breakers

№	x_0	x_1	x_2	x_3	y по (3)	\hat{y} по (14)	$ y-\hat{y} $	$\delta, \%$
1	+	0	0,5	0	51,4	47,8	3,6	7,6
2	+	-0,5	0	1,5	58,9	58,7	0,2	0,4
3	+	-0,1	-1	0,8	36,7	36,3	0,4	1,1
4	+	-1	0	1	40,2	40,9	0,7	1,6
5	+	0,5	-1	0	22,5	21,5	1,0	4,8
6	+	0,8	0,4	1,1	75,9	85,3	9,5	11,1
7	+	0	0,1	-1	19,8	22,0	2,2	9,9
8	+	-0,6	-0,4	1,3	48,8	50,2	1,3	2,7
9	+	-0,4	0	1	51,0	51,0	0,0	0,0
10	+	-1	1	-0,5	14,5	13,8	0,6	4,7

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

Наибольшая погрешность модели для расчета параметров автоматических выключателей (табл. 4) составляет 11,1%, что показывает достаточную точность полученного уравнения регрессии.

Адекватность математической модели проверяется по F – критерию Фишера, который представляет собой отношение большей дисперсии к меньшей. То есть: $S_{ад}^2 > S^2$. Если данное условие не выполняется – числитель и знаменатель необходимо поменять местами. Расчетное значение F_p определяется по выражению:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S^2} \quad (16)$$

где $S_{ад}^2$ – оценка дисперсии адекватности, которая вычисляется как:

$$S_{ад}^2 = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - L} \quad (17)$$

$$S_{ад}^2 = \frac{3 \cdot ((2,45 - 3,69)^2 + \dots + (109,35 - 112,9)^2)}{8 - 5} = 33,73$$

где: L – количество коэффициентов в уравнении регрессии, оставшихся после исключения незначимых коэффициентов;

m – число параллельных опытов.

$$F_p = \frac{33,73}{13,89} = 2,43$$

Полученное расчетное значение F_p сравнивается с табличным значением $F_{кр}$ для числа степеней свободы $f_1 = K \cdot (N - M) = 3 \cdot (8 - 5) = 9$, $f_2 = N \cdot (K - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$.

$$F_p < F_{кр} \\ 2,43 < 2,54$$

Выполнение условия подтверждает адекватность разработанной модели.

Матрица планирования эксперимента для определения функции цели (температуры нагрева контактов) магнитных пускателей и контакторов представлена в таблице 5.

Таблица 5

Table 5

Матрица планирования эксперимента для определения зависимости функции цели (температуры нагрева контактов) контакторов и магнитных пускателей ПФЭ типа 2³

Experiment planning matrix for determining the dependence of the target function (contact heating temperature) of FFE type 2³ contactors and magnetic starters

u	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁₂	x ₁₃	x ₂₃	x ₁₂₃	y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}	S _{y_i} ²	\hat{y}	S _{y_i} ²
1	+	-	-	-	+	+	+	-	6,01	3,02	2,05	3,69	4,26	3,35	0,117
2	+	+	-	-	-	-	+	+	6,16	3,15	2,27	3,86	4,14	3,53	0,110
3	+	-	+	-	-	+	-	+	6,94	4,90	4,59	5,48	1,63	5,27	0,044
4	+	+	+	-	+	-	-	-	21,52	20,68	17,26	19,82	5,09	20,7	0,776
5	+	-	-	+	+	-	-	+	41,01	38,02	37,06	38,70	4,25	39	0,092
6	+	+	-	+	-	+	-	-	41,18	38,18	37,31	38,89	4,12	39,2	0,096
7	+	-	+	+	-	-	-	-	42,08	40,18	39,98	40,75	1,34	40,9	0,023
8	+	+	+	+	+	+	+	+	58,80	58,30	54,54	57,21	5,43	56,3	0,833

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

Продолжение таблицы 5

Continuation of table 5

u	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃
1	3,69	-3,69	-3,69	-3,69	3,69	3,69	3,69	-3,69
2	3,86	3,86	-3,86	-3,86	-3,86	-3,86	3,86	3,86
3	5,48	-5,48	5,48	-5,48	-5,48	5,48	-5,48	5,48
4	19,82	19,82	19,82	-19,82	19,82	-19,82	-19,82	-19,82
5	38,70	-38,70	-38,70	38,70	38,70	-38,70	-38,70	38,70
6	38,89	38,89	-38,89	38,89	-38,89	38,89	-38,89	-38,89
7	40,75	-40,75	40,75	40,75	-40,75	-40,75	40,75	-40,75
8	57,21	57,21	57,21	57,21	57,21	57,21	57,21	57,21
\bar{b}_{ij}	26,05	3,90	4,77	17,84	3,81	0,27	0,33	0,26
t _p	65,6	9,81	12	44,92	9,58	0,67	0,83	0,66

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

После вычисления значений коэффициентов *b* полином (4) для определения зависимости функции цели (температуры нагрева контактов) «y» контакторов и магнитных пускателей примет следующий вид:

$$y = 26,05 + 3,9x_1 + 4,77x_2 + 17,84x_3 + 3,81x_1x_2 + 0,27x_1x_3 + 0,33x_2x_3 + 0,26x_1x_2x_3 \quad (18)$$

Расчетное значение параметра критерия Кохрена по (9) составляет:

$$G_p = \frac{5,43}{(4,26 + \dots + 5,43)} = 0,18$$

При этом неравенство выполняется:

$$G_p < G_{кр} \\ 0,18 < 0,52$$

Гипотезу о статистической значимости коэффициентов регрессии проверим по критерию Стьюдента.

S² по (13):

$$S^2 = \frac{4,26 + \dots + 5,43}{8} = \frac{30,27}{8} = 3,78$$

$$S_b^2 = \frac{3,78}{8 \cdot 3} = 0,16; S_b = \sqrt{0,16} = 0,4$$

Таким образом, значимыми являются те коэффициенты, значение которых больше значения S_b·t_{кр} = 0,4·2,12 = 0,848, остальные коэффициенты отбрасываются.

Окончательный вид уравнения регрессии примет вид:

$$y = 26,05 + 3,91x_1 + 4,77x_2 + 17,84x_3 + 3,81x_1x_2 \quad (19)$$

В натуральном масштабе:

$$t_{кмп} = -1,87 - 0,002 \cdot I_{НОМ} + 1,25 \cdot K_3 + 1,02 \cdot t_{OC} + 0,027 \cdot I_{НОМ} \cdot K_3 \quad (20)$$

Результаты вычислений погрешности разработанной модели при изменении факторов x_1, x_2, x_3 приведены в таблице 6.

Таблица 6
Table 6

Результат вычислений погрешности для контакторов и магнитных пускателей
Result of error calculations for contactors and magnetic starters

№	x_0	x_1	x_2	x_3	y по (3)	\hat{y} по (19)	$ y-\hat{y} $	$\delta, \%$
1	+	0	0,5	0	31,3	28,4	2,9	10,3
2	+	-0,5	0	1,5	52,4	50,9	1,5	3,0
3	+	-0,1	-1	0,8	36,6	35,6	1,0	2,7
4	+	-1	0	1	40,2	40,0	0,2	0,5
5	+	0,5	-1	0	22,3	21,4	0,9	4,3
6	+	0,8	0,4	1,1	50,3	51,9	1,6	3,0
7	+	0	0,1	-1	9,6	8,7	1,0	11,2
8	+	-0,6	-0,4	1,3	46,6	45,9	0,7	1,5
9	+	-0,4	0	1	40,4	42,4	2,0	4,7
10	+	-1	1	-0,5	14,5	14,2	0,2	1,7

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

Наибольшая погрешность модели для расчета параметров исследуемых контакторов и магнитных пускателей (табл. 6) составляет 11,2%, что показывает достаточную точность полученного уравнения регрессии.

$S_{ад}^2$ – оценка дисперсии адекватности по (17):

$$S_{ад}^2 = \frac{3 \cdot ((3,35 - 3,69)^2 + \dots + (56,3 - 57,21)^2)}{8 - 5} = 2,1$$

Адекватность математической модели проверяется по F – критерию Фишера по (16):

$$F_p = \frac{3,78}{2,1} = 1,8$$

Полученное расчетное значение F_p сравнивается с табличным значением $F_{кр}$, для числа степеней свободы $f_1 = K \cdot (N - M) = 3 \cdot (8 - 5) = 9$, $f_2 = N \cdot (K - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$.

$$F_p < F_{кр} \\ 1,8 < 2,54$$

Выполнение требования подтверждает адекватность рассматриваемой модели.

На рисунках 1 и 2 представлены графические зависимости температуры нагрева исследуемых аппаратов при изменении коэффициента загрузки от 0,1 до 1,5.

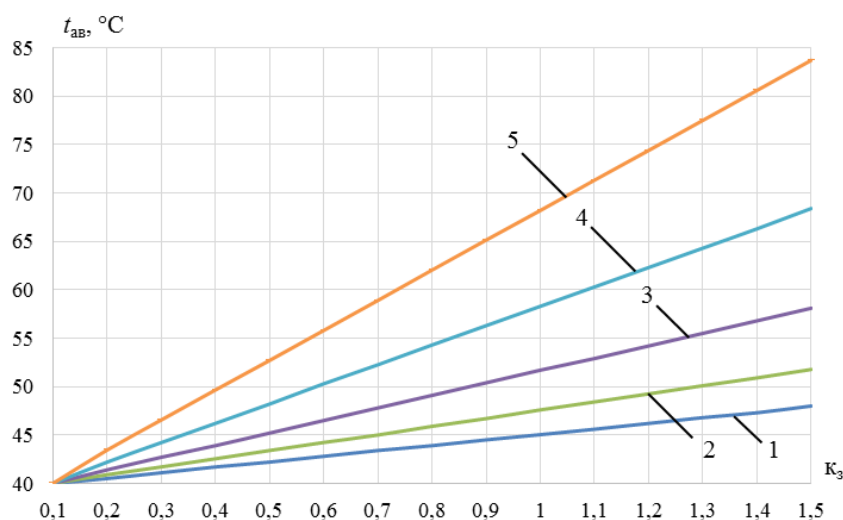


Рис. 1. Графические зависимости температуры нагрева контактов автоматических выключателей от коэффициента загрузки: 1 – $I_{ном} = 40$ А; 2 – $I_{ном} = 63$ А; 3 – $I_{ном} = 100$ А; 4 – $I_{ном} = 160$ А; 5 – $I_{ном} = 250$ А
Fig. 1. Graphical dependences of contact heating temperature of circuit breakers on the load factor: 1 – $I_{nom} = 40$ A; 2 – $I_{nom} = 63$ A; 3 – $I_{nom} = 100$ A; 4 – $I_{nom} = 160$ A; 5 – $I_{nom} = 250$ A

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

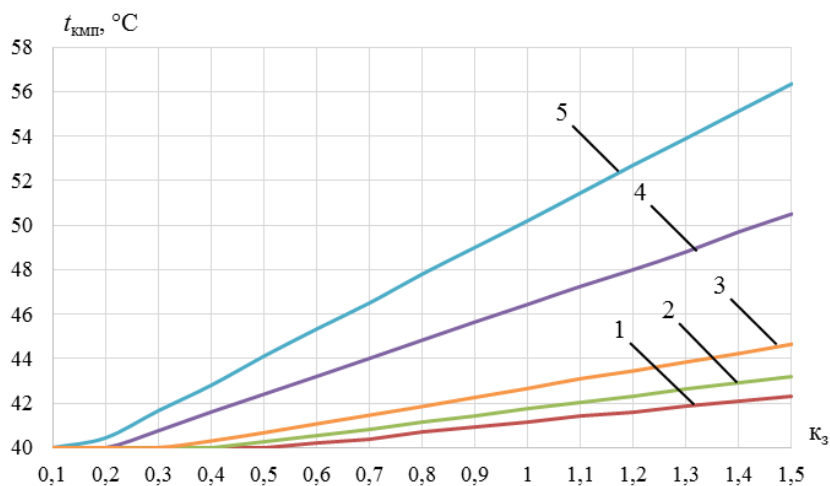


Рис. 2. Графические зависимости температуры нагрева контактов контакторов и магнитных пускателей от коэффициента загрузки: 1 – $I_{ном} = 40$ А; 2 – $I_{ном} = 63$ А; 3 – $I_{ном} = 100$ А; 4 – $I_{ном} = 250$ А; 5 – $I_{ном} = 400$ А

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

Графики (рис. 1 и 2) построены для НКА, работающих при температуре окружающей среды, равной 40°C, которые позволяют достаточно просто определить температуру нагрева контактов. Полученные графики показывают, что температура нагрева контактов исследуемых аппаратов не превышает значения, установленные ГОСТ 403-73.

Определим температуру нагрева контактов при изменении температуры окружающей среды от 5 до 40°C. На рисунке 3 представлены графические зависимости температуры нагрева контактов автоматических выключателей, на рисунке 4 – графические зависимости температуры нагрева контактов контакторов и магнитных пускателей.

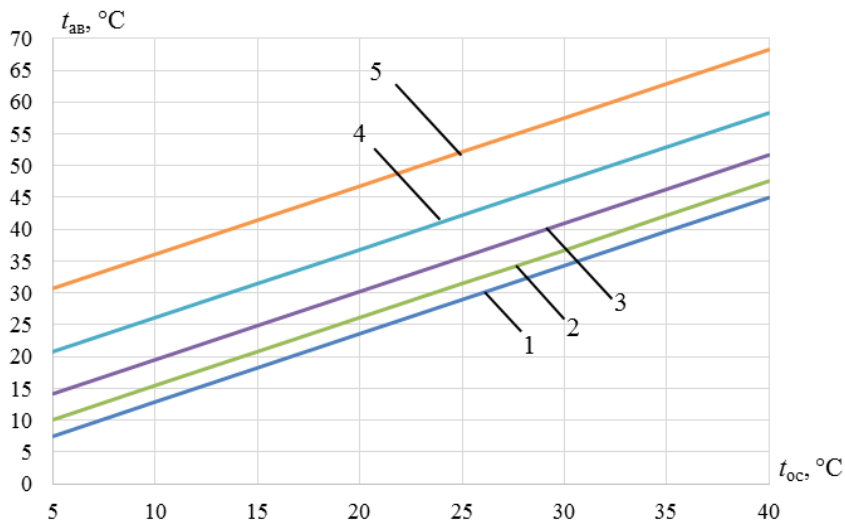


Рис. 3. Графические зависимости температуры нагрева контактов автоматических выключателей при изменении температуры окружающей среды от 5°C до 40°C: 1 – $I_{ном} = 40$ А; 2 – $I_{ном} = 63$ А; 3 – $I_{ном} = 100$ А; 4 – $I_{ном} = 160$ А; 5 – $I_{ном} = 250$ А

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

Рисунок 3 показывает, что при повышении температуры окружающей среды от 5°C до 40°C температура нагрева контактов автоматических выключателей повышается на 37,5°C.

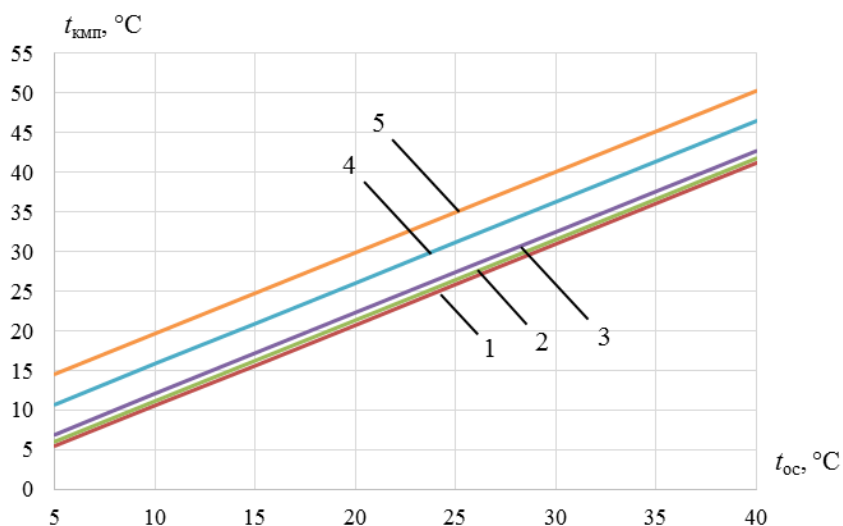


Рис. 4. Графические зависимости температуры нагрева контактов контакторов и магнитных пускателей при изменении температуры окружающей среды от 5°C до 40°C: 1 – $I_{ном} = 40$ А; 2 – $I_{ном} = 63$ А; 3 – $I_{ном} = 100$ А; 4 – $I_{ном} = 250$ А; 5 – $I_{ном} = 400$ А

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

При повышении температуры окружающей среды от 5°C до 40°C температуры нагрева контактов контакторов и магнитных пускателей повышается на 35,7°C (рис. 4).

Заключение (Conclusions)

Проведенные исследования показывают, что для определения температуры нагрева контактов НКА целесообразно составлять специализированные модели, которые обладают достаточной точностью.

Одним из методов определения температуры нагрева контактов НКА является регрессионный анализ, который позволяет получить уравнение зависимости температуры нагрева контактов от основных влияющих факторов- параметров оборудования, в качестве которых приняты величина номинального тока аппарата, коэффициент загрузки аппарата и температура окружающей среды.

Разработанные регрессионные модели определения температуры нагрева контактов НКА позволяют учитывать техническое состояние аппарата и легко могут быть изменены при изменении условий и режимов эксплуатации. Представленные графические зависимости позволяют достаточно быстро определить значение температуры нагрева контактов НКА с учетом режимов эксплуатации без проведения предварительных расчетов.

Литература

1. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзакаар А., Низамиев М.Ф., Шумихина О.А., Valtchev S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022; 24 (6): 3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>.
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутривзаводского электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020; 22 (2): 65-74. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74>.
3. Петров А. Р. и др. Совершенствование методики оценки потерь электроэнергии во внутривзаводских электрических сетях // Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 511–520. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.
4. Верстунин А.Ю. Математическая итеративно-адаптивная модель процесса установления стационарного теплового состояния контактно-токоведущих контуров контакторов // Вестник МЭИ. 2023. № 2. С. 27-36. DOI: 10.24160/1993- 6982-2023-2-27-36.
5. Wei C. Power Grid Facility Thermal Fault Diagnosis via Object Detection with Synthetic Infrared Imagery // 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEECT), Macau, Macao, 2021, pp. 217-221, DOI: 10.1109/CEEECT53198.2021.9672631.
6. Мамонтов А.Н., Пушница К.А. Тепловизионный контроль реакторов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 8. С. 145–151. DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500.

7. Haider M., Doegar A., Verma R. K. Fault Identification in Electrical Equipment using Thermal Image Processing // 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Greater Noida, India, 2018, pp. 853-858, doi: 10.1109/GUCON.2018.8675108.

8. Власов А. Б. и др. Особенности реализации метода количественной термографической диагностики при внедрении цифровых технологий // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 484–495. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495.

9. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петров А.Р., Грачева Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.

10. Коробейников А. Б., Сарваров А. С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №1 (26). С. 4-9.

11. Ещенко Д.В., Никитин А.Т., Белов О.А. Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля // Вестник КамчатГТУ. 2020. №54. С. 6-19.

12. Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O. Thermal Behavior of Electrical Contact for Different AC Loads // 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187457.

13. Bhagat A. K., Chauhan A. Thermal Image-Based Fault Analysis of Induction Motors using a Novel Machine Learning Model // 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 1429-1433, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046714.

14. Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A. Monitoring and Diagnosis of Electrical Equipment by Infrared Thermography // 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 516-520, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959756.

15. Hadzhiev I., Malamov D., Kolev N., Balabozov I., Yatchev I. Thermal Diagnostics of a High Power Fuse with Thermovision Camera // 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, Maldives, 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988120.

Авторы публикации

Петров Алмаз Радикович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. gracheva.i@bk.ru

References

1. Abdullazyanov, E.Y., Gracheva, E.I., Alzakkar, A., Nizamiev, M.F., Shumikhina, O.A., Valtchev, S. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022, 24 (6), pp. 3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>. (In Russ.).

2. Gracheva, E.I., Gorlov, A.N., Shakurova, Z.M. Calculation of the economy of electric energy in industrial electrical supply systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020. 22(2). pp. 65-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74>.

3. Petrov, A. R. et al. Improvement of the methodology for assessing power losses in in-plant power grids. *Vestnik of MSTU*, 2024, 27(4), pp. 511–520. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.

4. Verstunin, A.Yu. Iterative-Adaptive Mathematical Model of Settling a Stationary Thermal State of the Contactor Live Circuits. *Bulletin of MPEI*. 2023. No. 2. pp. 27-36. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-2-27-36. (in Russ.).

5. Wei C. Power Grid Facility Thermal Fault Diagnosis via Object Detection with Synthetic Infrared Imagery // 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), Macau, Macao, 2021, pp. 217-221, DOI: 10.1109/CEECT53198.2021.9672631.

6. Mamontov, A.N., Puschnitsa, K.A. Thermal control of reactors. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 8. Pp. 145–151. DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500. (In Russ.).

7. Haider M., Doegar A., Verma R. K. Fault Identification in Electrical Equipment using Thermal Image Processing // 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Greater Noida, India, 2018, pp. 853-858, doi: 10.1109/GUCON.2018.8675108.

8. Vlasov, A. B. et al. Features of implementing the quantitative thermographic diagnostics method while introducing digital technology. *Vestnik of MSTU*, 2019, 22(4), pp. 484–495. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495. (In Russ.)

9. Shpiganovich, A.N., Shpiganovich, A.A., Petrov, A.R., Gracheva, E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024. 26 (2), pp. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77. (In Russ.).

10. Korobeinikov, A.B., Sarvarov, A.S. Analysis of existing methods for diagnostics of electric motors and perspectives of their development. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2015. No. 1 (26). pp. 4-9. (In Russ.).

11. Eshchenko, D.V., Nikitin, A.T., Belov, O.A. Practical application of thermal-imaging analysis and control methods. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2020. No. 54. pp. 6-19. (In Russ.)

12. Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O. Thermal Behavior of Electrical Contact for Different AC Loads // 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187457.

13. Bhagat A. K., Chauhan A. Thermal Image-Based Fault Analysis of Induction Motors using a Novel Machine Learning Model // 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 1429-1433, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046714.

14. Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A. Monitoring and Diagnosis of Electrical Equipment by Infrared Thermography // 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 516-520, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959756.

15. Hadzhiev I., Malamov D., Kolev N., Balabozov I., Yatchev I. Thermal Diagnostics of a High Power Fuse with Thermovision Camera // 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, Maldives, 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988120.

Authors of the publication

Almaz R. Petrov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **12.06.2025 г.**

Отредактировано **01.08.2025 г.**

Принято **04.08.2025 г.**



ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6-10/0,4 кВ С РАСШИРЕННЫМИ ПРЕДЕЛАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Фарраев А.И., Маклецов А.М., Максимов В.В., Куракина О.Е.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

viktor.maksimov.1968@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в обеспечении качественного электроснабжения потребителей на фоне увеличения количества технологических присоединений. Одним из важнейших показателей качественного электроснабжения является напряжение в электрических сетях. В статье рассматриваются проблемы регулирования напряжения в распределительных сетях (РС), что позволяет обеспечить требуемое качество электроэнергии, снизить потери электроэнергии и повысить пропускную способность линий электропередачи. ЦЕЛЬ. Разработка мероприятий по обеспечению качества электроэнергии с использованием различных методов регулирования напряжения. МЕТОДЫ исследования включают математическое моделирование линий электропередачи (ЛЭП) с учетом статических характеристик нагрузки, а также моделирование процессов в распределительных сетях с использованием пунктов автоматического регулирования напряжения (ПАРН) и трансформаторов 10/0,4 оснащенными устройствами переключения ответвлений обмоток высшего напряжения без возбуждения (ПБВ) с расширенным диапазоном регулирования напряжения до $\pm 10\%$. РЕЗУЛЬТАТЫ. Результаты исследования демонстрируют целесообразность внедрения трансформаторов с расширенными пределами регулирования напряжения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведенное исследование демонстрирует, что оба рассмотренных метода, а именно установка ПАРН и переход на трансформаторы с расширенным диапазоном ПБВ $\pm 10\%$ позволяют решить ключевую задачу: поддерживать качество электроэнергии в пределах требований во всех узлах протяженной распределительной сети.

Ключевые слова: напряжение; качество электроэнергии; регулирование напряжения; потери мощности; полезный отпуск; ПАРН; ПБВ; статические характеристики нагрузок; потери холостого хода; экономическая эффективность; математическое моделирование.

Для цитирования: Фарраев А.И., Маклецов А.М., Максимов В.В., Куракина О.Е. Оценка качества функционирования трансформаторов 6-10/0,4 кВ с расширенными пределами регулирования напряжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 54-69. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-54-69.

EXPANDING THE VOLTAGE CONTROL RANGE OF 6/0.4 kV POWER TRANSFORMERS

Farraev A.I., Makletsov A.M., Maksimov V.V., Kurakina O.E.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

viktor.maksimov.1968@mail.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the study lies in ensuring high-quality electricity supply to consumers against the background of an increasing number of technological connections. One of the most important indicators of high-quality electricity supply is the voltage in electrical networks. The article considers the problems of voltage regulation in distribution networks (DN), which helps to ensure the required quality of electricity, reduce electricity losses and increase the capacity of power transmission lines. THE PURPOSE. Development of measures to ensure the quality of electricity using various methods of voltage regulation. METHODS of the study include mathematical modeling of power transmission lines (PL) taking into account the static

characteristics of the load, as well as modeling of processes in distribution networks using automatic voltage regulation points (AVRP) and 10/0.4 transformers equipped with tap-changer devices for high-voltage windings without excitation (PBB) with an extended voltage regulation range of up to $\pm 10\%$. RESULTS. The results of the study demonstrate the feasibility of introducing transformers with extended voltage regulation limits. CONCLUSION. The conducted study demonstrates that both of the considered methods, namely the installation of a PARN and the transition to transformers with an extended range of PBB of $\pm 10\%$, make it possible to solve a key problem: maintaining the quality of electricity within the requirements at all nodes of an extended distribution network.

Keywords: *voltage; power quality; voltage regulation; power losses; useful supply; PARN; PBB; static load characteristics; no-load losses; economic efficiency; mathematical modeling.*

For citation: Farraev A.I., Makletsov A.M., Maksimov V.V., Kurakina O.E. Expanding the voltage control range of 6/0.4 kV power transformers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 54-69. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-54-69.

Введение (Introduction)

В связи с постоянным ростом спроса на электроэнергию и увеличения количества технологических присоединений проблема поддержания стабильного и качественного электроснабжения при минимальных потерях электроэнергии является критически важной и актуальной задачей. В современном мире стабильность и надежность энергоснабжения играют ключевую роль в функционировании различных отраслей жизни. Одним из центральных аспектов обеспечения этой стабильности является регулирование напряжения в электрических сетях.

Регулирование напряжения в распределительных электрических сетях осуществляется в следующих целях: обеспечение требуемого качества электроэнергии; снижение потерь электроэнергии; повышение пропускной способности ЛЭП.

Для обеспечения качества электроэнергии в настоящее время широко используется регулирование напряжения с помощью ПАРН [1].

В настоящее время потери электроэнергии в электрических сетях достаточно высоки. Так, например, в 2025 г. потери электроэнергии в электрических сетях АО «Сетевая компания» РТ составили около 6,5% [2], поэтому актуален вопрос их снижения. Вопросам повышения эффективности функционирования электрических сетей за счет повышения их надежности и экономичности в настоящее время проводится значительное количество работ, например, [3-7].

Наряду с повышением пропускной способности ЛЭП с помощью увеличения сечения проводов в последнее время также находит применение ПАРН [8]. В этом случае ограничение пропускной способности определяется недопустимым, с точки зрения качества электроэнергии, падением напряжения в линии.

Регулирование напряжения ввиду наличия статических характеристик нагрузки влияет также на величину потребления электроэнергии (полезный отпуск электроэнергии с точки зрения электроснабжающих организаций) [9].

Самым распространенным способом регулирования напряжения является использование трансформаторов с использованием устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Однако трансформаторы с РПН серийно выпускаются для напряжений 35 кВ и выше, для напряжений 6-10 кВ такие трансформаторы изготавливаются по индивидуальным заказам [10] и в распределительных сетях не используются.

Особенно остро проблема регулирования напряжения встает на длинных участках сети 6-10 кВ, где длина линии (фидера) может быть несколько десятков километров. На отдаленных узлах при увеличении нагрузки, или в сетях с двухсторонним питанием в послеаварийном режиме работы возможны отклонения напряжения конечных потребителей более допустимого уровня, что требует необходимость модернизации сети, для регулирования напряжения [11-13].

Используемые в настоящее время устройства регулирования напряжения на трансформаторах 6-10/0,4 кВ (переключатели без возбуждения ПБВ) имеют диапазон регулирования напряжения $\pm 5\%$, что во многом определялось действующими до 2013 г. ГОСТ по качеству электроэнергии, которые регламентировали допустимые отклонения напряжения у потребителей также $\pm 5\%$. Новый ГОСТ 32144-2013 регламентирует

длительное отклонение напряжения в точке отпуска электроэнергии в пределах $\pm 10\%$, что допускает разность напряжений у ближайших и удаленных потребителей в сетях 0,4 кВ в пределах 20% от номинального. В таких условиях представляется необходимым рассмотреть целесообразность расширения пределов регулирования ПБВ трансформаторов 6-10/0,4 кВ также до $\pm 10\%$.

В данной статье проведены расчеты и рассмотрены способы регулирования напряжения для соблюдения показателей качества у конечных потребителей при различных нагрузках путем установки ПАРН, а также целесообразность внедрения трансформаторов 10/0,4 кВ, оснащенных устройствами ПБВ с диапазоном регулирования $\pm 10\%$ в целях исключения использования дорогостоящих ПРАН. Оценочными критериями при этом являлись показатели качества электроэнергии, передаваемая по питающим сетям мощность и ее потери.

Материалы и методы (Materials and methods)

В настоящее время для распределительных сетей 6-10 кВ наиболее распространенной схемой питания потребителей является схема с двумя источниками питания (рис. 1).

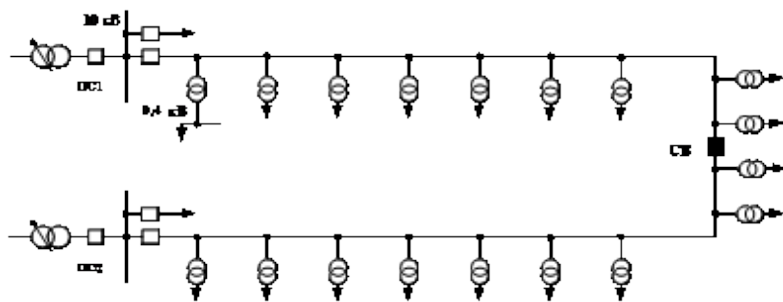


Рис. 1. Схема с двумя источниками питания *Fig. 1. Schematic with two power supplies*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В рассматриваемой схеме питание всех потребителей осуществляется от двух питающих подстанций – ПС1 и ПС2. Секционирующий выключатель СВ в нормальном режиме отключен. В случае ремонта одной из питающих подстанций СВ включается, а выключатель, питающий ВЛ со стороны ремонтируемой ПС, отключается. Рассматриваемый режим может оказаться недопустимым из-за значительного падения напряжения по всей длине ВЛ. Недопустимое падение напряжения может появиться и в схеме с одним источником питания при значительной (несколько десятков километров) длине ВЛ.

В данной работе рассматриваются два способа обеспечения необходимого качества электроэнергии по показателю длительного отклонения напряжения: использование ПАРН и расширение пределов регулирования ПБВ до $\pm 10\%$. Анализ и сравнение указанных способов производится с помощью математической модели распределительной сети, схема которой представлена на рисунке 2.

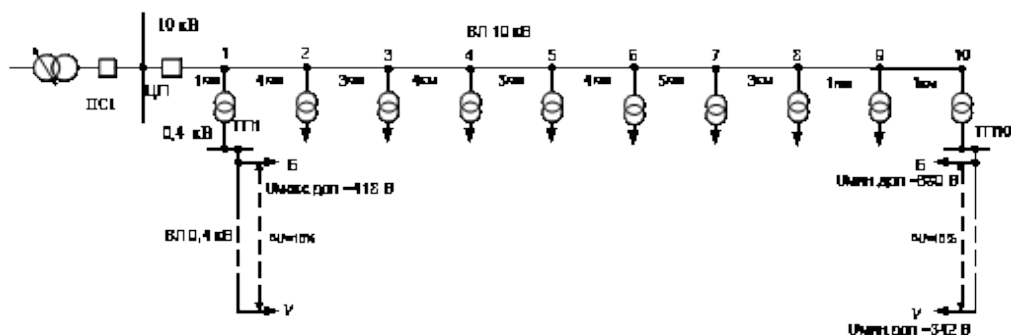


Рис. 2. Принципиальная схема моделируемой *Fig. 2. Schematic diagram of the simulated network*
 сети
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Согласно ГОСТ 32144-2013 номинальным фазным напряжением на стороне низшего напряжения ТП 10/0,4 кВ следует принимать величину 220 В (380 В – линейное). Согласно тому же ГОСТ допустимое отклонение напряжения в точке отпуска электроэнергии (в

рассматриваемом случае – на опоре ВЛ) составляет $\pm 10\%$ от номинального. Тогда максимально допустимое напряжение у ближайшего потребителя (Б) ТП1 $U_{\text{макс. доп}} = 380 * 1,1 = 418 \text{ В}$.

Минимально допустимое напряжения у удаленного потребителя (У) $U_{\text{мин. Доп.}} = 380 * 0,9 = 342 \text{ В}$. Падение напряжения на всей длине ВЛ 0,4 кВ принято равным 10%, что, в среднем, должно соответствовать правильно спроектированной линии длиной 600-800 м. Тогда минимально допустимое на шинах 0,4 кВ ТП равно $342/0,9 = 380 \text{ В}$

Математическая модель сети предусматривает учет статистических характеристик нагрузок по напряжению – зависимостей величины активных и реактивных нагрузок от напряжения, которые обычно описываются полиномами второй степени. [14]:

$$P(U) = P_{\text{НОМ}} * (a_0 + a_1 * \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right) + a_2 * \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right)^2), \quad (1)$$

$$Q(U) = Q_{\text{НОМ}} * (b_0 + b_1 * \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right) + b_2 * \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}}\right)^2) \quad (2)$$

По ряду причин работы по определению статических характеристик нагрузок для типовых потребителей в условиях существенного изменения состава электроприемников практически только начинаются [15-17].

В [8] показано, что в пределах изменения напряжения $\pm 10\%$ от номинального статические характеристики можно линеаризовать и тогда выражения (1,2) принимают вид:

$$P(U) = P_{\text{НОМ}} * (1 + K_P * \frac{\Delta U}{U_{\text{НОМ}}}), \quad (3)$$

$$Q(U) = Q_{\text{НОМ}} * (1 + K_Q * \frac{\Delta U}{U_{\text{НОМ}}}), \quad (4)$$

где $\Delta U = U - U_{\text{НОМ}}$.

Для коммунально-бытовой нагрузки наблюдаются средние значения коэффициентов $K_P = 0,5$ и $K_Q = 2$ [5], которые и используются в предлагаемой математической модели распределительной сети.

При анализе длительных отклонений напряжений в точках отпуска электроэнергии необходимо рассмотреть режимы максимальных и минимальных нагрузок потребителей при неизменных уставках ПБВ трансформаторных подстанций. В первом из указанных режимов должна быть исключена вероятность недопустимого снижения напряжения у электрически наиболее удаленных потребителей, например, у удаленного потребителя «У» ТП 10. Во втором режиме должно быть исключено недопустимое повышение напряжений у близлежащих потребителей ТП. Выбор уровня напряжения в центре питания (ЦП) и ответвлений ПБВ всех ТП (рис. 2) необходимо производить для каждой конкретной сети с использованием данных измерений параметров режима при максимальных и минимальных нагрузках. В данной работе необходимые соотношения параметров режимов для максимальной и минимальной нагрузки в математической модели использовались графики нагрузок характерных потребителей. На рисунке 3 представлены суточные графики нагрузок активной (P) и реактивной (Q) нагрузок ВЛ 0,4 кВ в сельской местности полученные на действующей ТП прибором для измерения показателей качества электроэнергии RESURS UF. Результаты аналогичных измерений для многоквартирного жилого дома представлены на рисунке 4.



Рис. 3. Суточный график нагрузок ВЛ 0,4 кВ

Fig. 3. Daily load schedule for 0.4 kV overhead power lines

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

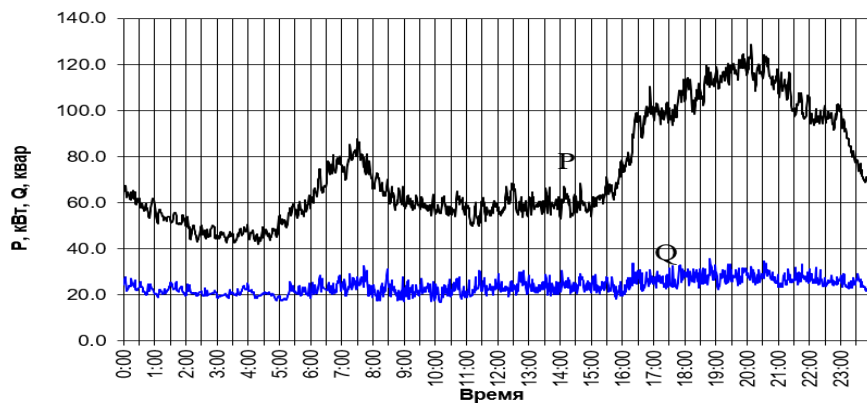


Рис. 4. Суточный график нагрузок Fig. 4. Daily load schedule of an apartment building многоквартирного жилого дома

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

Анализ отношений R_{\min}/R_{\max} и Q/P представленных графиков коммунально-бытовых нагрузок позволяет принять среднее соотношение минимальной нагрузки к максимальной равным 0,4. Для режима максимальных нагрузок $\tan \varphi = Q/P$ был принят равным 0,1, а для режима минимальных – 0,2.

Для ВЛ 10 кВ нагрузкам узлов являются ВЛ 0,4 кВ с распределенными вдоль их длины потребителями. Для оценки статической характеристики такой нагрузки использовалась математическая модель ВЛ 0,4 кВ с равномерно распределенными вдоль ее длины нагрузками (рис. 5).

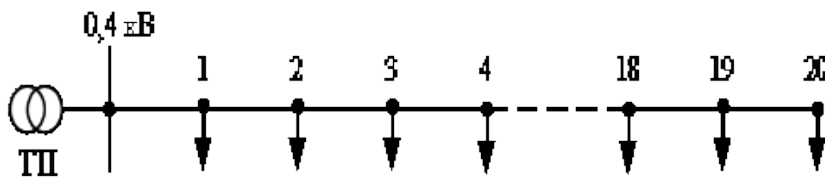


Рис. 5. Принципиальная схема радиальной ВЛ Fig. 5. Schematic diagram of a 0.4 kV radial overhead power line with 20 load nodes

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

Математическая модель ВЛ основана на методе обратных и прямых итераций, который целесообразен для расчета режимов радиальных сетей [18-20]. При этом в качестве исходных данных используются нагрузки узлов, напряжение в начале ВЛ и ее параметры. При расчете режима сети учитывались как продольные, так и поперечные составляющие падения напряжений.

Обратный ход:

Принимается напряжение во всех узлах равным номинальному. Расчет начинается с конца ВЛ. Ток на последнем, i -ом участке ВЛ определяется по формуле:

$$I_i = \frac{\sqrt{(P_i^2 + Q_i^2)}}{\sqrt{3}U_H} \quad (5)$$

Потери мощности на i -ом участке ВЛ:

$$\Delta P_i = I_i^2 R_i, \quad \Delta Q_i = I_i^2 X_i \quad (6)$$

Мощность в голове i -го участка:

$$P_{i_{гв}} = P_i + \Delta P_i, \quad Q_{i_{гв}} = Q_i + \Delta Q_i \quad (7)$$

Мощности в конце $i-1$ го участка ВЛ

$$P_{(i-1)кв} = P_{i_{гв}} + P_{i-1}, \quad Q_{(i-1)кв} = Q_{i_{гв}} + Q_{i-1} \quad (8)$$

В результате первого этапа определяются потоки мощности на всех участках ВЛ и потери мощности на этих участках.

Прямой ход:

По известным потокам мощности определяются падения напряжения на участках ВЛ и напряжения в узлах. Расчет начинают с первого участка.

Ток первого участка:

$$I_1 = \frac{\sqrt{(P_{1н\text{у}}^2 + Q_{1н\text{у}}^2)}}{U_0} \quad (9)$$

Активная составляющая падения напряжения на первом участке ВЛ:

$$U_{a1} = \frac{P_{1н\text{у}} \cdot R_1}{U_0} + \frac{Q_{1н\text{у}} \cdot X_1}{U_0} \quad (10)$$

Реактивная составляющая падения напряжения на первом участке ВЛ:

$$\Delta U_{p1} = \frac{P_{1н\text{у}} \cdot X_1}{U_0} - \frac{Q_{1н\text{у}} \cdot R_1}{U_0} \quad (11)$$

Активная и реактивные составляющие напряжения в узле 1:

$$U_{1a} = U_{0a} - \Delta U_{a1}, \quad U_{1p} = U_{0p} - \Delta U_{p1} \quad (12)$$

Аналогичным образом рассчитываются напряжения всех узлов. При следующих итерациях при перерасчете нагрузок в зависимости от напряжения в формулах статических характеристик нагрузок (4-5) необходимо вместо $U_{ном}$ использовать напряжения узлов, полученные в результате расчетов. Расчет носит итерационный характер, причем опыт расчетов показал, что достаточная точность достигается после 5-7 итераций. Результаты расчета для режима максимальных нагрузок представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Результаты расчета режима максимальной нагрузки
Results of calculation of maximum load mode

Номер узла	Длина участка, м	Задаваемая нагрузка узла		Мощность в начале участка		Потери мощности на участке		I уз, А	U уз, В	Мощность в конце участка		Нагрузка с уч. ст. характеристик		
		P уз, кВт	Q уз, кВАр	P нач	Q нач	dP, кВт	dQ, кВАр			PK	Qk	Uном	P уз ст.	Quz. стат.
0														
1	40	1,8	0,36	41,002	9,598	0,727	0,363	168,503	245,221	40,275	9,234	220	1,903	0,443
2	40	1,8	0,36	38,372	8,792	0,660	0,330	160,586	240,680	37,712	8,462		1,885	0,428
3	40	1,8	0,36	35,827	8,034	0,596	0,298	152,598	236,378	35,231	7,736		1,867	0,414
4	40	1,8	0,36	33,364	7,322	0,535	0,267	144,541	232,315	32,830	7,055		1,850	0,400
5	40	1,8	0,36	30,979	6,655	0,476	0,238	136,417	228,493	30,503	6,416		1,835	0,388
6	40	1,8	0,36	28,668	6,029	0,421	0,210	128,228	224,912	28,247	5,818		1,820	0,376
7	40	1,8	0,36	26,427	5,442	0,368	0,184	119,977	221,573	26,058	5,258		1,806	0,365
8	40	1,8	0,36	24,252	4,893	0,319	0,160	111,666	218,476	23,933	4,733		1,794	0,355
9	40	1,8	0,36	22,139	4,378	0,273	0,137	103,289	215,620	21,866	4,241		1,782	0,346
10	40	1,8	0,36	20,084	3,896	0,230	0,115	94,880	213,007	19,853	3,781		1,771	0,337
11	40	1,8	0,36	18,082	3,443	0,191	0,096	86,412	210,634	17,891	3,348		1,762	0,329
12	40	1,8	0,36	16,129	3,019	0,155	0,078	77,899	208,503	15,974	2,941		1,753	0,322
13	40	1,8	0,36	14,221	2,618	0,123	0,062	69,346	206,611	14,098	2,557		1,745	0,316
14	40	1,8	0,36	12,352	2,241	0,095	0,047	60,757	204,959	12,258	2,194		1,738	0,311
15	40	1,8	0,36	10,519	1,883	0,070	0,035	52,136	203,545	10,450	1,848		1,733	0,306
16	40	1,8	0,36	8,717	1,542	0,048	0,024	43,488	202,369	8,669	1,518		1,728	0,302
17	40	1,8	0,36	6,941	1,215	0,031	0,016	34,818	201,430	6,910	1,200		1,724	0,299
18	40	1,8	0,36	5,186	0,901	0,017	0,009	26,129	200,727	5,168	0,892		1,721	0,297
19	40	1,8	0,36	3,447	0,595	0,008	0,004	17,427	200,258	3,439	0,591		1,719	0,295
20	40	1,8	0,36	1,720	0,296	0,002	0,001	8,716	200,025	1,718	0,295		1,718	0,295

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

График изменения фазных напряжений вдоль ВЛ представлен на рисунке 6.

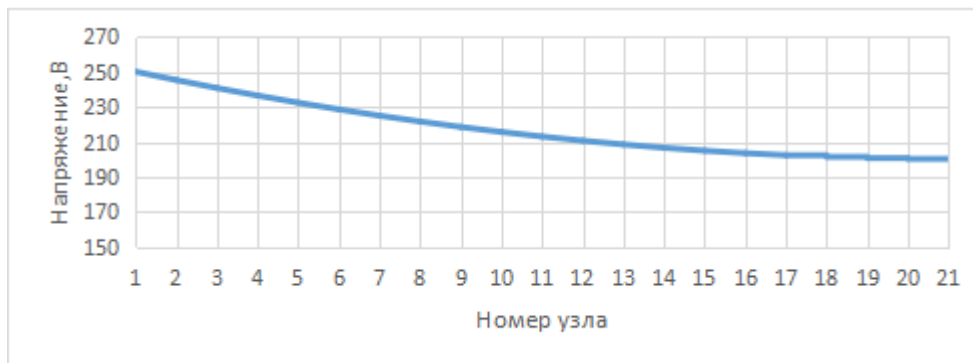


Рис. 6. Изменение напряжения вдоль ВЛ

Fig. 6. Voltage change along the overhead power line

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

Для оценки влияния падения напряжения на ВЛ на ее статическую характеристику, как нагрузки, была проведена серия расчетов для случаев сосредоточенной нагрузки в начале ЛЭП и равномерно распределенной этой нагрузки вдоль длины линии. Результаты расчетов приведены на рисунке 7.

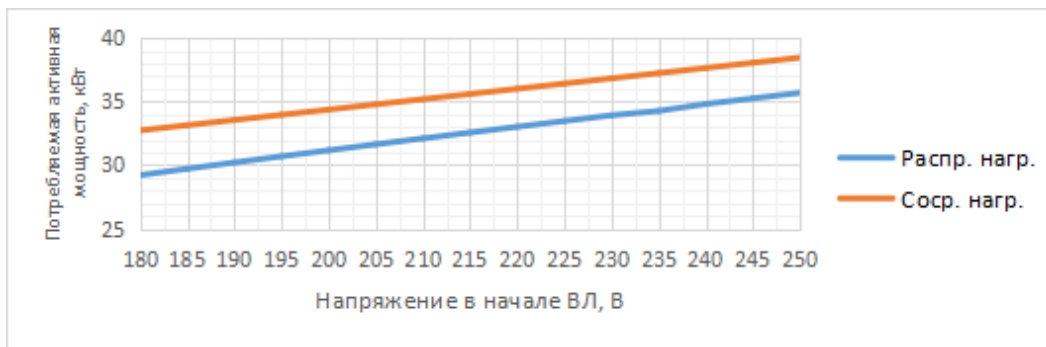


Рис. 7. Статические характеристики нагрузки ВЛ Fig. 7. Static characteristics of the overhead power line load

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

Как видно из рисунка 7 статическая характеристика реальной ВЛ с распределенной нагрузкой при всех напряжениях потребляет приблизительно на 10% меньшую мощность, чем ВЛ с сосредоточенной в ее начале нагрузкой. Поэтому для расчета режимов сети, представленной на рисунке 2, в данной работе предлагается считать все нагрузки сосредоточенными на шинах 0,4 кВ ТП и уменьшенными на 10%. Тогда выражения (3-4) примут вид:

$$P(U) = P_{ном} \left(1 + K_P \frac{\Delta U}{U_{ном}} \right) * 0,9 \quad (13)$$

$$Q(U) = Q_{ном} \left(1 + K_Q \frac{\Delta U}{U_{ном}} \right) * 0,9 \quad (14)$$

Приведенные статические характеристики используются в данной работе при расчетах режимов сети 10 кВ. Анализ линейных зависимостей (рис. 7) также показывает, что при принятых допущениях, на каждый 1 В увеличения напряжения нагрузка ВЛ увеличивается на 186 Вт, и это тоже учитывается в математической модели сети 10 кВ.

При расчетах режимов используются регулировочные ответвления ПБВ, округленные характеристики которых представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Table 2

Характеристики ПБВ с пределами регулирования напряжения $\pm 5\%$ $U_{ном}$

Characteristics of the PBB with voltage regulation limits of $\pm 5\%$ $U_{ном}$

№ отв	Изменение напр. первичной обмотки, %	U ном сети, кВ	U2 при хх, кВ	Добавка напряжения, %	Коэфф. трансформации
1	+5	10	0,380	0	26,31
2	+2,5		0,390	2,5	25,64
3	0		0,400	5	25
4	-2,5		0,410	7,5	24,4
5	-5		0,420	10	23,8

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

Таблица 3

Table 3

Характеристики ПБВ с пределами регулирования напряжения $\pm 10\%$ $U_{ном}$

Characteristics of the PBB with voltage regulation limits of $\pm 10\%$ $U_{ном}$

№ отв	Изменение напр. первичной обмотки, %	U ном сети, кВ	U2 при хх, кВ	Добавка напряжения, %	Коэфф. Трансформации
1	+10	10	0,380	0	26,31
2	+5		0,400	5	25
3	0		0,420	10	23,8
4	-5		0,440	15	22,73
5	-10		0,460	20	21,74

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

Математическая модель сети 10 кВ также основана на методе обратных и простых итераций.

Результаты (Results)

Исходные данные и результаты расчетов сети 10 кВ представляются в виде таблицы 4. В столбец 4 этой таблицы может быть введен процент добавки напряжения после того узла, в строке которого введен процент ВДТ (ПАРН). Столбцы 12-13 таблицы содержат расчетные нагрузки узлов в соответствии со статическими характеристиками (12, 13). Столбцы 14, 15 содержат потери холостого хода и короткого замыкания трансформаторов ТП. В таблице 2 приведены также результаты расчетов напряжений в узлах в режиме максимальных нагрузок при ответвлениях №1 ПБВ всех ТП. При этом обеспечивается нулевая добавка напряжений с помощью трансформаторов ТП.

Таблица 4
Table 4

Исходные данные и результаты расчета сети 10 кВ в режиме максимальных нагрузок
Initial data and calculation results for a 10 kV network under maximum load conditions

Номер узла	Номер Стр	Длина участка, км	ВДТ, %	Заданная мощность узла		Потери мощности на участке		I уз, А	U уз, кВ	Uном	P узла стат.	Qузла стат.	Потери акт. мощности в трансф.	
				P уз, кВт	Q уз, кВАр	dP, кВт	dQ, кВАр						dPtx	dPtk
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0								10,70	10,00				
1	250	1		200	20	19,90	15,14	120,09	10,59		185,34	20,13	0,92	2,06
2	320	4		250	25	66,68	50,73	109,91	10,19		227,17	23,37	0,95	3,16
3	320	3		200	20	38,77	29,50	96,77	9,94		179,43	17,77	0,90	1,97
4	400	4		300	30	40,96	31,16	86,14	9,64		265,09	25,04	0,98	2,44
5	250	3		180	18	20,26	15,41	69,96	9,46		157,62	14,45	0,73	1,48
6	320	4		200	20	19,95	15,18	60,12	9,26		173,32	15,33	0,78	1,83
7	630	5		300	30	16,61	12,638	49,06	9,056		257,26	21,90	1,28	1,28
8	400	3		200	20	4,35	3,3098	32,42	8,979		170,81	14,33	0,85	1,01
9	250	1		200	20	0,62	0,4749	21,27	8,963		170,66	14,27	0,66	1,74
10	320	1		180	18	0,14	0,1066	10,08	8,955		153,5	12,81	0,73	1,44
Сумма		29		2210		228,23					1940,23		8,77	18,40

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

Результаты расчета напряжений в узлах сети 10 кВ представлены на рисунке 8, на котором также показана граница допустимых значений напряжений по условиям минимально допустимого напряжения на шинах 0,4 кВ ТП – Uмин.доп. = 380 В (рис. 2). Граница определена для случая использования ПБВ с пределами регулирования напряжения ±10% Uном. При этом максимальная добавка напряжения с помощью ПБВ составляет 10% при коэффициенте трансформации Kт = 23,8 (табл. 2). Тогда минимально допустимое по условиям качества электроэнергии напряжение на стороне 10 кВ составит 380*23,8 = 9044 В. Как видно из рисунка 8, начиная с узла №7, трансформаторы с пределами регулирования напряжения ±5% Uном не могут обеспечить нормируемое отклонение напряжения у удаленных потребителей ВЛ 0,4 кВ, так как напряжения этих узлов находятся ниже границы допустимых значений.

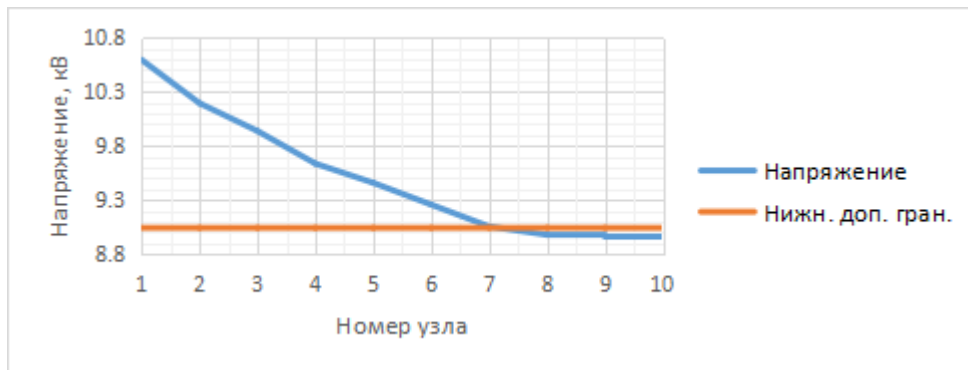


Рис. 8. Характер изменения напряжений в узлах сети 10 кВ

Fig. 8. The nature of voltage changes in the nodes of the 10 kV network

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

Использование трансформаторов с пределами регулирования напряжения $\pm 10\%$ Уном

Трансформаторы 6-10/0,4 кВ с пределами регулирования напряжения ПБВ $\pm 10\%$ Уном для распределительных сетей в настоящее время в РФ не выпускаются. Однако изготовление таких трансформаторов при сохранении такого же количества ответвлений ПБВ, что и на ПБВ $\pm 5\%$ Уном, технических и экономических сложностей не представляет. В то же время, такие трансформаторы существенно расширяют возможности обеспечения нормируемых показателей качества электроэнергии в критических ситуациях протяженных и нагруженных ЛЭП 6-10 кВ. Ниже обосновывается возможность и целесообразность использования таких трансформаторов на примере рассматриваемой распределительной сети (рис. 2).

Режим максимальных нагрузок

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) напряжение питания в ЦП в режиме максимальных нагрузок принимается не ниже 10,5 кВ. В указанном режиме недопустимо низким может оказаться напряжение на шинах 0,4 кВ удаленных ТП. Для расчетов напряжение в ЦП принято равным 10,7 кВ.

Расчет проводится в три этапа:

Этап 1

Осуществляется расчет режима сети с максимальными суточными нагрузками на первом ответвлении ПБВ трансформаторов всех ТП (табл. 4). Затем определяется возможность обеспечения нормируемых показателей качества электроэнергии при наличии трансформаторов с ПБВ $\pm 10\%$. При этом учитывается максимальная добавка напряжения ПБВ, равная 20% при коэффициенте трансформации $K_t = 21,74$. Тогда минимально допустимое по условиям качества электроэнергии напряжение на стороне 10 кВ составит $380 \cdot 21,74 = 8261$ В. При этом граница допустимого минимального напряжения в узлах сети 10 кВ оказывается ниже напряжений узлов (рис. 9).

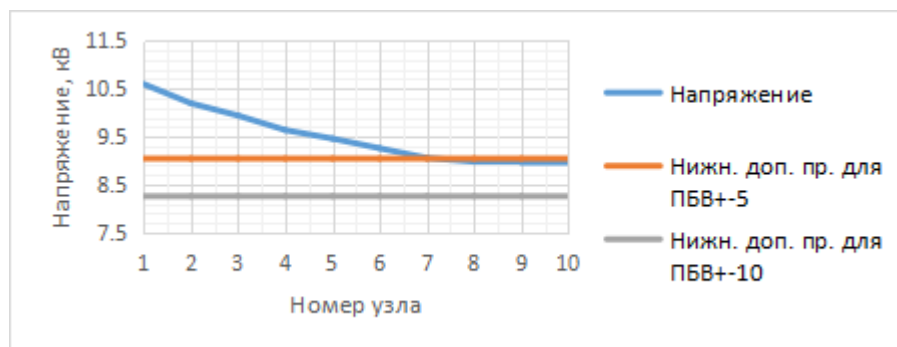


Рис. 9. Границы допустимых напряжений в узлах сети Fig. 9. Limits of permissible voltages in network nodes

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

Результаты расчета показывают принципиальную возможность обеспечения нормируемого показателя качества электроэнергии по длительному отклонению напряжения, так как напряжения всех узлов сети находятся в допустимой режимной области (выше границы допустимых напряжений).

Этап 2

Выбираются тип ПБВ ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$) и ответвления ПБВ для каждого узла ВЛ 10 кВ. Выбор осуществляется таким образом, чтобы на шинах 0,4 кВ ТП с пределами регулирования $\pm 5\%$ получить максимально возможное в пределах допустимого (418 в, рис. 2) напряжение, а на ТП с пределами $\pm 10\%$ — ближе к Умин. доп. Результаты выбора представлены в таблице 5.

Таблица 5
Table 5

Результаты выбора типа ПБВ и номеров ответвлений
Results of selection of the type of PBB and branch numbers

Номер узла	U _{вн}	U _{нн}	Тип ПБВ	Номер отв.	Коэфф. Транс.	Добавка напр., В	Добавка мощности кВт	Нагрузка узла, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10,593	413	±5	2	25,64	18,180	3,381	203,38
2	10,193	405	±5	3	25	25,560	4,754	254,75
3	9,937	417	±5	5	23,8	47,397	8,816	208,82
4	9,636	404,8	±5	5	23,8	46,733	8,692	308,69
5	9,459	397,4	±5	5	23,8	46,144	8,583	188,58
6	9,258	389	±5	5	23,8	45,451	8,454	208,45
7	9,056	398	±10	4	22,73	62,162	11,562	311,56
8	8,979	395	±10	4	22,73	62,117	11,554	211,55
9	8,963	394	±10	4	22,73	61,753	11,486	211,49
10	8,955	393,9	±10	4	22,73	61,954	11,523	191,52

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

Столбец 9 таблицы 5 содержит начальные нагрузки с их увеличением за счет добавок напряжения устройствами ПБВ трансформаторов (186 Вт на 1 В).

Этап 3

Производится расчет режима сети с увеличенными начальными нагрузками узлов. Результаты расчета приведены в таблице 6 и на рисунке 10. Эти результаты подтверждают возможность обеспечения нормируемых отклонений напряжения во всех узлах сети.

Таблица 6
Table 6

Результаты расчета режима сети в режиме максимальных нагрузок
Results of calculating the network mode in maximum load mode

Номер узла	Ном Стр	Длина участка, км	ВД Т, %	Заданная мощность узла		Потери мощности на участке		I _{уч} , А	U _{уз} , кВ	U _{ном}	P _{узла стат.}	Q _{узла стат.}	Потери акт. мощности в трансф.	
				P _{уз} , кВт	Q _{уз} , кВАр	dP, кВт	dQ, кВАр						dP _{тх}	dP _{тк}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0								10,70	10,00				
1	250	1		203	20,34	21,70	16,51	125,39	10,59		188,42	20,46	0,92	2,13
2	320	4		255	25,48	73,07	55,60	115,06	10,17		231,20	23,70	0,94	3,27
3	320	3		209	20,88	42,78	32,55	101,65	9,90		186,98	18,41	0,89	2,14
4	400	4		309	30,87	45,24	34,42	90,54	9,58		272,02	25,46	0,96	2,57
5	250	3		189	18,86	22,57	17,17	73,83	9,40		164,59	14,92	0,72	1,62
6	320	4		208	20,85	22,25	16,93	63,49	9,18		179,95	15,70	0,77	1,98
7	630	5		312	31,16	18,59	14,146	51,91	8,971		265,98	22,27	1,26	1,36
8	400	3		212	21,16	4,94	3,7564	34,53	8,889		179,82	14,81	0,83	1,12
9	250	1		211	21,15	0,71	0,54	22,68	8,871		179,60	14,74	0,65	1,92
10	320	1		192	19,15	0,16	0,122	10,78	8,863		162,6	13,32	0,71	1,61
Сумма		29		2299		252,00					2011,14		8,65	19,71

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

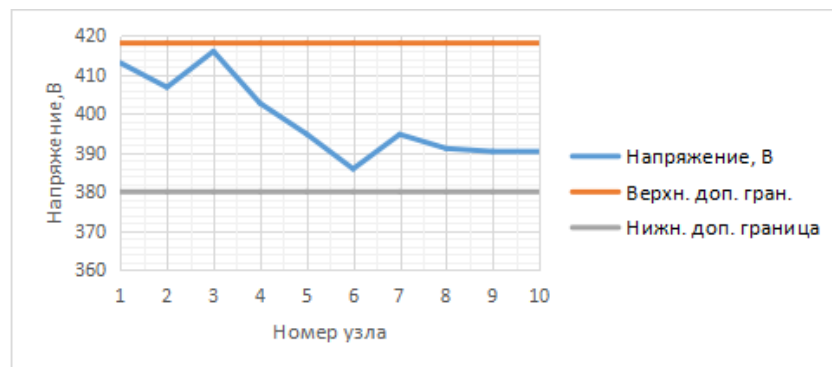


Рис. 10. Напряжения узлов в режиме максимальных нагрузок
Fig. 10. Node stresses under maximum load conditions

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

Режим минимальных нагрузок

Согласно ПУЭ в режиме минимальных нагрузок напряжение в ЦП должно поддерживаться не выше 10 кВ (принято 10 кВ), ответвления ПБВ остаются теми же, что и в режиме максимальных нагрузок. При этом должна исключаться вероятность превышения напряжений узлов верхней границы допустимых напряжений на шинах 0,4 кВ ТП (418 В, рис. 2). Задаваемые нагрузки узлов при этом приняты равными 0,4 нагрузок максимального режима, $\text{tg } \varphi = 0,2$.

В таблице 7 и на рисунке 11 представлены результаты расчета режима минимальных нагрузок рассматриваемой сети, которые показывают допустимость режима по показателям качества электроэнергии.

Таблица 7

Table 7

Результаты расчета режима сети в режиме минимальных нагрузок

Results of calculating the network mode in the minimum load mode

Номер узла	Номер Стр	Длина участка, км	ВДТ, %	Заданная мощность узла		Потери мощности на участке		I уч, А	U уз, кВ	Uном	P узла стат.	Qузла стат.	Потери акт. мощности в трансф.		
				P уз, кВт	Q уз, кВАр	dP, кВт	dQ, кВАр						dPtx	dPtk	
															5
0	0								10,00	10,00					
1	250	1		81,6	16,31	3,51	2,67	50,46	9,95		73,23	14,54	0,81	0,33	
2	320	4		102,2	20,44	11,71	8,91	46,07	9,78		91,01	17,61	0,87	0,52	
3	320	3		82,9	16,58	6,79	5,17	40,51	9,67		73,40	13,95	0,85	0,34	
4	400	4		122,8	24,56	7,14	5,43	35,97	9,54		108,02	20,09	0,96	0,41	
5	250	3		74,8	14,95	3,54	2,69	29,23	9,46		65,49	12,02	0,73	0,26	
6	320	4		82,7	16,54	3,48	2,65	25,10	9,38		72,12	13,03	0,80	0,33	
7	630	5		124,0	24,79	2,90	2,2088	20,51	9,284		107,57	19,12	1,34	0,23	
8	400	3		83,9	16,78	0,77	0,5831	13,61	9,248		72,65	12,83	0,90	0,19	
9	250	1		83,9	16,78	0,11	0,0836	8,923	9,24		72,64	12,81	0,70	0,32	
10	320	1		75,9	15,18	0,02	0,0189	4,243	9,237		65,7	11,58	0,78	0,27	
Сумма		29		915			39,98				801,82		8,75	3,20	

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



Рис. 11. Напряжения на шинах 0,4 кВ ТП в режиме минимальных нагрузок Fig. 11. Voltages on 0.4 kV TP buses in minimum load mode

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

Использование ПАРН

Для обеспечения допустимого значения уровня напряжения произведен расчет с установкой ПАРН-С-ВДТ/СН-1-300-10000 с пределами регулирования напряжения $\pm 25\%$ от номинального напряжения. В настоящее время в РФ ПАРН широко используются для решения проблем с качеством электроэнергии в распределительных сетях с протяженными и нагруженными ЛЭП 6-10 кВ. Учитывая значительные пределы регулирования напряжения ПАРН, вопросы с качеством электроэнергии при этом не возникают. Однако варианты использования ПАРН по цене оказываются сопоставимыми с вариантами строительства резервных ВЛ 6-10 кВ. При сравнении с вариантом использования ПБВ $\pm 10\%$ в данной работе рассматривались обозначенные выше критерии: полезный отпуск мощности и ее потери. В таблице 8 и на рисунке 12 представлены результаты расчета режима максимальных нагрузок электрической сети с использованием ПАРН.

Таблица 8
Table 8

Режим максимальных нагрузок электрической сети с ПАРН
Maximum load mode of the electrical network with PARN

Номер узла	Номер Стр	Длина участка, км	ВД Т, %	Заданная мощность узла		Потери мощности на участке		I уч, А	U уз, кВ	Uном	P узла стат.	Qузла стат.	Потери акт. мощности в трансф.	
				P уз, кВт	Q уз, кВАр	dP, кВт	dQ, кВАр						dPtx	dPtk
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0								10,70	10,00				
1	250	1		203	20,34	21,86	16,64	125,87	10,59		188,42	20,45	0,92	2,13
2	320	4		255	25,48	73,70	56,07	115,55	10,16		231,15	23,68	0,94	3,27
3	320	3		209	20,88	43,20	32,87	102,15	9,89		186,92	18,39	0,89	2,14
4	400	4		309	30,87	45,75	34,81	91,04	9,57		271,87	25,40	0,96	2,56
5	250	3		189	18,86	22,87	17,40	74,33	9,38		164,48	14,87	0,72	1,61
6	320	4	12	200	20	17,78	13,53	56,76	10,39		183,48	19,39	0,98	2,06
7	630	5		300	30	14,79	11,253	46,3	10,19		272,62	28,05	1,62	1,44
8	400	3		200	20	3,87	2,946	30,58	10,12		181,08	18,43	1,08	1,14
9	250	1		200	20	0,56	0,4227	20,06	10,1		180,93	18,37	0,84	1,96
10	320	1		180	18	0,12	0,0949	9,507	10,1		162,8	16,51	0,93	1,62
Сумма		29		2244			244,50				2023,73		9,88	19,93

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

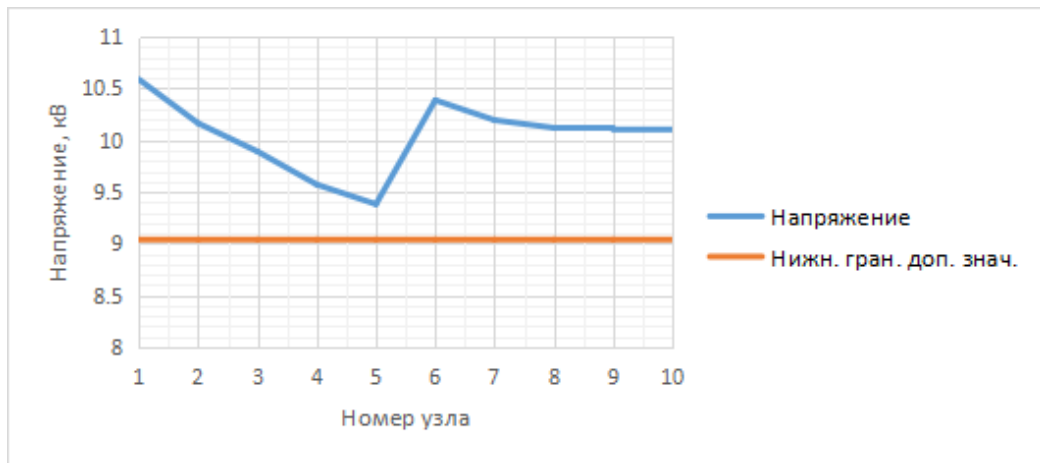


Рис. 12. Напряжения в узлах сети с ПАРН Fig. 12. Voltages in network nodes with PARN

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

ПАРН установлен перед узлом №6 и повышает напряжение в этом узле на 12% (табл. 8). Все ТП имеют трансформаторы с пределами регулирования напряжения ПБВ ±5 %. При этом обеспечиваются нормированные показатели качества электроэнергии во всех узлах.

Обсуждение (Discussion)

Последние строки таблиц 6 и 8 позволяют сформировать оценочную таблицу режимных характеристик рассматриваемых вариантов сети.

Таблица 9
Table 9

Режимные характеристики вариантов электрической сети
Operating characteristics of electrical network options

	Сеть с ПАРН	Сеть с ПБВ ±10%
Передаваемая в сеть мощность, кВт	2317	2291
Передаваемая полезная мощность, кВт	2023	2011
Потери мощности, кВт	294	280
Потери мощности, %	12,68	12,2

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

Таким образом, рассматриваемые варианты электрической сети с точки зрения полезной отпускаемой мощности и ее потерь практически равноценны. Некоторое

увеличение потерь мощности в варианте с ПАРН связано с потерями в самом вольтодобавочном трансформаторе. В то же время стоимость ПАРН составляет около 10 000 000 рублей. Стоимость трансформатора с ПБВ $\pm 10\%$ при использовании стандартных переключателей будет равна стоимости серийно выпускаемых в настоящее время трансформаторов с ПБВ $\pm 5\%$. Таким образом, заказанные новые трансформаторы с ПБВ $\pm 10\%$ заменяют существующие, в рассматриваемом случае, начиная с узла №7, трансформаторы с ПБВ $\pm 5\%$, которые сохраняют эксплуатационную пригодность и могут быть направлены на замену физически изношенных трансформаторов в других сетях, не требующих расширенного диапазона регулирования. Такая замена позволит исключить приобретение новых трансформаторов с ПБВ $\pm 5\%$ для замены изношенных в сетях, не требующих расширенного диапазона регулирования напряжения. Последнее обстоятельство позволяет принять капитальные затраты по замене трансформаторов близкими к нулю (остаются только расходы на монтажные работы). В таких условиях сравнение рассматриваемых вариантов по экономическим критериям, например, по сроку окупаемости, представляется нецелесообразным ввиду явного преимущества варианта с ПБВ $\pm 10\%$.

С технической точки зрения эксплуатация трансформаторов с расширенными пределами регулирования ПБВ не представляет каких-то дополнительных отрицательных последствий. Выбранное рабочее ответвление ПБВ существенно влияет на потери холостого хода трансформатора в соответствии с выражением:

$$\Delta P_{\text{ххр\text{аб}}} = \Delta P_{\text{ххном}} \left(\frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{р\text{аб}}}} \right)^2 \quad (15)$$

где: $\Delta P_{\text{ххр\text{аб}}}$ – потери холостого хода при рабочем ответвлении ПБВ; $\Delta P_{\text{ххном}}$ – потери холостого хода на ответвлении, соответствующему номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$; $U_{\text{р\text{аб}}}$ – напряжение, соответствующее выбранному рабочему ответвлению ПБВ.

Так, например, при выбранном ответвлении №5 (табл. 3) с процентом уменьшения напряжения на 10%, т.е. до 9 кВ потери холостого хода в соответствии с выражением (14) увеличатся на 23,4%. Однако, такие трансформаторы предназначены для установки в конце протяженных ЛЭП и к их первичным обмоткам во всех режимах подводятся пониженные напряжения. В рассматриваемом примере эти напряжения в узле №7, начиная с которого установлены трансформаторы с ПБВ $\pm 10\%$, равны 8,97 кВ и 9,28 кВ для режимов максимальных и минимальных нагрузок соответственно. Поэтому потери холостого хода в этих трансформаторах существенно не изменятся, как не изменятся и напряжения, подводимые к каждому витку первичных обмоток.

Остается открытым вопрос точности регулирования напряжения предлагаемыми трансформаторами, связанный не с пределами регулирования напряжения, а со ступенями такого регулирования. Однако, повышение количества регулировочных ответвлений ПБВ, как и вопрос целесообразности РПН на трансформаторах 6-10 кВ распределительных сетей связан с существенными изменениями конструкции указанных трансформаторов, требует отдельного исследования и выходит за рамки данной статьи.

Выводы (Conclusions)

Проведенное исследование демонстрирует, что оба рассмотренных метода – установка ПАРН и переход на трансформаторы с расширенным диапазоном ПБВ $\pm 10\%$ – позволяют решить ключевую задачу: поддерживать качество электроэнергии в пределах требований на всех узлах протяженной распределительной сети. Однако сравнительный анализ выявляет неоспоримые преимущества второго подхода.

Использование трансформаторов с ПБВ $\pm 10\%$ является не только технически эффективным, но и экономически оптимальным решением для подавляющего большинства типичных сетевых ситуаций. Его достоинство – близкий к нулевому срок окупаемости, достигаемый за счет ротации существующего парка оборудования без необходимости масштабных капиталовложений.

Таким образом, полученные результаты позволяют рекомендовать рассмотреть вопрос внедрения трансформаторов с ПБВ $\pm 10\%$ в качестве базового и достаточного мероприятия по регулированию напряжения в распределительных сетях 6-10 кВ, исключая установку дорогостоящих ПАРН. Учитывая, что в настоящее время трансформаторы с пределами ПБВ $\pm 10\%$ заводами изготовителями не выпускаются, электросетевым предприятиям необходимо рассмотреть целесообразность заказов таких трансформаторов.

При этом установку ПАРН следует рассматривать для случаев, когда по расчетным параметрам режимов невозможно обеспечить качественное электроснабжение с использованием трансформаторов с расширенными пределами регулирования ПБВ.

Литература

1. Группа компаний «РОССЕТИ». Стандарт организации СТО 34.01-3.2.17-014.1-2020 «Методические указания по применению вольтодобавочных трансформаторов (пунктов регулирования напряжения) 6-20 кВ и вольтодобавочных трансформаторов 0,4 кВ в линиях электропередачи распределительных сетей». Том 1.1. Методические указания. Стандарт организации. Дата введения: 04.03.2020.
2. АО «Сетевая компания». Интегрированный годовой отчет 2024. [Электронный ресурс]. <https://gridcom-rt.ru/upload/iblock/7e2/8kej5fgkvui161iozmguwfx2knqcnw4/GO%202025-3-Release-3.pdf>. Режим доступа: (дата обращения 04.11.2025)
3. Борисов Д. А., Максимов В.В., Воркунов О.В., Куракина О.Е. Методика прогнозирования нагрузки в электроэнергетических системах: алгоритм эффективного управления // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27, № 6. С. 99-111.
4. Петрова Р.М., Грачева Е.И. Оценка параметров надежности схем электроснабжения с трансформаторными подстанциями при выполнении технико-экономических расчетов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 17, № 2(66). С. 3-18.
5. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А. Энергосберегающее регулирование напряжения в узлах нагрузки // Новости электротехники. 2018. №5. С. 56-60.
6. Коноплев Н.Е., Компанец Б.С. Снижение потерь электроэнергии на участке сети путем оптимизации уровня напряжения методом штрафных функций // Вестник ПНИПУ, Барнаул. 2023. №48. С. 50-71.
7. РД-34.09.254 «Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений» (дата актуализации – 01.01.2021 г.).
8. Перинский Т.В. Увеличение пропускной способности ВЛ 6-10 кВ // Третья Российская с международным участием научно-практическая конференция. Линии электропередачи 2008. Новосибирск. 2008. С.226-228.
9. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А. Зависимость напряжения и потерь мощности от напряжения. Реальность повышения потребления электроэнергии // Новости электротехники. 2018. №2. С. 48-53.
10. Сухие силовые трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой. [Электронный ресурс]. <https://svel.ru/catalog/sukhie-transformatory/sukhie-silovye-transformatory/silovoy-transformator-s-rpn>. Режим доступа: (дата обращения 15.10.2025)
11. Яхин Ш.Р., Пигалин А.А., Галиев И.Ф., Маклецов А.М. Анализ нагрузочных режимов и регулировочной способности по напряжению распределенной сети при оптимизации секционирования на ее участках / Энергоэнергия. Передача и распределение. 2024. №1. С. 34-42.
12. Galiev I.F., Garifullin M.S., Alekseev I.P. [et al.]. Development of an integrated expert system for distribution network diagnostics based on artificial intelligence technology // International Russian Smart Industry Conference. 2023. pp. 6-14, doi: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110786.
13. M. Nijhuis, M. Gibescu и JFG Cobben, Incorporation of on-load tap changer transformers in low-voltage network planning. // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. 2016. pp. 1–6.
14. Modelling and Aggregation of loads in flexible Power Networks // CIGRE WG C4.605, 214. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/315664589> (дата обращения 01.11.2024)
15. Балдов С.В., Бушуева О.А., Кормилицин Д.Н. [и др.]. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой // Вестник ИГЭИ. 2014. Вып. 6. С.34-44.
16. Хрущев Ю.В., Панкратов А.В., Бацева Н.Л. [и др.] Методики идентификации статистических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента // Известия ТПУ. Техника и технологии в энергетике. 2014. Т. 325, № 4. С.164-174.
17. Банных П.Ю., Бартоломей П.И., Бураков Г.Е. [и др.]. Расчет технических потерь электрической энергии в распределительных электрических сетях с учетом статических характеристик нагрузки // Энергоэнергия. Передача и распределение. 2024. №3. С. 34-45.
18. Chend C.S., Shirmohammadi D. A Three-phase power flow solution method for real-time analysis distribution system analysis // IEEE Transactions on Power Systems. 1995. Vol. 18. No4. pp. 1283-1290.
19. Аюев Б.И. Давыдов В.В., Ерохин П.М., В.Г. и др. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах // Москва: Флинта: Наука. 2008. 256 с.

20. Свеженцова О.В., Умнова М.О. Расчет установившихся режимов радиальной электрической сети на напряжении 0,4 кВ интервальным методом // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. 2015. № 3 (98). С. 215-222.

Авторы публикации

Фарраев Азат Ильгизович – аспирант кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *farraev99@mail.ru*

Маклецов Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *mac.am@mail.ru*

Максимов Виктор Владимирович – канд. техн. наук, заведующий кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *viktor.maksimov.1968@mail.ru*

Куракина Ольга Евгеньевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *random_jj@mail.ru*

References

1. Rosseti Group of Companies. Organization Standard STO 34.01-3.2.17-014.1-2020 "Guidelines for the Use of 6-20 kV Voltage-Adding Transformers (Voltage Regulation Points) and 0.4 kV Voltage-Adding Transformers in Power Transmission Lines of Distribution Networks". Volume 1.1. Methodical instructions. The standard of the organization. Date of introduction: 04.03.2020.
2. Grid Company JSC. Integrated Annual Report 2024 [Electronic resource]. <https://gridcom-rt.ru/upload/iblock/7e2/8kej5fgkvui161iozmgufjx2knqcnw4/GO%202025-3-Release-3.pdf> Access mode: (accessed 04.11.2025)
3. Borisov D. A., Maksimov V. V., Vorkunov O. V., Kurakina O. E. Methodology for forecasting the load in electric power systems: an algorithm for effective control // *News of higher educational institutions. Problems of energy*, 2025. Vol. 27, No. 6. pp. 99-111.
4. Petrova R.M., Gracheva E.I. Assessment of reliability parameters of power supply schemes with transformer substations when performing technical and economic calculations // *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2025. Vol. 17, No. 2(66). pp. 3-18.
5. Kuchumov L.A., Kuznetsov A.A. Energy-saving voltage regulation in load nodes // *Electrical engineering news*. 2018. №5. pp. 56-60.
6. Konoplev N.E., Kompaneets B.S. Reduction of electricity losses in the network section by optimizing the voltage level by the method of penalty functions // *Vestnik PNRPU, Barnaul*, 2023. No48. pp. 50-71.
7. RD-34.09.254 Instructions for reducing the technological consumption of electric energy for transmission through electric grids of power systems and power associations (updated on 01.01.2021).
8. Perinsky T.V. Increase in the throughput capacity of 6-10 kV overhead lines. The Third Russian Scientific and Practical Conference with International Participation // *Power Transmission Lines, Novosibirsk*. 2008. pp. 226-228.
9. L.A., Kuznetsov A.A. Dependence of voltage and power losses on voltage. The reality of increasing electricity consumption // *Electrical engineering news*. 2018. №2. pp. 48-53.
10. Dry-type power transformers with voltage regulation under load [Electronic resource]. <https://svel.ru/catalog/sukhie-transformatory/sukhie-silovye-transformatory/silovoy-transformator-s-rpn> Access mode: (accessed 15.10.2025)
11. Yakhin Sh.R., Pigalin A.A., Galiev I.F., Makletsov A.M. Analysis of load modes and voltage control capacity of a distribution network when optimizing sectioning in its sections // *Electric power. Transmission and distribution*. 2024. №1. pp. 34-42.
12. Galiev I.F., Garifullin M.S., Alekseev I.P. and others. Development of an integrated expert system for distribution network diagnostics based on artificial intelligence technology // *International Russian Smart Industry Conference*. 2023. pp. 6-14, doi: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110786.
13. M. Nijhuis, M. Gibescu и JFG Cobben, Incorporation of on-load tap changer transformers in low-voltage network planning. // *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*. 2016. pp. 1–6.

14. Modelling and Aggregation of loads in flexible Power Networks. CIGRE WG C4.605, 214. [Electronic resource]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/315664589> Access mode: (accessed 01.11.2024)
15. Baldov S.V., Bushueva O.A., Kormilitsin D.N. [et al.]. Determination of Static Characteristics of Voltage Load in Electric Networks with Complex Load // *Bulletin of IGEI*. 2014. Iss. 6. pp.34-44.
16. Khrushchev Yu.V., Pankratov A.V., Batseva N.L. [et al.] Methods for Identification of Statistical Characteristics of Load Based on the Results of Active Experiment // *Proceedings of TPU. Engineering and Technology in the Energy Sector*. 2014. T. 325. No 4. pp. 164-174.
17. Bannykh P.Yu., Bartolomei P.I., Burakov G.E. [et al.] Calculation of technical losses of electric energy in distribution electric networks taking into account the static characteristics of the load. Electric power // *Transmission and distribution*. 2024, №3. pp. 34-45.
18. Chend C.S., Shirmohammadi D. A Three-phase power flow solution method for real-time analysis distribution system analysis // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1995. Vol. 18. No4. pp. 1283-1290.
19. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erokhin P.M., Neuymin V.G. Computational Models of Flow Distribution in Electric Systems // *Moscow: Flint: Nauka*, 2008. 256 p.
20. Svezhentsova O.V., Umnova M.O. Calculation of steady-state modes of radial electric network at 0.4 kV voltage by interval method // *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2015. № 3 (98). pp. 215-222.

Authors of the publication

Azat I. Farraev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. farraev99@mail.ru

Alexander M. Makletsov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. mac.am@mail.ru

Viktor V. Maksimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. viktor.maksimov.1968@mail.ru

Olga E. Kurakina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. random_jj@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **22.01.2026 г.**

Отредактировано **28.01.2026 г.**

Принято **11.02.2026 г.**



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОЗАРЯДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ РОССИИ: АНАЛИЗ ЗНАЧИМОСТИ ФАКТОРОВ

Воронин В.А.

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени
Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, Россия
voroninva@kuzstu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ исследования заключается в проведении комплексного анализа влияния ключевых параметров парка электротранспорта (ЭТ) и электрозарядной инфраструктуры (ЭЗИ) на потребление электроэнергии и мощности электроэнергетической системы России в средне- и долгосрочной перспективе. В отличие от существующих исследований, акцент сделан не только на прогнозе количества ЭТ, но и на сценарном анализе широкого спектра влияющих факторов. МЕТОДЫ. Для расчета электропотребления и максимальной мощности ЭЗИ по всем городам России с населением свыше 50 тыс. человек разработана математическая модель. Модель учитывает региональное распределение парка ЭТ, его структуру и модельный состав, климатические условия, характеристики ЭЗИ и поведенческие факторы. Оценка значимости факторов выполнена с помощью множественной линейной регрессии. РЕЗУЛЬТАТЫ. Установлено, что при парке ЭТ в 1 млн единиц вариация влияющих факторов может приводить к изменению электропотребления ЭЗИ в диапазоне от 0,14 % до 0,62 %, а максимума мощности – от 0,09 % до 2,26 % от показателей ЕЭС России 2024 года. Наибольшее влияние на максимум мощности оказывают параметры ЭЗИ: количество ЭТ на одну зарядную станцию (ЭЗС) (37,1 %) и доля быстрых ЭЗС (20,8 %), а также доля подключаемых гибридов (23,7%). На электропотребление наиболее значительно влияют доля подключаемых гибридов (32,3 %), коэффициент их использования (26,3 %) и доля электробусов в парке (21,6 %). Прогноз до 2050 года показывает, что электропотребление ЭЗИ может составить 8,13-11,85%, а максимум мощности – 11,54-16,81% от уровней 2024 года.

Ключевые слова: электромобили; электрозарядная инфраструктура электротранспорта; электрозарядные станции; прогнозирование; электроэнергетическая система.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082/2).

Для цитирования: Воронин В.А. Исследование влияния электрозарядной инфраструктуры электротранспорта на электроэнергетическую систему России: анализ значимости факторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 70-88. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-70-88.

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE ON THE RUSSIAN POWER SYSTEM: FEATURE IMPORTANCE ANALYSIS

Voronin V.A.

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russia
voroninva@kuzstu.ru

Abstract: THE PURPOSE. The purpose of this study is to conduct a comprehensive analysis of the impact of key parameters of the electric vehicle (EV) fleet and electric vehicle charging infrastructure (EVCI) on electricity consumption and peak power demand in Russia's power system in the medium and long term. In contrast to existing research, the focus is not only on forecasting the number of EVs but also on a scenario-based analysis of a wide range of influencing factors. **METHODS.** A mathematical model was developed to calculate the electricity consumption and maximum power demand of EVCI for all Russian cities with a population exceeding 50,000. The model accounts for the regional distribution of the EV fleet, its structure and model composition, climatic conditions, EVCI specifications, and behavioral factors. The significance of the factors was assessed using multiple linear regression. **RESULTS.** It was found that for an EV fleet of 1 million units, the variation in influencing factors can lead to changes in EVCI electricity consumption ranging from 0.14% to 0.62%, and in peak power demand from 0.09% to 2.26% of the 2024 levels of Russia's Unified Energy System (UES). The EVCI parameters have the greatest impact on peak power demand: the number of EVs per charging station (37.1%) and the share of fast chargers (20.8%), along with the share of plug-in hybrid electric vehicles (23.7%). Electricity consumption is most significantly influenced by the share of plug-in hybrids (32.3%), their utilization rate (26.3%), and the share of electric buses in the fleet (21.6%). The forecast up to 2050 shows that EVCI electricity consumption could reach 8.13-11.85%, and peak power demand could reach 11.54-16.81% of the 2024 levels.

Keywords: electric vehicles; electric vehicle charging infrastructure; electric vehicle charging stations; forecasting; power system.

Acknowledgments: This research was supported by the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant number 075-03-2024-082/2.

For citation: Voronin V.A. Investigation of the impact of electric vehicle charging infrastructure on the Russian power system: feature importance analysis. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 70-88. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-70-88.

Введение (Introduction)

Глобальное потребление электрической энергии (ЭЭ) электротранспортной инфраструктуры электротранспорта (ЭЭИ) в 2024 году составило около 180 ТВт·ч, т.е. порядка 0,7 % от мирового электропотребления, а к 2030 году эта доля может возрасти до 2,5 % [1]. По оценкам IRENA [2], к 2040 году потребление ЭЭ ЭЭИ может достичь 3200-4590 ТВт·ч, при этом рост пиковой нагрузки составит 9-20 %.

Рынок электротранспорта (ЭТ) и ЭЭИ в Российской Федерации находится на начальном этапе развития. По состоянию на середину 2025 года в России зарегистрировано порядка 65,2 тыс. электромобилей и 73,2 тыс. подключаемых гибридов [3]. По различным оценкам в масштабах энергосистемы годовое электропотребление ЭЭИ составляет всего 0,005-0,045 % [4, 5], однако в будущем прогнозируется увеличение этой доли до 1,41-18,38 % в 2030 году и 12,30-35,34 % в 2050 году [6, 7].

Для рационального планирования развития ЭЭИ и разработки решений для снятия возможных ограничений на технологическое присоединения электротранспортных станций электромобилей (ЭЭС) к электрической сети важна оценка ожидаемого роста нагрузок со стороны ЭЭИ. Однако рынок ЭТ и ЭЭИ характеризуется множеством параметров, влияющих на уровень электропотребления. Как будет показано в литературном обзоре, существующие прогнозы развития рынка ЭТ в России являются в высокой степени неопределенными, а многие параметры парка ЭТ и ЭЭИ не учтены, что затрудняет оценку ожидаемого роста нагрузок на электросетевой комплекс. В связи с этим, целью настоящего исследования является анализ значимости влияния параметров парка ЭТ и ЭЭИ на величину потребления ЭЭ и мощности энергосистемы Российской Федерации.

В отличие от существующих исследований, опирающихся в прогнозах развития рынка ЭТ главным образом на количество электромобилей, в данной работе проводится сценарный анализ ожидаемых электрических нагрузок ЭЭИ в зависимости от значений таких параметров парка ЭТ и ЭЭИ, как: структура парка ЭТ, доля электротакси в таксопарке, доля подключаемых гибридов, коэффициент использования подключаемых гибридов, количество ЭТ на ЭЭС, доля быстрых ЭЭС и доля владельцев ЭТ с доступом к

домашней ЭЭС.

Литературный обзор (Literature Review)

На сегодняшний день основным нормативным документом, определяющим планы развития рынка ЭТ в России является Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года (далее – Концепция) [8], утвержденная в 2021 году. Прогноз развития рынка ЭТ выполнен для трех сценариев (инерционный, сбалансированный, ускоренный) и предусматривает достаточно широкий диапазон вариации размера парка ЭТ в 2030 году от 514 тыс. до 3,43 млн шт. Стоит отметить, что по состоянию на середину 2025 года, развитие рынка ЭТ в России соответствует инерционному сценарию Концепции.

За прошедшие годы множество авторов провели собственные исследования для расширения и уточнения прогноза Концепции. В таблице 1 представлен обзор прогнозов развития рынка ЭТ и ЭЗИ, опубликованных в период с 2021 по 2025 гг.

Таблица 1

Table 1

Обзор прогнозов развития рынка электромобилей в России
Overview of forecasts for the development of the electric vehicle market in Russia

Ссылка	Год публикации прогноза	Прогноз размера парка ЭТ по годам (тыс. шт.)				
		2030	2035	2040	2045	2050
[8]	2021	540–3430	-	-	-	-
[9]	2021	1500–3600	-	-	-	-
[10]	2022	2671–6143	8120–12900	-	-	-
[11]	2022	126–5820	-	-	-	-
[12]	2023	137–688	-	-	-	-
[13]	2023	990.46	-	5400	-	5600
[6]	2023	1480	-	9101–22903	-	16753-44356
[14]	2024	446-1093	-	-	-	-
[15]	2024	700-1100	-	-	5800-13600	-
[7]	2024	12000	-	27000	-	42000
[16]	2024	252-756	-	669-2008	-	1166-3497
[17]	2025	628,3-973.5	1213,5-3151	-	-	-

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

Прогнозы размера парка ЭТ (табл. 1) дополнительно приведены на рисунке 1.

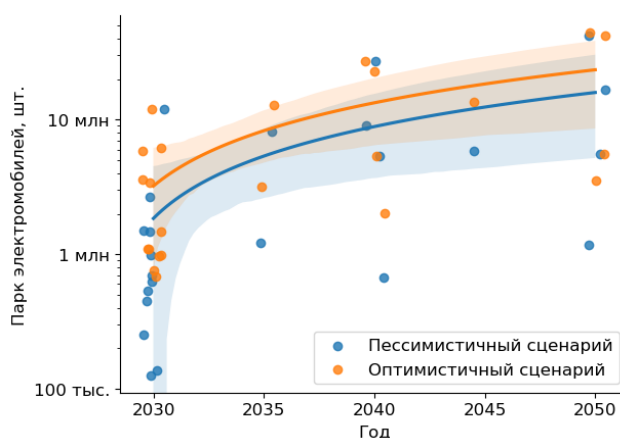


Рис. 1. Прогнозы развития рынка электротранспорта России до 2050 года, выполненные разными авторами (табл. 1)

Fig. 1. Forecasts of electric transport market development in Russia until 2050, produced by different authors (Table 1)

*Источник: [6-17] Source: [6-17].

Как следует из представленных данных (табл. 1, рис. 1), прогнозы развития рынка ЭТ, выполненные разными авторами, существенно различаются: среднее отклонение прогнозов на 2030 год составляет более 100 %. Кроме того, диапазоны изменения размера парка ЭТ между пессимистичным и оптимистичным сценариями могут достигать 600 % и более, что говорит об очень высокой степени неопределенности развития рынка ЭТ в России.

На основании анализа представленных данных получены следующие

агрегированные оценки ожидаемого размера парка ЭТ:

– 2030 год: от 126 тыс. до 12 млн шт. (среднее: от 1789 тыс. до 3172 тыс. шт.; медиана: от 664 тыс. до 1290 тыс. шт.);

– 2040 год: от 669 тыс. до 27 млн шт. (среднее: от 10,54 млн до 14,32 млн шт.; медиана: от 7,25 млн до 14,15 млн шт.);

– 2050 год: от 1166 тыс. до 44 млн шт. (среднее: от 16,38 млн до 23,86 млн шт.; медиана: от 11,17 млн до 23,80 млн шт.).

В большинстве работ выполнен прогноз размера парка ЭТ, но не уделено достаточного внимания другим важным показателям, характеризующим парк ЭТ и ЭЗИ. В ряде работ рассматривается структурный состав парка ЭТ с детализацией количества легковых электромобилей, ЛКТ, электробусов и грузовых электромобилей: возможная доля ЛКТ оценивается до 18 %; электробусов – до 10 %; грузовых ЭТ – до 15 %. В отдельных работах отмечаются показатели ЭЗИ – количество ЭТ на одну ЭЗС и доля быстрых ЭЗС, которые составляют от 7 до 36,7 ЭТ на одну ЭЗС при доле быстрых ЭЗС от 15 % до 60 %.

Также важным параметром парка ЭТ является доля электротакси в таксопарке. Согласно докладу автономной некоммерческой организации «Международный Евразийский форум «Такси» [18], по состоянию на 2025 год в 37 % регионов России в таксопарках имеются электромобили, примерное количество электромобилей в такси составляет 1850 шт. (около 2,84 %).

Следует также отметить, что в ни одном из прогнозов не рассматривается рынок подключаемых гибридов. В связи с этим, влияние парка подключаемых гибридов на электроэнергетическую систему России остается недостаточно исследованным.

Для определения возможных диапазонов вариации основных показателей парка ЭТ и ЭЗИ важно проанализировать международный опыт. На рисунках 2 и 3 представлены диаграммы основных параметров парк ЭТ (структурный состав, доля подключаемых гибридов) и ЭЗИ (количество ЭТ на одну ЭЗС, доля быстрых ЭЗС) в разных странах мира, построенные на основе данных IEA [19].

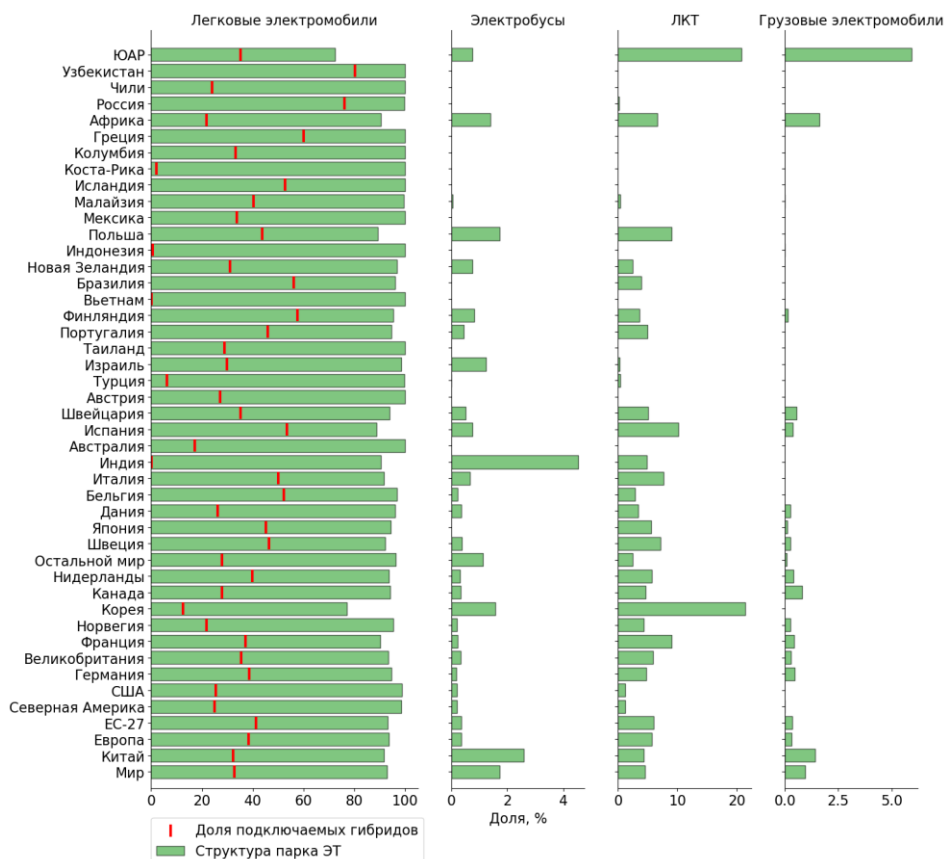


Рис. 2. Столбчатая диаграмма структурного состава парка ЭТ в разных странах мира [19]: (а) легковые электромобили; (б) легкий коммерческий транспорт; (в) электробусы; (г) грузовые электромобили

Fig. 2. Bar chart of the structural composition of electric transport fleets in different countries worldwide: (a) passenger electric vehicles; (b) light commercial vehicles; (c) electric buses; (d) electric trucks

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

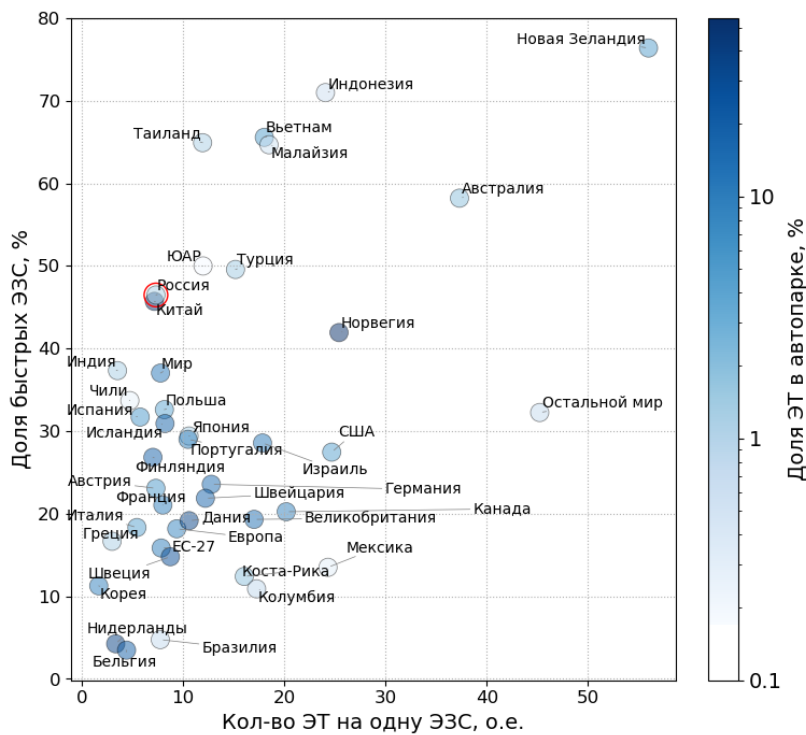


Рис. 3. Диаграмма рассеяния количества ЭТ на одну ЭЭС и доли быстрых ЭЭС в разных странах мира

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

Как следует из рисунков 2 и 3, структура парка ЭТ и ЭЗИ значительно различается в разных странах:

- количество ЭТ на одну ЭЭС варьируется от 1,68 в Корее до 56 в Новой Зеландии (среднемировой показатель – 7,78);
- доля быстрых ЭЭС варьируется от 3,41 % в Бельгии до 76,38 % в Новой Зеландии (среднемировой показатель – 37 %)
- наибольшая доля электробусов достигает 4,53 % в Индии; ЛКТ – до 21,39 % в Корее; грузовых электромобилей – до 5,93 % в Южной Африке.

На сегодняшний день ЭЗИ Российской Федерации характеризуется следующими показателями [20]: 7,33 ЭТ на одну ЭЭС; доля быстрых ЭЭС – 46,5 %. По данным показателям мы находимся ближе всего к таким странам, как Китай, ЮАР, Турция.

Стоит отметить, что показатели могут также существенно различаться между отдельными городами внутри страны. Например, в работе [21] выполнен прогноз развития парка ЭТ и ЭЗИ на примере Москвы. По результатам анализа оптимальное количество ЭЭС на 1000 электромобилей в Москве составило 16,7 для быстрых и 97,1 для медленных ЭЭС. При этом в крупных городах мира эти показатели варьируются в достаточно широких пределах от 20,4 (Пекин) до 1428,6 (Амстердам) ЭТ на одну медленную ЭЭС и от 5,7 (Осло) до 59,9 (Шанхай) ЭТ на одну быструю ЭЭС.

Согласно прогнозу развития ЭЗИ до 2030 года, представленному в отчете IEA [1], домашний заряд останется предпочтительным способом заряда ЭТ. В период с 2025 по 2030 гг. ожидается ввод около 150 млн ЭЭС по всему миру, около 67 % которых будут являться домашними ЭЭС. При этом к 2030 году из 205 млн ЭЭС около 132 млн (64,3 %) будут относиться к домашним ЭЭС.

Согласно [22], в США 86 % владельцев ЭТ имеют доступ к домашней ЭЭС, однако, порядка 59,6 % продолжают использовать общественную ЭЗИ еженедельно. Прогноз развития ЭЗИ США предусматривает 28 млн ЭЭС в 2030 году, из которых 25,7 млн (91,7 %) домашние ЭЭС.

По данным [23], в среднем около 50 % зарядных сессий выполняются дома. В отдельных странах эта доля составляет: США – 48 %; Великобритания – 52 %; Германия – 46 %; Франция – 46 %; Швеция – 57 %; Дания – 53 %; Нидерланды – 48 %.

Однако доступность домашних ЭЭС в значительной степени определяется жилищными условиями владельцев ЭТ. Например, в Китае высокая доля населения проживает в многоквартирных домах (МКД), что затрудняет установку индивидуальной

домашней ЭЭС. Доступ к домашней ЭЭС в Китае имеет всего порядка 31 % владельцев ЭТ. В то же время, в Великобритании доля населения, проживающая в квартирах МКД, менее 25 %, а доступность домашнего заряда – 90 % [24]. В России порядка 59-64,3 % владельцев ЭТ имеют доступ к домашней ЭЭС, а доля домашних зарядных сессий составляет 72 % [25, 26].

Представленный литературный обзор позволяет определить диапазоны прогнозных значений размера парка ЭТ, а также установить диапазоны изменения основных параметров парка ЭТ и ЭЗИ в разных странах мира и выявить особенности развития отечественного рынка ЭТ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для анализа влияния параметров парка ЭТ и ЭЗИ на электроэнергетическую систему разработана математическая модель, структурная схема которой показана на рисунке 4.

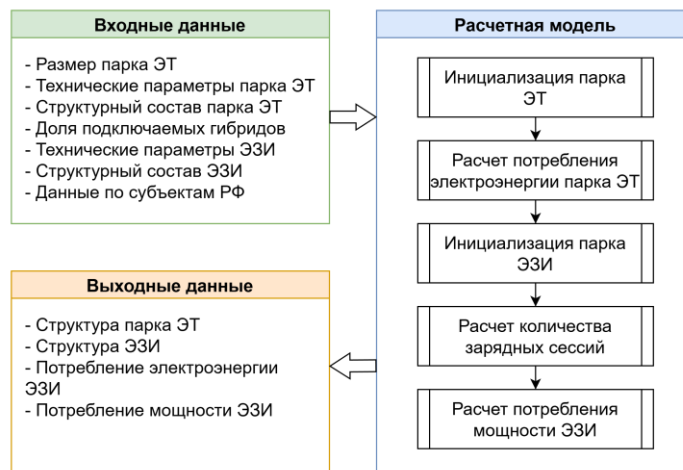


Рис. 4. Структурная схема математической модели Fig. 4. Structural diagram of the mathematical model

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

Результатом расчета является суммарный отпуск электроэнергии на заряд парка ЭТ и максимальная потребляемая мощность ЭЗИ для каждого города Российской Федерации с населением более 50 тыс. человека.

На первом этапе расчета выполняется инициализация парка ЭТ и его распределение по субъектам Российской Федерации. Для регионального распределения использованы открытые данные о региональном составе парка ЭТ [27], а также сведения о населении и количестве легковых автомобилей [28] (табл. 2).

Таблица 2 Table 2

Варианты регионального распределения парка ЭТ Options for regional distribution of the electric vehicles fleet

№	Наименование субъекта	а) ДВС, %	б) ЭТ, %
1	Дальневосточный ФО	5,90	12,50
2	Приволжский ФО	20,00	9,60
3	Северно-западный ФО	10,10	9,30
4	Северно-кавказский ФО	5,00	1,70
5	Сибирский ФО	11,30	13,50
6	Уральский ФО	8,90	6,10
7	Южный ФО	10,10	9,50
8	Центральный ФО	28,80	37,80
9	в т.ч. Москва	8,70	24,67
10	в т.ч. Московская область	6,20	7,72

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

Анализ показал, что распределение ЭТ по отдельным регионам значительно отличается от распределения автомобилей с ДВС. Наибольшие различия наблюдаются в Дальневосточном, Приволжском, Северо-Кавказском и Центральном федеральных округах (ФО). Наблюдаемые различия могут объясняться логистикой поставок ЭТ

(большое количество японских ЭТ на Дальнем востоке), уровнем доходов населения и климатическими факторами. Однако с ростом парка и широким распространением ЭТ региональное распределение может стремиться к распределению автомобилей с ДВС. В связи с этим, расчет выполнен для двух вариантов регионального распределения, представленных в таблице 2.

Региональное распределение парка ЭТ выполняется в два этапа: между федеральными округами на основании долей, приведенных в таблице 2; между городами (отдельно для каждого федерального округа) на основании распределения автомобилей с ДВС (ввиду отсутствия иных данных).

На втором этапе выполняется расчет потребления ЭЭ всего парка согласно следующему выражению:

$$W_r = \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^m \left[M_{r,i} \sum_{j=1}^k (UF_{i,j} C_{r,i,j} N_{r,i,j}) \right], \quad (1)$$

где W_r – годовое потребление ЭЭ парка ЭТ региона r , кВт·ч; η – КПД заряда батареи (принято равным 0,95), о.е.; m – количество категорий транспортных средств (ТС), шт.; k – количество типов ЭТ, шт. (легковое ТС, ЛКТ, электробус, грузовое ТС); $M_{r,i}$ – годовой пробег ТС категории i в регионе r , км; $C_{r,i,j}$ – средний расход заряда батареи ЭТ типа j категории i в регионе r , кВт·ч/км; $N_{r,i,j}$ – количество ЭТ типа j категории i в регионе r , шт.; $UF_{i,j}$ – коэффициент использования подключаемого гибрида типа j категории i (для электромобилей равен 1), о.е.

Значения годового пробега ТС $M_{r,i}$ принято согласно приложению №8 Положения Банка России «О единой методике определения размера расходов на восстановительный ремонт в отношении поврежденного транспортного средства» [29]. В документе представлены справочные данные о среднегодовых пробегах ТС следующих категорий (для всех субъектов Российской Федерации): легковые ТС физических лиц; легковые ТС юридических лиц; грузовые ТС; такси и автобусы.

Средний расход заряда батареи ЭТ $C_{r,i,j}$ принят на основании средневзвешенных значений технических параметров наиболее распространенных моделей ЭТ в России по данным [30] для следующих типов ЭТ: легковые ТС; ЛКТ; электробусы; грузовые ТС (табл. 3). Технические параметры легковых ЭТ и ЛКТ приняты по данным портала *ev database* [31], для определения параметров электробусов выполнено усреднение характеристик отечественных моделей КАМАЗ-6282, КАМАЗ-6292, ЛиАЗ-6274, Volgabus-5270.E0, для грузовых ЭТ использовались параметры моделей BROCK 75, BROCK 160, Dongfeng Captain-T.

Расход заряда батарей скорректирован с учетом среднегодовой температуры воздуха рассматриваемого региона. Зависимость расхода заряда батарей ЭТ от температуры воздуха носит U-образный характер с минимумом в районе 21°C [32]. Электропотребление ЭТ в основном определяется энергией, необходимой для приведения ЭТ в движение, а также работой электроприемников собственных нужд, к которым относятся: система отопления, вентиляции и кондиционирования, система управления температурой батареи и прочие электроприемники (освещение, развлекательные системы, навигация и т.д.). В работе [32] показано, что электропотребление ЭТ в диапазоне температур от 0 до 32°C в основном определяется работой системы отопления, вентиляции и кондиционирования. Снижение температуры воздуха с 28 °C до -22 °C приводит к увеличению электропотребления ЭТ на 233 % [33]. Следует отметить, что характер зависимости электропотребления от температуры воздуха в указанном диапазоне температур близок к линейному. В связи с этим, в настоящей работе для уточнения влияния температуры воздуха на электропотребление ЭТ используется линейная зависимость, построенная по двум известным значениям удельного электропотребления (по данным портала *ev database* [31]) при температуре воздуха 23 °C и -10 °C (табл. 3).

Среднегодовая температура воздуха в регионах Российской Федерации может варьироваться в широких пределах от -8,51 °C (Норильск) до 15,06 °C (Новороссийск), что приводит к значительному изменению среднего расхода заряда батарей ЭТ – более 40 Вт·ч/км (22,26 % относительно среднего значения). Среднегодовая температура воздуха регионов принята на основании усреднения данных NASA POWER за период с 01.01.2020 по 01.01.2025.

В связи с ограниченным распространением подключаемых гибридов в категориях ЛКТ, электробусов и грузовых ТС, как в настоящее время, так и в прогнозах до 2030 года (по данным IEA [24]), в расчете принято, что подключаемые гибриды используются

только как легковые ТС физических лиц.

Важным параметром подключаемых гибридов является коэффициент использования (UF). Под коэффициентом использования понимают отношение пробега, пройденного только за счет заряда батареи, к общему пробегу ТС. Величина коэффициента использования зависит от полностью электрического запаса хода гибрида (all-electric range) и зарядного поведения. Согласно [34], реальный коэффициент использования гибридных транспортных средств в среднем составляет порядка 0,37-0,54. В работе [35] выполнено исследование влияния зарядного поведения, пробега и запаса хода на коэффициент использования подключаемых гибридов. Полученные в данной работе зависимости используются в настоящем исследовании для определения диапазона изменения коэффициента использования подключаемых гибридов.

Таблица 3
Table 3

Средневзвешенные параметры наиболее распространенных моделей ЭТ в России
Weighted average parameters of the most demanded electric vehicles models in Russia

№	Тип ТС	Емкость батареи, кВт·ч	Средний расход заряда батареи, Вт·ч/км		Мощность заряда, кВт	
			Теплая погода (+23 °C)	Холодная погода (-10 °C)	Медленный заряд	Быстрый заряд
1	Легковые электромобили	76,48	150,72	207,34	13,54	141,99
2	ЛКТ	81,04	223,60	287,60	11,00	137,00
3	Электробусы	344,94	1568,62	2147,59	21,67	231,17
4	Грузовые электромобили	125,25	371,24	508,26	10,75	60,43
5	Легковые подключаемые гибриды	38,55	194,59	251,20	6,87	83,57

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

На третьем этапе выполняется инициализация парка ЭЗИ, определение загрузки ЭЗИ и расчет потребления мощности. Расчет количества ЭЗС выполняется на основании заданного количества ЭТ на одну ЭЗС, а структурный состав ЭЗИ определяется по заданной доле быстрых ЭЗС.

Номинальные мощности ЭЗС приняты по результатам обследования ЭЗИ в крупных городах Российской Федерации на основании сведений, размещенных в картографических сервисах 2ГИС и 2chargers (сбор данных выполнен в 2024 году для 46 городов, в т.ч. Москвы и Санкт-Петербурга). По результатам анализа собранных данных установлена структура номинальных мощностей ЭЗС, представленная на рисунке 5.

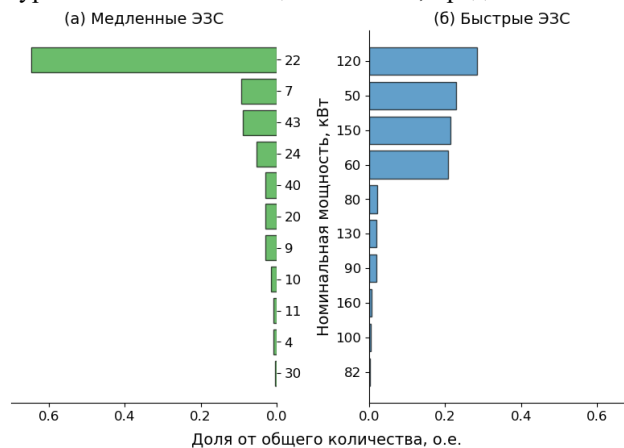


Рис. 5. Структура номинальных мощностей медленных (а) и быстрых (б) ЭЗС
Fig. 5. Structure of the rated power of slow (a) and fast (b) charging stations

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

Потребление мощности ЭЗИ определяется по выражению:

$$P_{\max,r} = K_{nc} \sum_{g=1}^G P_{\text{ном},g} n_g K_{c,g} (P_{\text{ном},g}, n_g, s_g) K_{и,g}, \quad (2)$$

где $P_{\max,r}$ – расчетный максимум нагрузки ЭЗИ в регионе r , кВт; $P_{\text{ном},g}$ – номинальная мощность g -й группы ЭЭС, кВт; n_g – размер g -й группы ЭЭС, шт.; s_g – среднее количество сессий в сутки g -й группы ЭЭС, шт.; $K_{c,g}(P_{\text{ном},g}, n_g, s_g)$ – коэффициент спроса g -й группы ЭЭС, о.е.; $K_{н,g}$ – коэффициент использования g -й группы ЭЭС, о.е. (определяется на основании соотношения между максимальной мощностью заряда ЭТ и номинальной мощностью ЭЭС); $K_{нс}$ – коэффициент несовпадения максимумов нагрузки разнородных групп ЭЭС, о.е.; G – количество рассматриваемых групп ЭЭС, шт.

Расчет коэффициента спроса для ЭЭС $K_{c,g}$ выполнен на основании методики, предложенной в работе [36]. Согласно данной методике, коэффициент спроса определяется на основании номинальной мощности, количества зарядных портов и среднего числа сессий в сутки группы ЭЭС. Коэффициент несовпадения максимумов нагрузки разнородных групп ЭЭС $K_{нс}$ принят равным 0,868 согласно [36]. Для расчета среднего числа сессий в сутки используется следующее выражение:

$$s = \frac{W_j}{E_j DoD}, \quad (3)$$

где W_j – годовой отпуск электроэнергии на заряд ЭТ группы j , кВт·ч; E_j – средневзвешенная емкость батареи ЭТ группы j , кВт·ч; DoD – глубина разряда батареи (принято равной 0,8).

Диапазоны изменения параметров парка ЭТ и ЭЗИ, рассмотренные при моделировании, приведены в таблице 4. Для каждой переменной (кроме «Параметры ЭТ») указано три варианта значения (соответствующих трем возможным сценариям): первое значение соответствует нижнему пределу изменения рассматриваемого параметра; второе значение соответствует середине предела изменения рассматриваемого параметра; третье значение соответствует верхней границе изменения рассматриваемого параметра. Значения приняты на основании текущих показателей развития парка ЭТ и ЭЗИ в России, на основании анализа показателей других стран мира или по целевым показателям Концепции. Следует отметить, что вариация данных показателей рассматривается независимо друг от друга.

Таблица 4
Table 4

Диапазоны изменения значений влияющих факторов
Ranges of change in the values of influencing factors

№	Наименование	Обозначение переменной	Значение	Описание сценария
1	Структурный состав парка ЭТ: а) легковые ТС; б) ЛКТ; в) электробусы; г) грузовые ТС.	а) LDV б) LCV в) eBus г) HDV	а) 95 % б) ~0 % в) 4,8 % г) 0,2 %	Сохранение текущих показателей
			а) 92,80 % б) 4,52 % в) 1,73 % г) 0,95 %	Развитие в соответствии со среднемировыми показателями
			а) 84,43 % б) 7,82 % в) 1,05 % г) 6,70 %	Достижение показателей Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года [10]
2	Доля электротакси в таксопарке	taxi	0,25 %	Сохранение текущих показателей
			2,5 %	Умеренный рост доли электротакси
			10 %	Значительный рост доли электротакси
3	Доля подключаемых гибридов	phev	35 %	Развитие согласно среднемировому уровню
			60 %	Сохранение текущих показателей
			80 %	Сохранение текущего тренда на увеличение доли гибридов
4	Коэффициент использования подключаемых гибридов	UF	30 %	Минимальное использование ЭЗИ (около 30 % гибридов заряжаются перед поездкой)
			50 %	Умеренное использование ЭЗИ (около 50 % гибридов заряжаются перед поездкой)
			94 %	Максимальное использование ЭЗИ (100 % гибридов заряжаются ночью, 30 % заряжаются в течение дня)

5	Количество ЭТ на одну ЭЭС	ev_to_evse	4,62	Развитие в соответствии со средним показателем стран, входящих в 1-й квартиль по данной переменной
			10,00	Развитие в соответствии с целевыми показателями Концепции
			29,37	Развитие в соответствии со средним показателем стран, входящих в 4-й квартиль по данной переменной
6	Доля быстрых ЭЭС	fast_evse	11 %	Развитие в соответствии со средним показателем стран, входящих в 1-й квартиль по данной переменной
			40 %	Развитие в соответствии с целевыми показателями Концепции
			60 %	Развитие в соответствии со средним показателем стран, входящих в 4-й квартиль по данной переменной
7	Доля ЭТ с доступом к домашней ЭЭС	home_charging	30 %	Увеличение доли владельцев ЭТ, проживающих в МКД (снижение показателя до уровня Китая)
			60 %	Сохранение текущих показателей
			90 %	Рост рынка ЭТ при замедлении развития общественной ЭЗИ (увеличение показателя до уровня стран с максимальной долей владельцев домашних ЭЭС – США, Великобритания)
8	Параметры ЭТ	fleet_params	0	Параметры ЭТ соответствуют табл. 3
			1	Максимальная мощность быстрого и медленного заряда превышает номинальную мощности ЭЗИ

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

Переменная «Параметры ЭТ» характеризует максимальную мощность заряда ЭТ и влияет на коэффициент использования при расчете потребления мощности ЭЭС по выражению (2).

В работе выполнен расчет потребления электроэнергии и мощности ЭЗИ для всех городов Российской Федерации с населением более 50 тыс. человек во всем диапазоне изменения значений влияющих факторов, указанных в таблице 4. Результаты расчета были агрегированы по субъектам Российской Федерации и выражены в процентах относительно значений потребления электроэнергии и мощности региональных энергосистем на 2024 год, представленных в схемах и программах развития электроэнергетических систем России на 2025-2030 годы (СИПР ЭЭС).

Оценка значимости влияющих факторов выполнена с помощью коэффициентов уравнения множественной линейной регрессии. В качестве целевой переменной для множественной линейной регрессии (y) использована величина отклонения расчетных значений потребления электроэнергии и мощности (A_i) от аналогичных значений, рассчитанных при влияющих факторах, принятых равными середине диапазона их вариации (табл. 4) (A_0):

$$y = \frac{A_i - A_0}{A_0}. \quad (4)$$

Анализ значимости факторов

На рисунке 6 приведены усредненные графики влияния исследуемых факторов на потребление ЭЭ и мощности ЭЗИ при размере парка ЭТ 1 млн шт. Значения выражены в процентах относительно потребления ЭЭ и мощности ЭЭС за 2024 год по данным СИПР ЭЭС.

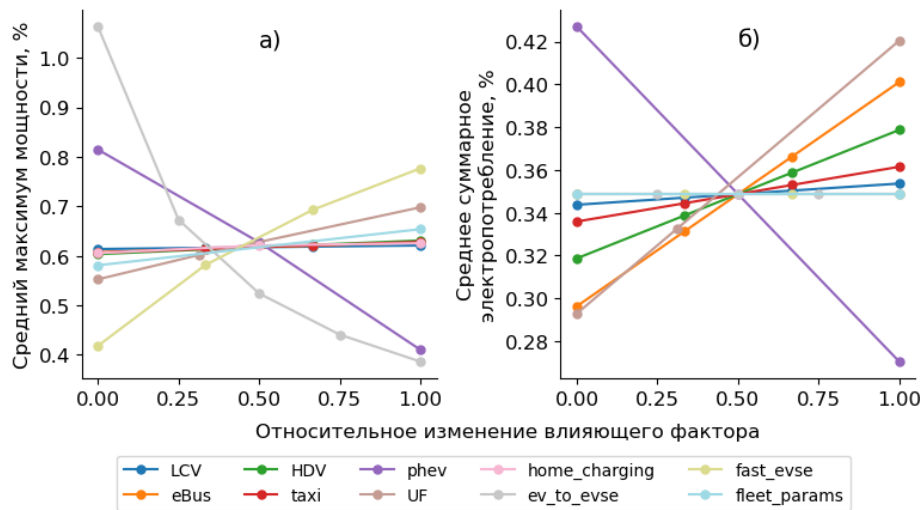


Рис. 6. Усредненные зависимости максимума мощности (а) и потребления ЭЭ ЭЗИ (б) на уровне ЕЭС (выражено в процентах относительно потребления ЭЭ и мощности ЕЭС в 2024 году по данным СИПР ЭЭС) от относительного значения влияющих факторов (0 – левая граница диапазона вариации; 1 – правая граница диапазона вариации согласно таблице 4)

Fig. 6. Averaged dependencies of the maximum power (a) and electricity consumption of electric vehicle infrastructure (b) at the level of the power system (expressed as a percentage relative to electricity consumption and power of the power system in 2024 according to data from the System and Program for the Development of the Unified Energy System) on the relative values of influencing factors (0 – left boundary of the variation range; 1 – right boundary of the variation range according to Table 4)

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

В таблице 5 приведены коэффициенты уравнения множественной линейной регрессии и относительные значимости, полученные на основе расчетных данных об изменении потребления ЭЭ и мощности ЭЗИ при вариации влияющих факторах в диапазонах, описанных в таблице 4. По результатам обучения моделей множественной линейной регрессии получены следующие показатели:

- Максимум мощности на уровне ЕЭС – $R^2 = 0,832$ ($p < 0,01$);
- Потребление ЭЭ на уровне ЕЭС – $R^2 = 0,929$ ($p < 0,01$).

На рисунке 7 приведена визуализация относительной значимости признаков.

Таблица 5
Table 5

Значение коэффициентов множественной линейной регрессии
Values of multiple linear regression coefficients

Наименование влияющего фактора	Максимум мощности на уровне ЕЭС		Потребление ЭЭ на уровне ЕЭС	
	Коэффициент	Значимость	Коэффициент	Значимость
ev_to_evse	-0,035	0,371	0	0
phev	-1,243	0,237	-0,689	0,323
fast_evse	1,005	0,208	0	0
UF	0,313	0,085	0,395	0,263
fleet_params	0,101	0,043	0	0
HDV	0,566	0,016	1,776	0,124
taxi	0,404	0,013	0,677	0,053
eBus	1,612	0,012	12,006	0,216
home_charging	0,043	0,012	0	0
LCV	0,13	0,004	0,251	0,02

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

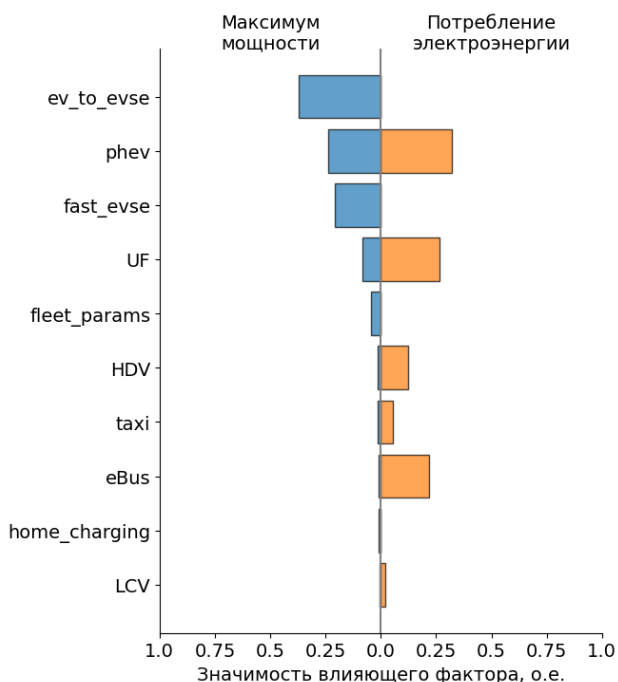


Рис. 7. Диаграмма значимости влияющих факторов Fig. 7. Feature importance plot

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

Как следует из проведенных расчетов, параметры парка ЭТ и ЭЗИ оказывают существенное влияние на электроэнергетическую систему. При размере парка ЭТ 1 млн шт. потребление ЭЭ ЭЗИ на уровне ЕЭС может составить от 1688,74 до 7227,25 млн кВт·ч (от 0,14 % до 0,62 % потребления ЭЭ ЕЭС за 2024 год), а максимум мощности от 158,32 до 3847,97 МВт (от 0,09 % до 2,26 % максимума потребления мощности ЕЭС за 2024 год) при вариации влияющих факторов в рассмотренных диапазонах (табл. 4).

Наибольшее влияние на максимум мощности оказывают параметры ЭЗИ (количество ЭТ на одну ЭЭС – 37,1 %, доля быстрых ЭЭС – 20,8 %) и доля подключаемых гибридов (23,7 %). Структура парка ЭТ не оказывает заметного влияния на максимум мощности, как и доля владельцев ЭТ, имеющих доступ к домашней ЭЭС. Несмотря на снижение среднего числа сессий на общественных ЭЭС при увеличении доли домашнего заряда, уменьшение максимума мощности общественной ЭЗИ компенсируется ростом мощности домашних ЭЭС. Коэффициент использования подключаемых гибридов и параметры ЭТ оказывают слабое влияние на потребление мощности ЭЗИ.

Наибольшее влияние на потребление ЭЭ оказывают параметры парка ЭТ: коэффициент использования и доля подключаемых гибридов (32,3 %, 26,3 %), а также структура парка ЭТ (доля электробусов – 21,6 % и грузовых ТС – 12,4 %). Параметры ЭЗИ ожидаемо не влияют на потребление ЭЭ.

На потребление ЭЭ и мощности ЭЗИ на уровне региональных энергосистем существенное влияние оказывает региональная структура парка ЭТ. В настоящей работе были рассмотрены два варианта регионального распределения парка: в соответствии с текущим распределением парка ЭТ и в соответствии с распределением ТС с ДВС (табл. 2). Результаты расчета приведены в таблице 6. Расчет выполнен при размере парка ЭТ 1 млн шт., значения влияющих факторов приняты равными середине диапазона их вариации, представленного в таблице 4.

Потребление ЭЭ и мощности ЭЗИ в региональных энергосистемах в зависимости от регионального распределения парка ЭТ (в скобках значения выражены в процентах относительно соответствующего регионального потребления ЭЭ и мощности по данным СИПР ЭЭС на 2024 г.)

Electricity consumption and power of the EVCI in regional energy systems depending on the regional distribution of the electric vehicles fleet (values in parentheses are expressed as percentages relative to the corresponding regional electricity consumption and power according to SIPR EES data for 2024)

№	Региональное потребление ЭЭ, млн кВт·ч	Региональный максимум мощности, МВт
Региональное распределение а) (табл. 2)		
1	Тамбовская область – 57,4 (1,6 %)	Тамбовская область – 12,4 (2,04 %)
2	Тыва – 13,1 (1,34 %)	Ингушетия – 4,1 (1,8 %)
3	Ингушетия – 17,6 (1,26 %)	Тыва – 3,0 (1,69 %)
4	Алтай – 8,8 (1,22 %)	Кабардино-Балкария – 5,2 (1,59 %)
5	Брянская область – 51,3 (1,17 %)	Орловская область – 7,4 (1,49 %)
Региональное распределение б) (табл. 2)		
1	Москва – 1583,5 (2,64 %)	Москва – 309,4 (3,06 %)
2	Тыва – 15,7 (1,6 %)	Камчатский край – 6,1 (2,02 %)
3	Камчатский край – 25,7 (1,48 %)	Тыва – 3,6 (2,01 %)
4	Алтай – 10,5 (1,46 %)	Алтай – 2,3 (1,66 %)
5	Бурятия – 97,2 (1,44 %)	Сахалинская область – 8,3 (1,62 %)

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

Как следует из таблицы 6, наибольший относительный прирост потребления ЭЭ и мощности наблюдается в регионах с низким годовым электропотреблением. Развитие рынка ЭТ в данных регионах окажет наиболее заметное влияние на региональные энергосистемы. Исключением в данном перечне является Москва: в настоящее время значительная доля парка ЭТ сосредоточена в Москве (распределение б), табл. 2), что обуславливает высокую долю электропотребления и мощности ЭЗИ в данном регионе.

Прогноз потребления электроэнергии и мощности ЭЗИ

На рисунке 8 представлен прогноз потребления ЭЭ и мощности ЭЗИ в масштабах ЕЭС при размерах парка ЭТ, принятых на основании усреднения рассмотренных в литературном обзоре прогнозов (рис. 1). Значения влияющих факторов приняты равными середине диапазона их вариации (табл. 4), что соответствует сохранению текущих тенденций развития парка ЭТ и ЭЗИ и достижению целевых показателей Концепции.

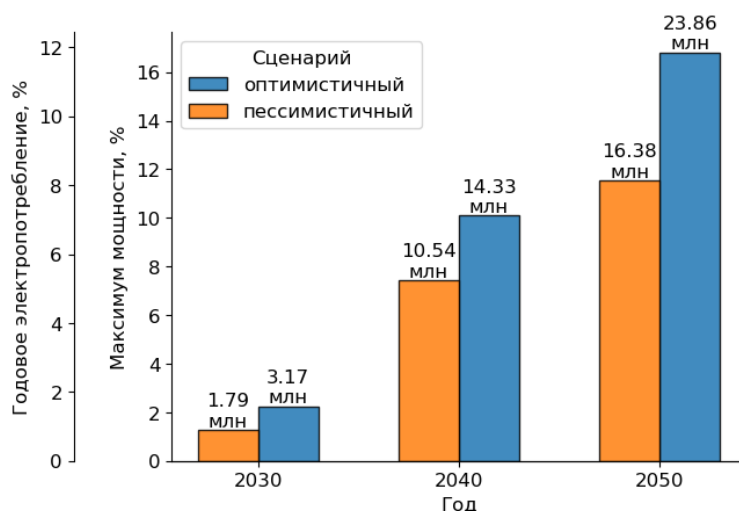


Рис. 8. Прогноз потребления ЭЭ и мощности ЭЗИ в масштабах ЕЭС (в процентах от потребления ЭЭ и мощности ЕЭС за 2024 год) в соответствии с усредненным прогнозом развития рынка ЭТ (рис. 1) (размер парка ЭТ указан над столбцами)

Fig. 8. Forecast of electricity consumption and power of the EV charging infrastructure at the scale of the Unified Energy System (expressed as a percentage of electricity consumption and power of the Unified Energy System in 2024) according to the averaged forecast of the EV market development (Fig. 1) (the size of the EV fleet is indicated above the columns)

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

Как следует из полученных результатов, к 2050 году электропотребление ЭЗИ может составить от 8,13 % до 11,85 %, а максимум мощности от 11,54 % до 16,81 % относительно показателей СИПР ЭЭС за 2024 год, при достижении размера парка ЭТ 16,38-23,86 млн шт. При этом в отдельных региональных энергосистемах прогнозное потребление ЭЭ и мощности ЭЗИ может составить 30 % и более.

Необходимо отметить воздействие влияющих факторов: согласно таблице 5, в среднем увеличение отношения количества ЭТ на ЭЭС на 1 приведет к снижению максимума мощности на 3,45 % от исходного значения; увеличение доли подключаемых гибридов на 1 % – к снижению максимума мощности на 1,24 % и потребления электроэнергии на 0,69 %; увеличение доли быстрых ЭЭС на 1 % – к увеличению максимума мощности на 1 % и т.д.

Представленный прогноз потребления ЭЭ соответствует результатам, полученным другими авторами. Согласно пессимистичному сценарию развития рынка ЭТ, приведенному в работе [6], потребление ЭЭ ЭЗИ в 2030 году составит порядка 1,59 %, в 2040 году – 8,03 %, в 2050 году – 14,46 % относительно уровня потребления ЭЭ ЭЭС за 2024 год. В [7] приведены следующие результаты: 2030 год – 3,88 %, 2040 год – 9,06 %, 2050 год – 13,81 %. При этом среднее отклонение относительно прогноза потребления ЭЭ по оптимистичному сценарию развития рынка ЭТ, полученному в настоящей работе (рис. 8), составляет порядка 1,62 процентных пункта.

Обсуждение (Discussions)

Прогнозируемое потребление ЭЭ ЭЗИ в 2050 году более 10% от годового электропотребления ЭЭС (рис. 8), ставит ЭЗИ в один ряд с крупными отраслями экономики России по величине потребления ЭЭ. Хотя многие влияющие факторы и размер парка ЭТ в ближайшие десятилетия остаются в значительной степени неопределенными, можно сделать вывод о заметном влиянии парка ЭТ и ЭЗИ на электроэнергетическую систему. Данное влияние выражается не только в увеличении максимумов мощности и потребления ЭЭ, но также и в необходимости усиления существующего электросетевого комплекса и нового сетевого строительства для технологического присоединения растущей ЭЗИ. Минимизировать объемы реконструкции и сетевого строительства возможно за счет использования существующих резервов мощности центров питания для технологического присоединения ЭЭС. В текущих условиях становится особенно актуальной возможность управления активной и реактивной мощностью ЭЭС для ограничения пиковой нагрузки и повышения качества электроэнергии.

В результате проведенных исследований было показано, что присоединение ЭЭС с системой динамической балансировки мощности к трансформаторным подстанциям возможно без увеличения их максимума нагрузки при незначительном объеме ограничений электропотребления ЭЭС [37], а использование внешних инверторов быстрых ЭЭС в качестве устройства компенсации реактивной мощности позволяет ограничить отклонения напряжения [38]. Однако для широкого внедрения систем управления электропотреблением ЭЭС необходима разработка методов и алгоритмов для определения требований, условий и параметров систем управления активной и реактивной мощностью ЭЭС, а также разработка мер по стимулированию владельцев ЭЗИ участвовать в управлении режимами работы распределительных электрических сетей.

Таким образом, использование суточной и сезонной неравномерности графиков нагрузки центров питания для технологического присоединения ЭЭС совместно с ограничением электропотребления ЭЭС для снижения совмещенных максимумов нагрузки (а в будущем и использования возможностей выдачи мощности в сеть за счет разряда батарей электромобилей – V2G), может позволить снизить прогнозируемый рост потребления мощности ЭЗИ в масштабах региональных энергосистем и ЭЭС. Для точной оценки возможного снижения совмещенных максимумов мощности необходимы сведения о суточных и сезонных профилях нагрузки центров питания.

Также следует отметить, что даже при высокой доле подключаемых гибридов в парке ЭТ, влияние ЭЗИ на электросетевой комплекс оказывается существенным (рис. унок 8 построен при доле подключаемых гибридов – 60 %). И хотя доля подключаемых гибридов является одним из наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на потребление ЭЭ и мощности, можно сделать вывод, что, несмотря на растущий парк подключаемых гибридов, обгоняющий парк электромобилей, ЭЗИ, тем не менее, будет оказывать заметное влияние на энергосистему.

Верификация результатов исследования проведена путем сравнения расчетных значений потребления ЭЭ с данными независимых исследований [6, 7], что показало

близкое соответствие. Обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием в методике расчета официальных нормативных данных (годовые пробеги ТС – Приложение №8 Положения Банка России [29]), актуальных технических характеристик моделей ЭТ и апробированного метода расчета потребляемой мощности [36].

Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы для корректировки сценарных условий развития региональных парков ЭТ и ЭЗИ для увеличения точности прогнозов потребления ЭЭ и мощности при учете основных параметров парка ЭТ и ЭЗИ.

Заключение (Conclusions)

В настоящей работе выполнено комплексное исследование факторов, влияющих на потребление ЭЭ и мощности ЭЗИ в регионах России.

По результатам исследования установлено, что к 2050 году потребление ЭЭ ЭЗИ может составить 8,13-11,85 %, а потребление мощности – 11,54-16,81 % (относительно показателей ЕЭС за 2024 год). Наибольшее влияние на потребление мощности оказывает количество электромобилей на одну ЭЗС (37,1 %), доля подключаемых гибридов (23,7 %) и доля быстрых ЭЗС в парке (20,8 %). Наибольшее влияние на потребление ЭЭ оказывает доля подключаемых гибридов (32,3 %), коэффициент использования подключаемых гибридов (26,3 %) и доля электробусов в парке ЭТ (21,6 %).

В работе показано, что парк ЭТ и ЭЗИ окажет заметное влияние на энергосистему даже при высокой доле подключаемых гибридов (60 %).

Расчеты показали, что наибольший относительный прирост потребления ЭЭ и мощности прогнозируется в регионах с низким годовым электропотреблением (Тыва, Алтай, Тамбовская область, Ингушетия и др.), а также в Москве (при условии сохранения текущего регионального распределения парка ЭТ).

Настоящее исследование отличается от существующих прогнозов потребления ЭЭ и мощности ЭЗИ комплексным учетом значимости влияющих факторов, в том числе доли подключаемых гибридов и климатических условий в регионах России.

Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы для повышения точности прогнозных оценок потребления ЭЭ и мощности ЭЗИ.

Направлением дальнейших исследований является оценка необходимого объема инвестиций в новое сетевое строительство и реконструкцию электросетевого комплекса для технологического присоединения ЭЗС, а также разработка технических решений для ограничения присоединяемой мощности ЭЗИ посредством управления электропотреблением.

Литература

1. Global EV Outlook 2025. – URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025> (date accessed: 16.10.2025). – Text : electronic.
2. IRENA (2023), Innovation landscape for smart electrification: Decarbonising end-use sectors with renewable power. – Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2023. – URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/Innovation-landscape-for-smart-electrification> (date accessed: 27.01.2025). – Text : electronic.
3. В России числится порядка 140 тысяч электрокаров и гибридов. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/60792/> (дата обращения: 16.10.2025). – Текст : электронный.
4. Потребление электроэнергии в РФ для зарядки электромобилей к 2030г достигнет 1 млрд кВтч – BigpowerNews. – URL: <https://www.bigpowernews.ru/interview/document112350.phtml> (дата обращения: 16.10.2025). – Текст : электронный.
5. Поляков Д. К. Разработка эффективной модели потребления электроэнергии электромобилями / Д. К. Поляков, Н. В. Коровкин, Е. Р. Гарайшина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 10 (148). – С. 129.
6. Веселов Ф. А. Влияние электрификации в секторе дорожного транспорта на уровень электропотребления и суточный график нагрузки в ЕЭС России / Ф. А. Веселов, А. И. Соляник, Р. О. Аликин // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. – 2023. – № 1. – С. 57-71.
7. Мазурова О. В. Долгосрочная оценка спроса на энергию на пассажирском транспорте России в условиях низкоуглеродной трансформации / О. В. Мазурова // Проблемы прогнозирования. – 2024. – № 3 (204). – С. 130-140.
8. О концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года от 23 августа 2021 - docs.cntd.ru. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/608396540> (дата обращения: 11.08.2022). – Текст : электронный.

9. Перспективы развития рынка электротранспорта и зарядной инфраструктуры в России / Д. В. Санатов, А. М. Абакумов, А. Ю. Айдемиров [и др.]. – Текст : электронный. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46443315> (дата обращения: 10.10.2025).
10. Распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4261-р Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 г. | Документы ленты ПРАЙМ: ГАРАНТ. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405963861/> (дата обращения: 10.10.2025). – Текст : электронный.
11. Евдокимов Д. Ю. Развитие электрозаправочной инфраструктуры в регионах России: сценарный анализ / Д. Ю. Евдокимов, Ю. Ю. Пономарев // Экономическое развитие России. – 2022. – Т. 29. – № 11. – С. 59-76.
12. Воронин В. А. Мультиагентное моделирование развития электрозарядной инфраструктуры города Кемерово / В. А. Воронин, Ф. С. Непша // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 3 (78). – С. 10-17.
13. Колян Н. С. Прогнозная оценка потенциального рынка электромобилей и эффектов снижения выбросов парниковых газов в России / Н. С. Колян, А. Е. Плесовских, Р. В. Гордеев // Journal of Applied Economic Research. – 2023. – Т. 22. – № 3. – С. 497-521.
14. Анализ российского рынка электромобилей. – URL: <https://strategy.ru/research/research/analiz-rossiyskogo-rynka-elektromobiley-67/> (date accessed: 10.10.2025). – Текст : electronic.
15. Милякин С. Р. Перспективы автомобилизации на базе отечественных электромобилей: анализ и сценарный прогноз / С. Р. Милякин, Н. Д. Скубачевская // Проблемы прогнозирования. – 2024. – ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМОБИЛИЗАЦИИ НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ. – № 1. – С. 132-143.
16. Ростовский Йоханнес-Корнелиус. Оценка влияния рынков электромобилей на перспективы развития отраслей российской промышленности / Ростовский Йоханнес-Корнелиус. – Текст : электронный. – 2024. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80308115> (дата обращения: 10.10.2025).
17. Сценарии развития электромобилей и зарядной инфраструктуры в Российской Федерации на период до 2035 года / А. В. Шаркова, Е. П. Петухова, М. Д. Капустина, А. С. Романов // Экономика, Предпринимательство и право. – 2025. – Т. 15. – № 4. – С. 2535-2546.
18. АНО МЕФТ. – URL: <https://www.anomeft.com/> (дата обращения: 13.10.2025). – Текст : электронный.
19. Global EV Data Explorer – Data Tools. – URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer> (date accessed: 20.10.2025). – Текст : electronic.
20. Число публичных зарядных станций для электромобилей в России превысило 7,4 тысячи. – URL: <https://www.autostat.ru/news/58056/> (дата обращения: 01.11.2025). – Текст : электронный.
21. Хайретдинова А. Р. Модель развития зарядной инфраструктуры города Москвы / А. Р. Хайретдинова, И. И. Касаткин, А. Ф. Колбасов // Московский транспорт. Наука и проектирование. – 2025. – № 1 (1). – С. 14-22.
22. The 2030 National Charging Network: Estimating U.S. Light-Duty Demand for Electric Vehicle Charging Infrastructure. – URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1969130/> (date accessed: 01.11.2025). – Текст : electronic.
23. UK EV owners seek alternatives to expensive home charging. – URL: <https://www.consultancy.uk/news/38948/uk-ev-owners-seek-alternatives-to-expensive-home-charging> (date accessed: 11.10.2025). – Текст : electronic.
24. Global EV Outlook 2024. – URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> (date accessed: 15.10.2025). – Текст : electronic.
25. Как часто владельцы электромобилей заряжают их дома? – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/59635/> (дата обращения: 07.04.2025). – Текст : электронный.
26. Стало известно, где владельцы электромобилей их заряжают. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/56483/> (дата обращения: 30.12.2023). – Текст : электронный.
27. Четверть всех электромобилей в России приходится на Москву. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/57007/> (дата обращения: 01.11.2025). – Текст : электронный.
28. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). Наличие автомобильного транспорта. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/36228> (дата обращения: 01.11.2025). – Текст : электронный.
29. Приложение 8. Справочные данные о среднегодовых пробегах транспортных средств (ТС) (в тыс. км). Положение Банка России от 19.09.2014 N 432-П «О единой методике определения размера расходов на восстановительный ремонт в отношении поврежденного транспортного средства» (документ утратил силу) | ГАРАНТ. – URL: <https://base.garant.ru/70754306/16299f4c34ecc629cfca4846172b3229/> (дата обращения: 07.04.2025). – Текст : электронный.

30. Какие электромобили и гибриды самые распространенные в России? – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/60895/> (дата обращения: 19.10.2025). – Текст : электронный.
31. EV Database. – URL: <https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car> (date accessed: 06.10.2022). – Text : electronic.
32. Al-Wreikat Y. Effects of ambient temperature and trip characteristics on the energy consumption of an electric vehicle / Y. Al-Wreikat, C. Serrano, J. R. Sodr  // Energy. – 2022. – Т. 238. – С. 122028.
33. Ansari A. Ambient Temperature Effects on Energy Consumption and CO2 Emissions of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle / A. Ansari, H. Abediasl, M. Shahbakhti // Energies. – 2024. – Vol. 17. – № 14. – P. 3566.
34. Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles: Fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions. Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles. – URL: <https://theicct.org/publication/real-world-usage-of-plug-in-hybrid-electric-vehicles-fuel-consumption-electric-driving-and-co2-emissions/> (date accessed: 20.05.2025). – Text : electronic.
35. Hamza K. Utility Factor Curves for Plug-in Hybrid Electric Vehicles: Beyond the Standard Assumptions / K. Hamza, K. P. Laberteaux // World Electric Vehicle Journal. – 2023. – Vol. 14. – Utility Factor Curves for Plug-in Hybrid Electric Vehicles. – № 11. – P. 301.
36. Voronin V. A Demand Factor Analysis for Electric Vehicle Charging Infrastructure / V. Voronin, F. Nepsha, P. Piyushin // World Electric Vehicle Journal. – 2025. – Vol. 16. – № 9. – P. 537.
37. Voronin V. A. Enhancing the Process for Connecting EV Charging Stations to the Power Grid / V. A. Voronin, F. S. Nepsha. – Текст : электронный // 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). – 2024. – С. 1240-1244. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10805017> (дата обращения: 26.12.2024).
38. Voronin V. Determining Volt/Var Characteristics of Electric Vehicle Charging Station Inverters for Voltage Regulation in Distribution Networks / V. Voronin, F. Nepsha, P. Piyushin // World Electric Vehicle Journal. – 2024. – Vol. 15. – № 12. – P. 553.

Авторы публикации

Воронин Вячеслав Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий, ст. научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-7242-9100>. voroninva@kuzstu.ru

References

1. Global EV Outlook 2025. – URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025> (date accessed: 16.10.2025). – Text: electronic.
2. IRENA (2023), Innovation landscape for smart electrification: Decarbonising end-use sectors with renewable power. – Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2023. – URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/Innovation-landscape-for-smart-electrification> (date accessed: 27.01.2025). – Text: electronic.
3. There are about 140 thousand electric cars and hybrids registered in Russia. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/60792/> (date accessed: 16.10.2025). – Text: electronic.
4. Electricity consumption in the Russian Federation for charging electric vehicles will reach 1 billion kWh by 2030 – BigpowerNews. – URL: <https://www.bigpowernews.ru/interview/document112350.phtml> (date accessed: 16.10.2025). – Text: electronic.
5. Poliakov D. K. Razrabotka effektivnoi modeli potrebleniia elektroenergii elektromobiliami / D. K. Poliakov, N. V. Korovkin, E. R. Garaishina // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. – 2024. – № 10 (148). – S. 129.
6. Veselov F. A. Vliianie elektrifikatsii v sektore dorozhnogo transporta na uroven' elektropotrebleniia i sutochnyi grafik nagruzki v EES Rossii / F. A. Veselov, A. I. Solianik, R. O. Alikin // Izvestiia Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika. – 2023. – № 1. – S. 57-71.
7. Mazurova O. V. Dolgosrochnaia otsenka sprosa na energiiu na passazhirskom transporte Rossii v usloviakh nizkouglerodnoi transformatsii / O. V. Mazurova // Problemy prognozirovaniia. – 2024. – № 3 (204). – S. 130-140.
8. On the Concept for the Development of Production and Use of Electric Motor Vehicles in the Russian Federation for the Period until 2030 of August 23, 2021 - docs.cntd.ru. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/608396540> (date accessed: 11.08.2022). – Text: electronic.
9. Perspektivy razvitiia rynka elektrotransporta i zariadnoi infrastruktury v Rossii / D. V. Sanatov,

- A. M. Abakumov, A. Iu. Aidemirov [i dr.]. – Text: electronic. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46443315> (date accessed: 10.10.2025).
10. Decree of the Government of the Russian Federation of December 28, 2022 No. 4261-r On the Approval of the Strategy for the Development of the Automotive Industry of the Russian Federation until 2035 | Prime News Feed Documents: GARANT. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405963861/> (date accessed: 10.10.2025). – Text: electronic.
11. Evdokimov D. Iu. Razvitiye elektrozapravochnoi infrastruktury v regionakh Rossii: stsenarnyi analiz / D. Iu. Evdokimov, Iu. Iu. Ponomarev // *Ekonomicheskoe razvitiye Rossii*. – 2022. – T. 29. – № 11. – S. 59-76.
12. Voronin V. A. Multiagentnoe modelirovaniye razvitiia elektr ozariadnoi infrastruktury goroda Kemerovo / V. A. Voronin, F. S. Nepsha // *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye*. – 2023. – № 3 (78). – S. 10-17.
13. Kolian N. S. Prognoznaia otsenka potentsial'nogo rynka elektromobiley i effektivnosti snizheniya vybrosov parnikovykh gazov v Rossii / N. S. Kolian, A. E. Plesovskikh, R. V. Gordeev // *Journal of Applied Economic Research*. – 2023. – T. 22. – № 3. – S. 497-521.
14. Analysis of the Russian Electric Vehicle Market. – URL: <https://strategy.ru/research/research/analiz-rossiyskogo-rynka-elektromobiley-67/> (date accessed: 10.10.2025). – Text: electronic.
15. Milakin S. R. Perspektivy avtomobilizatsii na baze otechestvennykh elektromobiley: analiz i stsenarnyi prognoz / S. R. Milakin, N. D. Skubachevskaya // *Problemy prognozirovaniia*. – 2024. – PERSPEKTIVY AVTOMOBILIZATSII NA BAZE OTECHESTVENNYKH ELEKTROMOBEILEI. – № 1. – S. 132-143.
16. Rostovskii Iokhannes-Kornelius. Otsenka vliianiia rynkov elektromobiley na perspektivy razvitiia otraslei rossiiskoi promyshlennosti / Rostovskii Iokhannes-Kornelius. – Text: electronic. – 2024. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80308115> (date accessed: 10.10.2025).
17. Stsenarii razvitiia elektromobiley i zariadnoi infrastruktury v Rossiiskoi Federatsii na period do 2035 goda / A. V. Sharkova, E. P. Petukhova, M. D. Kapustina, A. S. Romanov // *Ekonomika, Predprinimatel'stvo i Pravo*. – 2025. – T. 15. – № 4. – S. 2535-2546.
18. ANO MEFT. – URL: <https://www.anomeft.com/> (date accessed: 13.10.2025). – Text: electronic.
19. Global EV Data Explorer – Data Tools. – URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer> (date accessed: 20.10.2025). – Text: electronic.
20. The number of public electric vehicle charging stations in Russia has exceeded 7.4 thousand. – URL: <https://www.autostat.ru/news/58056/> (date accessed: 01.11.2025). – Text: electronic.
21. Khairtdinova A. R. Model' razvitiia zariadnoi infrastruktury goroda Moskvy / A. R. Khairtdinova, I. I. Kasatkin, A. F. Kolbasov // *Moskovskii transport. Nauka i proektirovaniye*. – 2025. – № 1 (1). – S. 14-22.
22. The 2030 National Charging Network: Estimating U.S. Light-Duty Demand for Electric Vehicle Charging Infrastructure. – URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1969130/> (date accessed: 01.11.2025). – Text: electronic.
23. UK EV owners seek alternatives to expensive home charging. – URL: <https://www.consultancy.uk/news/38948/uk-ev-owners-look-alternatives-to-expensive-home-charging> (date accessed: 11.10.2025). – Text: electronic.
24. Global EV Outlook 2024. – URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> (date accessed: 15.10.2025). – Text: electronic.
25. How often do electric vehicle owners charge them at home? – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/59635/> (date accessed: 07.04.2025). – Text: electronic.
26. It became known where electric vehicle owners charge them. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/56483/> (date accessed: 30.12.2023). – Text: electronic.
27. A quarter of all electric vehicles in Russia are in Moscow. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/57007/> (date accessed: 01.11.2025). – Text: electronic.
28. Unified Interdepartmental Information and Statistical System (EMISS). Availability of motor vehicles. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/36228> (date accessed: 01.11.2025). – Text: electronic.
29. Appendix 8. Reference data on the average annual mileage of vehicles (in thousand km). Regulation of the Bank of Russia dated September 19, 2014 N 432-P "On the Unified Methodology for Determining the Amount of Costs for Restoration Repairs in Relation to a Damaged Vehicle" (the document is no longer in force) | GARANT. – URL: <https://base.garant.ru/70754306/16299f4c34ecc629cfca4846172b3229/> (date accessed: 07.04.2025). – Text: electronic.
30. What electric and hybrid cars are the most common in Russia? – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/60895/> (date accessed: 19.10.2025). – Text: electronic.

31. EV Database. – URL: <https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car> (date accessed: 06.10.2022). – Text: electronic.
32. Al-Wreikat Y. Effects of ambient temperature and trip characteristics on the energy consumption of an electric vehicle / Y. Al-Wreikat, C. Serrano, J. R. Sodré // *Energy*. – 2022. – Т. 238. – S. 122028.
33. Ansari A. Ambient Temperature Effects on Energy Consumption and CO2 Emissions of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle / A. Ansari, H. Abediasl, M. Shahbakhti // *Energies*. – 2024. – Vol. 17. – № 14. – P. 3566.
34. Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles: Fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions. Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles. – URL: <https://theicct.org/publication/real-world-usage-of-plug-in-hybrid-electric-vehicles-fuel-consumption-electric-driving-and-co2-emissions/> (date accessed: 20.05.2025). – Text: electronic.
35. Hamza K. Utility Factor Curves for Plug-in Hybrid Electric Vehicles: Beyond the Standard Assumptions / K. Hamza, K. P. Laberteaux // *World Electric Vehicle Journal*. – 2023. – Vol. 14. – Utility Factor Curves for Plug-in Hybrid Electric Vehicles. – № 11. – P. 301.
36. Voronin V. A Demand Factor Analysis for Electric Vehicle Charging Infrastructure / V. Voronin, F. Nepsha, P. Ilyushin // *World Electric Vehicle Journal*. – 2025. – Vol. 16. – № 9. – P. 537.
37. Voronin V. A. Enhancing the Process for Connecting EV Charging Stations to the Power Grid / V. A. Voronin, F. S. Nepsha. – Text: electronic // 2024 IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). – 2024. – S. 1240-1244. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10805017> (date accessed: 26.12.2024).
38. Voronin V. Determining Volt/Var Characteristics of Electric Vehicle Charging Station Inverters for Voltage Regulation in Distribution Networks / V. Voronin, F. Nepsha, P. Ilyushin // *World Electric Vehicle Journal*. – 2024. – Vol. 15. – № 12. – P. 553.

Authors of the publication

Vyacheslav A. Voronin – Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7242-9100>. voroninva@kuzstu.ru

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено	13.11.2025 г.
Отредактировано	17.01.2026 г.
Принято	19.01.2026 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 629.7.064.52

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-1-89-102

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЦИКЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАПУСКА И ОСТАНОВА БАТАРЕИ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРОТОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ РЕСУРС

Симонов И.В.¹, Кудинов Д.В.^{1,2}, Шевченко Д.И.¹, Корнилов С.В.^{1,3}, Фардеев Л.И.¹

¹ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

³Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Simonov.IV@kamaz.ru

Резюме: ЦЕЛЬЮ работы является описание алгоритмов циклирования батареи топливных элементов с протонообменной мембраной, которые целесообразно применять при регулярной эксплуатации в составе транспортного средства и при проведении ресурсных испытаний в лабораторных условиях. Провести комплексную оценку рассмотренных алгоритмов циклирования и количественно оценить влияние внутренних процессов на продолжительность эксплуатации. МЕТОДЫ. Для оценки предлагаемых алгоритмов циклирования использовалось специализированное программное обеспечение AVL Cruise M, в котором была создана цифровая 1D-модель батареи топливных элементов, которая описывает ключевые процессы, протекающие в топливных элементах. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье приведен механизм деградиционных процессов которые происходят в топливных элементах при их циклической работе. Проведено количественное сравнение результатов применения двух алгоритмов циклирования по концентрациям платины в мембране, перекиси водорода, удельной электрохимической поверхности каталитического слоя, снижения напряжения с каждым циклом и другим ключевым показателям. Практическая значимость работы заключается в подробно описанных рекомендованных двух алгоритмах циклирования батареи топливных элементов: первый алгоритм применим для эксплуатации батарей топливных элементов в составе транспортного средства, второй подходит для определения долговечности батареи. Последний алгоритм позволит сократить время, затрачиваемое на ресурсные испытания, с 25 000 до 123 часов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования показали, что основными причинами повышенной деградации при циклической работе являются сильное изменение потенциалов на каталитических слоях топливных элементов, входящих в состав батареи, а также диффузия реагентов, которая может приводить к возникновению обратного тока на определенных участках топливных элементов. При рассмотрении стационарной работы как базового процесса, было выявлено, что в первые 50 часов эксплуатации наблюдается резкое уменьшение напряжения, которое стабилизируется только к 300 часам.

Ключевые слова: топливные элементы; деградация топливных элементов; эксплуатация батареи топливных элементов.

Для цитирования: Симонов И.В., Кудинов Д.В., Шевченко Д.И., Корнилов С.В., Фардеев Л.И. Оценка влияния условий циклирования процессов запуска и останова батареи топливных элементов с протонообменной мембраной на эксплуатационный ресурс // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 89-102. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-89-102.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF CYCLING CONDITIONS OF START-UP AND STOP-UP PROCESSES OF A PROTON-EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL STACK ON ITS OPERATIONAL LIFE

Simonov I.V.¹, Kudinov D.V.^{1,2}, Shevchenko D.I.¹, Kornilov S.V.^{1,3}, Fardeyev L.I.¹

¹PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

³Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Simonov.IV@kamaz.ru

Abstract: *THE PURPOSE* of this work is to describe the cycling algorithms for fuel cell batteries with proton exchange membranes, which are suitable for use in regular operation in vehicles and during resource testing in laboratory conditions. To conduct a comprehensive assessment of the considered cycling algorithms and quantitatively evaluate the impact of internal processes on the duration of operation. **METHODS.** To evaluate the proposed cycling algorithms, specialized software AVL Cruise M was used to create a digital 1D model of a fuel cell battery that describes the key processes occurring in fuel cells. **RESULTS.** The article describes the mechanism of degradation processes that occur in fuel cells during their cyclic operation. A quantitative comparison was made of the results of applying two cycling algorithms based on the concentrations of platinum in the membrane, hydrogen peroxide, the specific electrochemical surface area of the catalytic layer, voltage reduction with each cycle, and other key indicators. The practical significance of the work lies in the detailed description of the two recommended fuel cell battery cycling algorithms: the first algorithm is applicable for the operation of fuel cell batteries in a vehicle, while the second is suitable for determining battery life. The latter algorithm will reduce the time spent on resource testing from 25,000 to 123 hours. **CONCLUSION.** The results of the study showed that the main causes of increased degradation during cyclic operation are significant changes in the potentials on the catalytic layers of the fuel cells that make up the battery, as well as the diffusion of reagents, which can lead to the emergence of reverse current in certain areas of the fuel cells. When considering steady-state operation as the base process, it was found that in the first 50 hours of operation, there is a sharp decrease in voltage, which stabilizes only after 300 hours.

Keywords: fuel cells; fuel cell degradation; fuel cell stack operation.

For citation: Simonov I.V., Kudinov D.V., Shevchenko D.I., Kornilov S.V., Fardeyev L.I. Assessment of the influence of cycling conditions of start-up and stop-up processes of a proton-exchange membrane fuel cell stack on its operational life. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 89-102. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-89-102.

Введение (Introduction)

Транспортные средства с энергетическими установками на основе низкотемпературных полимерных топливных элементов широко востребованы в различных отраслях [1]. Экспертная оценка показывает к 2030 г. в Европе будет более 500 тыс. легких коммерческих автомобилей, к 2050 году их количество увеличится до 6,5 млн. транспортных средств [2, 3]. Однако, при анализе водородного транспорта чаще всего учитывают КПД цепочки преобразования от производства водорода до колеса транспортного средства, в текущей ситуации полный КПД находится в пределах 25-35% [4]. Для коммерциализации водородного транспорта необходимо повышать КПД на всех этапах передачи энергии, а также повышать эксплуатационные качества энергетических установок при сохранении или уменьшении стоимости. Для этого необходимо увеличение ресурса электрохимического генератора входящего в состав энергетической установки применяемой в транспортных средствах [5].

Цель исследования заключается в выборе и оценке алгоритмов циклирования батарей топливных элементов для дальнейшего их применения при разработке батарей топливных элементов для транспортных средств.

Научная значимость заключается в составлении двух алгоритмов циклирования батареи топливных элементов и оценки их влияния на ресурс батареи.

Практическая значимость исследования заключается в потенциальном применении алгоритмов при дальнейшей разработке отечественных батарей топливных элементов.

Электрохимический генератор состоит из батареи топливных элементов, систем подготовки, подачи реагентов и отвода уходящих газов, средств мониторинга и управления. В данной работе рассматривается проблема долговечности батареи топливных элементов, поскольку она является ключевым компонентом электрохимического генератора, влияющим на его ресурс, и в наибольшей степени подвержена негативному влиянию циклических процессов запуска и останова. Как было описано в работах [6, 7], процесс деградации батареи топливных элементов на 33% зависит от циклов «старт-стоп» и на 56,5% – от работы под изменяемой нагрузкой. Для уменьшения пагубного влияния циклической работы в исследованиях [8] была применена вспомогательная нагрузка, что не является оптимальным решением по причине усложнения конструкции, в рассмотренных методах нагрузочный резистор не применяется. В целях корректного анализа циклирования батареи топливных элементов следует проводить испытания циклов «старт-стоп» всей энергетической установки, которая включает электрохимический генератор, вспомогательное оборудование, систему хранения компримированного водорода и систему управления.

Для упрощения оценки в данной работе рассматривается работа энергетической установки без учета запаса водорода в баллонах.

В данной работе анализ деградации производится на основе проведенных виртуальных испытаний цифровой модели батареи топливных элементов. Далее по тексту под «испытаниями» подразумеваются виртуальные испытания.

Как уже отмечено выше, долговечность является одним из ключевых параметров батареи топливных элементов. Ресурс батареи варьируется от 3 000 до 25 000 часов [9, 10], определение ресурса требует значительных временных и денежных затрат для проверки на физических образцах. Для ускорения и удешевления ресурсных испытаний возможно подвергание батареи топливных элементов неблагоприятным, длительным циклическим процессам запуска и останова.

Вследствие того, что методы запуска и останова всей энергетической установки оказывают существенное влияние на процессы деградации батареи топливных элементов, необходимо выявление оптимальных алгоритмов циклирования процессов запуска и останова как для эксплуатации в составе транспортных средств, так и для ускоренных ресурсных испытаний, т.е. определение нужных алгоритмов системы «старт-стоп».

В данной работе объектом исследований выступает батарея топливных элементов, метод исследования – циклирование батареи. Под циклированием подразумевается последовательное повторение запуска, выхода на номинальную мощность и останова исследуемого объекта. Изменение условий процессов циклирования позволяет сравнить параметры, характеризующие деградацию батареи, тем самым оценить эксплуатационный ресурс.

Литературный обзор (Literature Review)

Авторами работы [7] было описано, что при применении батареи топливных элементов в составе энергетической установки необходима оптимизация эксплуатации в соответствии с частыми циклическими процессами системы «старт-стоп». При работе системы в режиме «старт-стоп» потенциал катода сильно возрастает, что вызывает окисление каталитического слоя. Этого можно избежать путем плавного запуска и останова батареи топливных элементов. В идеальных условиях на протяжении всего срока эксплуатации батареи необходимо предотвращение попадания кислорода в анодную камеру, так как это является основной причиной деградации [6]. При циклическом запуске и останове батареи топливных элементов из-за разницы давлений молекулы газов, содержащиеся в воздухе, диффундируют в анодное пространство, поэтому при определении стратегий запуска и останова батареи необходимо предусмотреть возможность удаления воздуха из анодного пространства. Наличие кислорода в анодном пространстве может вызвать явление, называемое обратным током. Обратный ток возникает в случае, когда окислительно-восстановительные реакции в определенном месте топливного элемента меняются на противоположные процессы, при этом происходит образование протонов водорода на катодной стороне и образование воды на анодной стороне топливного элемента.

Обратный ток, возникающий в топливном элементе, воздействует на батарею топливных элементов, снижая ее ресурс. Появление обратного тока связано с тем, что на аноде могут одновременно присутствовать водород и кислород, что запускает процесс восстановления кислорода со стороны как анода, так и катода. В этом случае разница потенциалов возрастает до 1,44 В (для неразрушительной работы разница потенциалов

должна быть менее 0,8 В), что вызывает сильное окисление углеродной подложки каталитического слоя.

При первом запуске батареи после долгого простоя потенциалы катализаторов катода и анода равны потенциалу равновесия кислорода ($V_{O_2}^p = 1,23$ В, по отношению к потенциалу электролита Φ (мембраны)). Разность потенциалов равна в этом случае 0 В ($V_{O_2}^{кат} - V_{H_2}^{ан}$). При подаче водорода потенциал анода становится равным равновесному потенциалу водорода ($V_{H_2}^{ан} = 0$ В, по отношению к потенциалу электролита (мембраны)). При этом из-за электрического сопротивления компонентов топливного элемента напряжение повышается примерно до 0,85 В. Авторы публикации [11] описали, что повышение до теоретического максимального напряжения невозможно из-за наличия активационных потерь, омических перенапряжений и потерь напряжения Нернста (учитывающего парциальное давление реагентов).

В работе [12] было выявлено, что кислород находящийся на анодной стороне, снижает потенциал электролита (в местах присутствия). Вследствие снижения в данном месте потенциала электролита создается следующая разность потенциалов (рис. 1):

$$V_{ТЭ} = V_{O_2}^{кат} - V_{H_2}^{ан} - \Phi \quad (1)$$

Результирующее значение напряжения топливного элемента ($V_{ТЭ} = 1,443$ В) вызывает коррозию углерода, разрушая катодный каталитический слой [13].

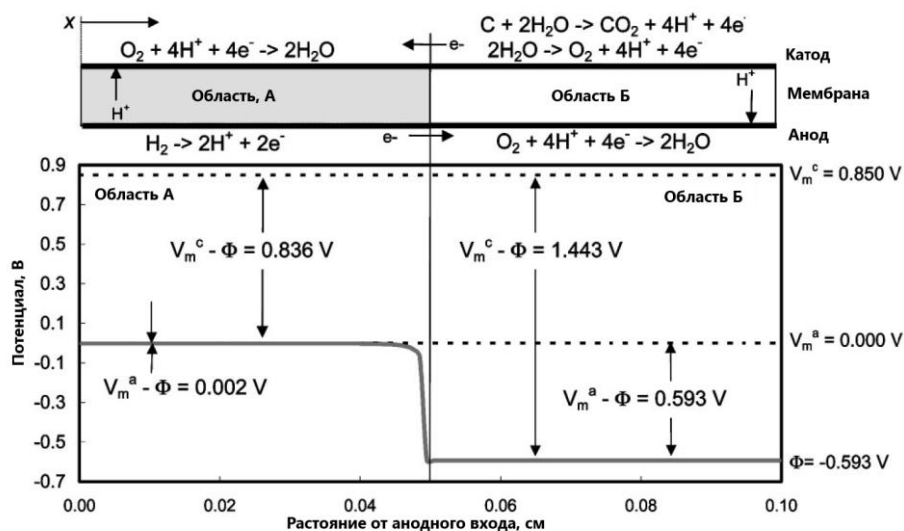
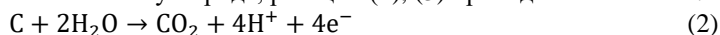


Рис. 1. Распределение потенциала по длине газовой канала *Fig. 1. Potential distribution along the length of the gas channel*

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

Также в топливном элементе может возникнуть топливное голодание, вызванное не только плохим распределением реагентов и затоплением активной зоны топливного элемента, но и процессами запуска и останова. Так, если при запуске батареи с анодной стороны существует нехватка водорода, газы, содержащиеся в воздухе (в частности кислород), с катодной стороны будут активно диффундировать через мембрану. В работе [14] была продемонстрирована сильная зависимость процесса окисления углерода со стороны катода от диффузии кислорода через полимерную мембрану.

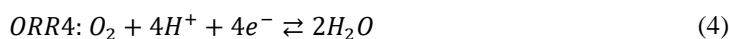
Окисление углерода происходит и при нормальной работе топливного элемента согласно формулам (2) и (3). Однако ввиду малой кинетики реакции протекают медленно. При циклических процессах «старт-стоп», когда потенциал катода превышает термодинамический потенциал окисления углерода, реакции (2), (3) проходят интенсивно.



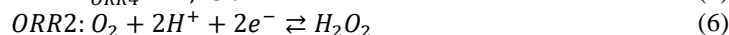
Дополнительно стоит учитывать возможность образования и разложения перекиси водорода (H_2O_2) в топливном элементе. В большинстве случаев перекись водорода образуется в слоях катодного и анодного катализатора и на частицах платины, находящихся в мембране. Рассмотрим влияние перекиси водорода на напряжение топливного элемента на примере реакций, происходящих со стороны катода. Для слоев катодного катализатора концентрация H_2O_2 определяется 3 электрохимическими реакциями:

- 4-электронной (ORR4) реакцией, формула (4);
- 2-электронной (ORR2) реакцией восстановления кислорода, формула (6);

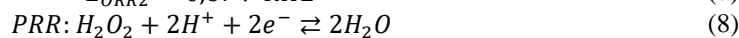
• реакцией восстановления пероксида водорода (PRR) формула (8), где в качестве условно нулевого потенциала принимается потенциал обратимого водородного электрода (RHE).



$$E_{ORR4} = 1,23 \text{ V RHE} \quad (5)$$



$$E_{ORR2} = 0,67 \text{ V RHE} \quad (7)$$



$$E_{PRR} = 1,67 \text{ V RHE} \quad (9)$$

Повышение напряжения вызывает коррозию углеродного носителя, тем самым разрушая катодный каталитический слой. В целях упрощения анализа данных в этой работе не рассматривается изменение пористости и толщины слоев мембранно-электродного блока, как было описано в работе [15].

В научных работах описываются различные методы циклирования батареи топливных элементов [6, 16, 17]. Из результатов работы [18] выявлено, что скорость запуска батареи ограничивается падением давления реагентов (при резком увеличении снимаемой мощности), начальной долей воды в компонентах мембранно-электродного блока, изначальной температурой батареи и входных газов. Следовательно, изменение этих параметров влияет на динамику изменения мощности батареи топливных элементов.

Материалы и методы (Materials and methods)

Рассмотрим два варианта виртуального циклирования: в первом каждый цикл происходит без продувки анодного объема, второй вариант предусматривает цикл «старт-стоп» с последующей продувкой анодного объема батареи воздухом. Заполнение воздухом анодного и катодного объема симулирует длительный простой энергетической установки. Это вызывает незащищенный процесс запуска, при котором в заполненный воздухом анодный объем подается чистый H_2 , что приводит к неравномерному распределению напряжения и возможности возникновения обратного тока. Данный процесс целесообразно использовать, если необходимо сократить время длительных испытаний батареи топливных элементов. Следует отметить, что в результате каждого цикла активная каталитическая поверхность уменьшается из-за растворения, агломерации и отрыва платины, так как малые частицы платины стремятся уменьшить поверхностную энергию.

Для определения влияния данных стратегии на батарею топливных элементов необходимо проведение циклирования батареи топливных элементов с целью выявления шага уменьшения напряжения и концентрации катализатора в мембране и таким образом определение влияния циклической работы на долговечность батареи.

Для корректной оценки двух вариантов необходимо иметь данные для идеализированного случая, когда батарея топливных элементов в наименьшей степени подвержена процессам деградации из-за частого изменения мощности. Поэтому необходимо сравнение двух методов циклирования батареи с вариантом работы под постоянной нагрузкой, когда вырабатываемая мощность остается постоянной на протяжении всего времени моделирования.

Исследование алгоритмов работы системы «старт-стоп» проводилось на основе математической 1D-модели энергетической установки, созданной в специализированном программном обеспечении AVL Cruise M. Данное программное обеспечение позволяет детально моделировать отдельные водородные топливные элементы, водородные электрохимические генераторы, а также транспортные средства на их основе.

В данной работе предлагается определить оптимальную стратегию циклирования процессов «старт-стоп» при номинальной температуре окружающей среды (25°C).

1D-модель энергетической установки (рис. 2) состоит из следующих основных блоков: анодного контура, катодного контура, батареи топливных элементов, контура охлаждения, блока системы управления и системы хранения (с неограниченным запасом водорода для проведения длительных виртуальных испытаний).

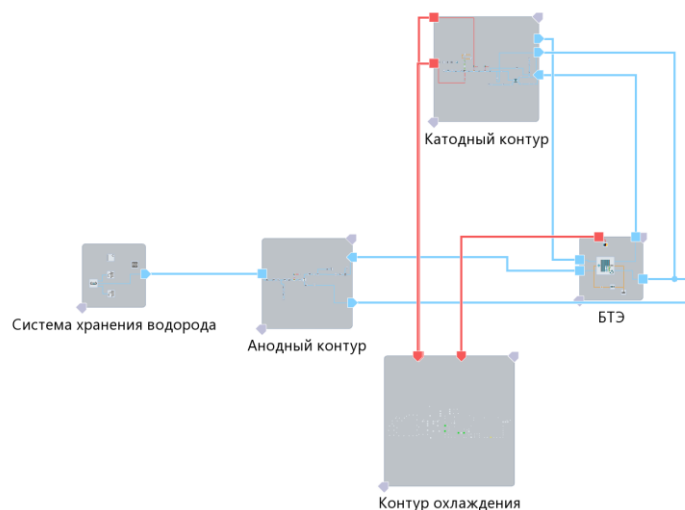


Рис. 2. Схема 1D-модели энергетической установки Fig. 2. Scheme of the 1D-model of the power system

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

Основные параметры данной энергетической установки представлены ниже:

- номинальная мощность батареи топливных элементов – 68 кВт;
- количество топливных элементов – 270 шт.

Данные параметры непосредственно влияют на работу батарею топливных элементов и накладывают определенные ограничения на ее эксплуатацию.

Эксплуатация энергетической установки

Как было указано выше, при стационарной работе батареи топливных элементов активная каталитическая поверхность уменьшается из-за растворения, агломерации и отрыва платины, также деградация полимера мембраны снижает производительность топливных элементов. Эти явления можно наблюдать при длительной симуляции (рис. 3-5). Была разработана модель рабочего процесса батареи топливных элементов с постоянной выработкой 68 кВт на протяжении 300 ч. В целях оптимизации ресурсов вычислительных машин в представленных рисунках приведены значения, полученные в последние часы работы батареи топливных элементов.

Расчет снижения удельной электрохимической поверхности производится путем вычитания из изначальной удельной электрохимической поверхности, средней доли загрязненной поверхности молекулами: C, COH, CO, Pt, PtOH, PtO. Вычисление средней доли загрязнения поверхности вычисляется с помощью формулы:

$$\langle \theta_j \rangle = \frac{(\sum_{i=1}^M \theta_{ji} * N_i)}{(\sum_{i=1}^M N_i)} \tag{10}$$

где $\langle \theta_j \rangle$ – средняя доля поверхностного покрытия;

θ_j – доля поверхностного покрытия;

j – наименование молекул C, COH, CO, Pt, PtOH, PtO;

N_i – количество частиц i-го класса, где i – количество размерных классов частиц платины;

M – молярная масса.

Концентрация платины в мембране моделируется путем дискретизации полимерной мембраны и вычисляется согласно формуле:

$$K = D_s * \frac{d^2 C_{Pt}}{dx_{mem}^2} \tag{11}$$

где C_{Pt} – концентрация диффундирующих частиц;

D_s – коэффициент диффузии частиц в мембране;

Δx_{mem}^2 – толщина мембраны, деленная на количество разбиваемых ячеек мембраны (при дискретизации).

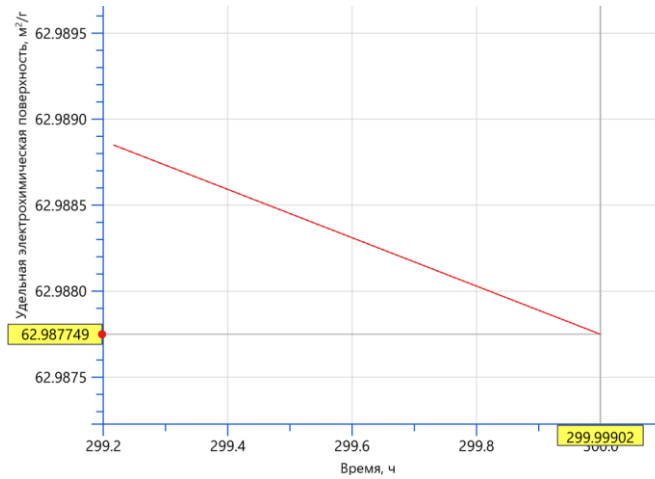


Рис. 3. Удельная электрохимическая поверхность при стационарной работе батареи топливных элементов *Fig. 3. Specific electrochemical surface in stationary fuel cell stack operation*

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

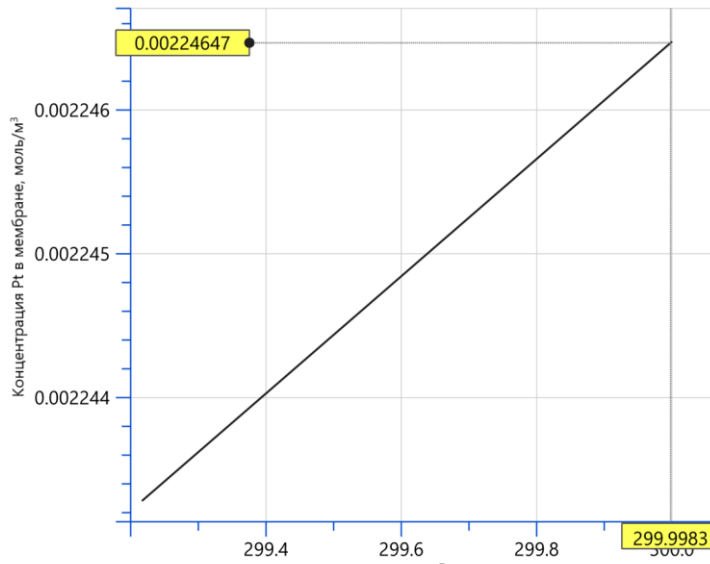


Рис. 4. Концентрация Pt в мембране *Fig. 4. Pt concentration in the membrane*

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

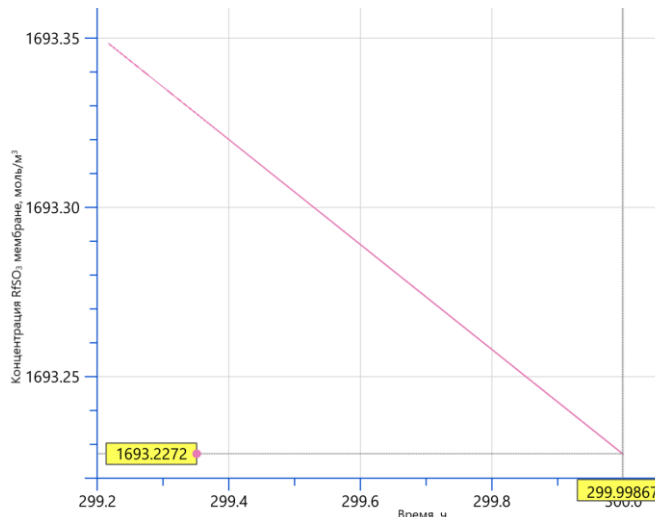


Рис. 5. Концентрация RfSO₃ групп в мембране *Fig. 5. Concentration of RfSO₃ groups in the membrane*

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

Из представленных графиков следует, что со временем концентрация платины в мембране постепенно увеличивается из-за диффузии ионов платины и последующей кристаллизации в мембране в присутствии водорода, а средняя концентрация боковых цепей сульфокислоты в мембране уменьшается. Это свидетельствует о постепенном разрушении протонообменной мембраны, также происходит деградация иономера из-за образования радикалов ОН из пероксида водорода (H_2O_2) при протекании реакции с ионами железа (реакция Фентона), атакующих полимерную мембрану и основные цепи иономера. Средняя концентрация αO , βO , $[CF_2]_nCOOH$, CF_2 в мембране равна $90,61 \text{ моль/м}^3$, 17 моль/м^3 , $21,3 \text{ моль/м}^3$, $138,346 \text{ моль/м}^3$ соответственно.

Более наглядно изменение в работе батареи топливных элементов отображают графики изменения напряжения топливного элемента и плотности тока (рис. 6-7). Видно, что в самом начале работы батареи топливных элементов происходит «внутренняя настройка» батареи, и только по истечении 300 часов эксплуатации мы наблюдаем стабилизацию значений напряжений и плотности тока. Падение напряжения топливного элемента по истечении 300 часов равняется 2 мВ, при этом плотность тока увеличилась на $2,25 \text{ mA/cm}^2$, так как было установлено целевое значение вырабатываемой мощности батареи топливных элементов, равное 68 кВт.

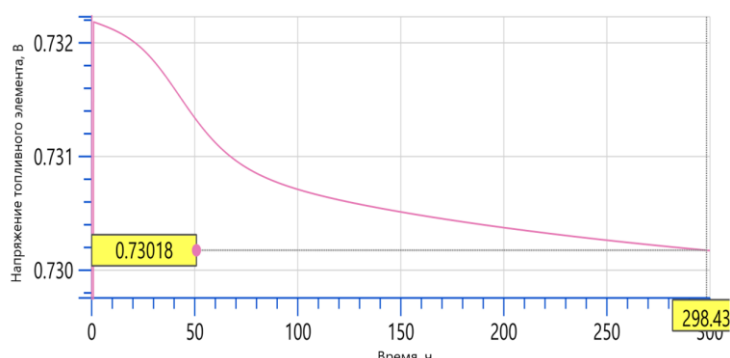


Рис. 6. Напряжение топливного элемента, Fig. 6. Voltage of the fuel cell included in the stack входящего в состав батареи топливных элементов

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

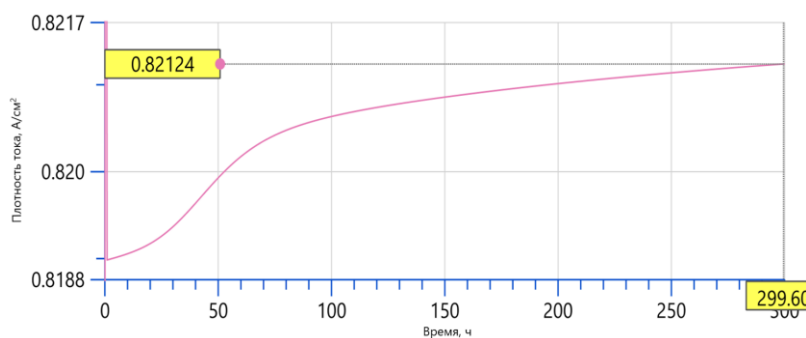


Рис. 7. Плотность тока топливного элемента, Fig. 7. Current density of the fuel cell included in the stack входящего в состав батареи топливных элементов

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

Вследствие того, что длительные симуляции требуют значительных вычислительных ресурсов, для одновременного анализа двух вариантов целесообразно сократить время симуляции. Характер изменений напряжения и плотности тока топливного элемента следует учитывать при дальнейших симуляциях.

Алгоритмы циклирования батареи топливных элементов

Рассмотрим первый алгоритм циклической работы батареи топливных элементов с режимом управления потреблением кислорода. В начале электрическая нагрузка не подключена к батарее топливных элементов. Осуществляется подача реагентов с постепенным увеличением давления. Когда давление подаваемых реагентов становится равным номинальному значению (1,4 бар абс.), подключается электрическая нагрузка, мощность которой линейно увеличивается до достижения номинальной мощности батареи топливных элементов (68 кВт). После непродолжительной работы на номинальной мощности батареи топливных элементов, электрическая нагрузка линейно уменьшается до 0 кВт, одновременно с этим происходит постепенное закрытие входных и выходных

катодных патрубков. Далее батарея топливных элементов остается с разомкнутой электрической цепью в течение фиксированного времени. На этом этапе завершается один цикл и по мере необходимости осуществляется повтор данных этапов.

Второй алгоритм циклической работы батареи топливных элементов с режимом анодной продувки воздухом отличается тем, что в начале каждого цикла анодная камера батареи топливных элементов заполняется воздухом (что имитирует длительный простой батареи). Далее анод кратковременно продувается водородом, часть кислорода может оставаться в анодном объеме. После данной операции алгоритм аналогичен варианту с режимом управления потреблением кислорода.

Результаты (Results)

Согласно описанным алгоритмам циклической работы батареи топливных элементов были проведены виртуальные испытания. Основные параметры представлены ниже (табл. 1). Из полученных данных следует, что при постоянной нагрузке уменьшение напряжения составило 2 мВ (за первые 300 ч), тогда как при применении первого циклического алгоритма (с режимом потребления кислорода) среднее уменьшение напряжения с каждым циклом составило 6,8 мВ/цикл. При втором циклическом алгоритме (с анодной продувкой воздухом) снижение напряжения составило 7,3 мВ/цикл.

Однако стоит учесть, что в данном случае рассматривались первые 20 циклов. Как показали длительные испытания при стационарной работе батареи топливных элементов (рис. 7), напряжение сильно изменяется в первые 50 часов эксплуатации и стабилизируется ближе к 300 часам работы. Следовательно, для определения корректного значения уменьшения напряжения при циклировании необходимо проведение циклических испытаний в течение не менее, чем 300 часов.

Полученные данные согласуются с результатами, приведенными в работе [7], где авторы зафиксировали наименьшее уменьшение напряжения – 23 мВ/цикл. Из-за различия в методике циклирования и применяемых материалах, наблюдается разница в значениях падений напряжения при циклировании. Однако близкий диапазон значений подтверждает корректность проведенных расчетов.

Таблица 1

Table 1

Параметры батареи топливных элементов при эксплуатации

Parameters of the fuel cell stack during operation

Параметр	Размерность	Эксперимент		
		Стационарная работа батареи	1-й алгоритм работы батареи	2-й алгоритм работы батареи
Время работы	ч	300	1	1
Удельная электрохимическая поверхность	м ² /г	63,4187	63,4158	63,4093
Концентрация Pt в мембране	моль/м ³	0,001014	0,001278	0,001513
Концентрация RfSO ₃ -групп в мембране	моль/м ³	1811,31	1809,257	1808,487
Массовая доля анодных газов при P = 68 кВт	-	H ₂ = 0,39 H ₂ O = 0,607 N ₂ = 0,003 O ₂ = 0	H ₂ = 0,393 H ₂ O = 0,494 N ₂ = 0,113 O ₂ = 0	H ₂ = 0,459 H ₂ O = 0,417 N ₂ = 0,112 O ₂ = 0,012
Максимальное напряжение топливного элемента	В	0,943	0,945	1,15
Суммарная молярная плотность H ₂ O ₂ в батарее топливных элементов	моль/м ³	0,01223	0,1204	0,1292
Снижение напряжения топливного элемента	мВ/цикл	2	6,8	7,3

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

Из приведенной таблицы следует, что 1-й алгоритм циклирования является наиболее подходящим для применения в энергетических установках, вследствие наименьшего

снижения напряжения (6,8 мВ/цикл), за исключением работы батареи топливных элементов в стационарном режиме.

Результаты исследования демонстрируют, что при циклической работе батареи топливных элементов суммарная молярная плотность перекиси водорода возрастает более чем в 10 раз, что впоследствии вызывает повышение напряжения топливных элементов при разложении перекиси водорода. Однако в ходе данных виртуальных испытаний подобное явление не зафиксировано. Более высокое максимальное напряжение топливных элементов во втором алгоритме циклирования батареи вызвано наличием реакций восстановления молекул кислорода в анодном объеме.

Во втором алгоритме циклирования батареи топливных элементов наличие кислорода в анодной камере вызывает повышение напряжения в отдельных частях батареи.

Концентрация платины в мембране говорит о том, что существует диффузия водорода с анода на катод, при этом молекулы водорода взаимодействуют с ионами платины и восстанавливают ее, образуя платиновые дорожки, которые в свою очередь вызывают повышенную деградацию полимера, так как на платиновой дорожке протекают реакции окисления и восстановления реагентов [19].

Более заметное уменьшение боковых сульфоновых групп ($RfSO_3$) свидетельствует об усиленной деградации полимера вследствие того, что деградация всей мембраны первоначально инициируется разрушением боковых цепей полимера [20].

Суммарная молярная плотность перекиси водорода в батарее топливных элементов при циклировании на порядок превосходит значение при стационарной работе батареи. Следовательно, необходимо предъявление повышенных требований к защитным покрытиям биполярных пластин (составной компонент топливных элементов) в связи с возникновением опасных ОН-радикалов при взаимодействии перекиси водорода с ионами металлов [20].

Выводы (Conclusions)

В данной работе были рассмотрены два алгоритма циклирования батареи топливных элементов, которые сравнивались с работой батареи на постоянной мощности (рис. 8). Первый алгоритм циклирования (рис. 9) с управлением потребления кислорода заключается в циклическом изменении мощности батареи топливных элементов от 0 кВт к номинальному значению мощности (68 кВт) и обратно до 0 кВт. При снижении мощности происходит постепенное уменьшение подачи воздуха (стехиометрия снижается) и когда снимаемая мощность равно 0 кВт входные и выходные катодные патрубки полностью закрываются. Данный алгоритм подходит для эксплуатации батареи топливных элементов в транспортном средстве.

Второй алгоритм циклирования (рис. 10) предполагает продувку анодного объема потоком воздуха перед каждым циклом, что моделирует длительный простой батареи топливных элементов. После заполнения воздухом анодного объема, осуществляется кратковременная продувка водородом и реализуется цикл согласно первому алгоритму.

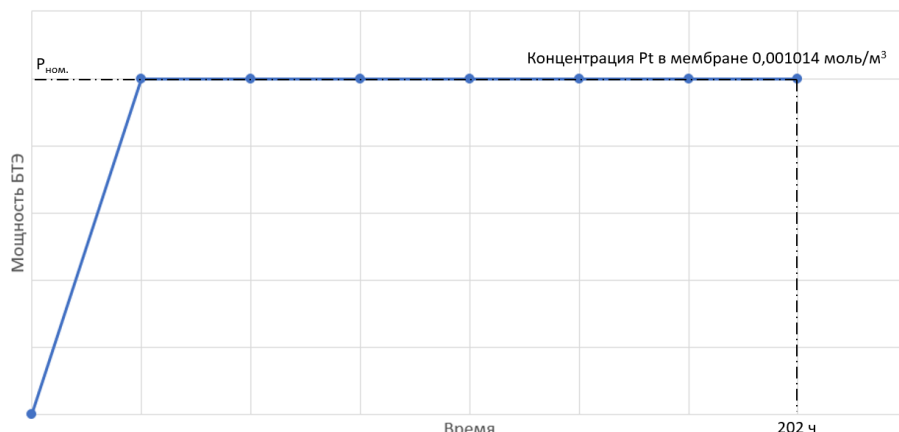


Рис. 8. Графическое изображение стационарной работы батареи топливных элементов

Fig. 8. Graphical representation of stationary work of FC stack

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

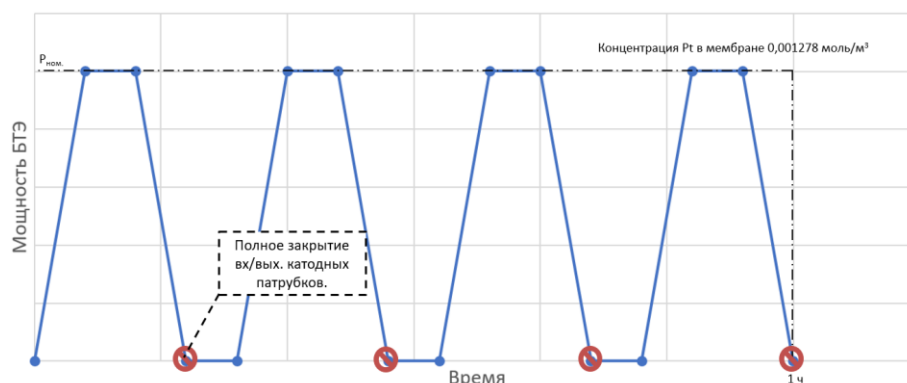


Рис. 9. Графическое изображение стационарной работы батареи топливных элементов с режимом управления потреблением кислорода

Fig. 9. Graphical representation of stationary work of FC stack

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

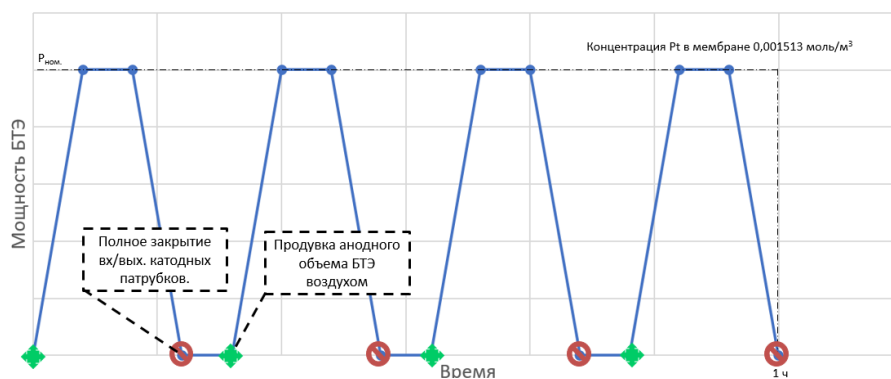


Рис. 10. Графическое изображение циклической работы батареи топливных элементов с режимом анодной продувки воздухом

Fig. 10. Graphical representation of FC stack cycle operation with anodic air purging mode

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

На основе исследования циклирования батареи при использовании данных алгоритмов в 1D-модели энергетической установки были определены ключевые показатели, по которым возможно выявить оптимальный метод запуска и останова батареи топливных элементов.

В результате расчетных исследований выявлено постепенное увеличение концентрации платины в протонообменной мембране при циклической работе, это приводит к снижению активной площади катализатора и сокращению срока эксплуатации топливных элементов. При использовании первого алгоритма напряжение топливных элементов уменьшилось на 6,85 мВ/цикл, концентрация платины в мембране составила 1,276 ммоль/м³ за первый час. При этом в батарее топливных элементов с предварительно заполненным воздухом анодом концентрация платины в мембране составила 1,513 ммоль/м³ (за 1 ч. работы), тогда как при работе с постоянной нагрузкой данная концентрация была достигнута после 202 часов работы батареи. Сравнение результатов моделирования позволяет сделать вывод, что применение 1-го алгоритма продлевает срок эксплуатации и его возможно использовать при реальной эксплуатации. Тогда как для ускоренных лабораторных испытаний топливных элементов на ресурс целесообразно применение 2-го алгоритма.

Тем не менее для получения более точных данных необходимо проведение длительного моделирования и экспериментов для верификации, так как в течение первых 300 часов эксплуатации наблюдается нелинейное изменение напряжения и плотности тока топливных элементов, входящих в состав батареи.

Полученные результаты после верификации будут использоваться ПАО «КАМАЗ» в процессе разработки отечественных батарей топливных элементов для транспортного применения.

Литература

1. Bravo D., Boillot L. Historical Analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles, Buses and Refuelling Infrastructure Projects // JRC Publications Repository. 2024. doi:10.2760/892745.

2. Корнилов С.В., Зверева Э.Р., Федорова А.А., и др. Перспективы развития водородной энергетики и рынка транспортных средств на водородном топливе // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №4 (56). С. 3-18.
3. Корнилов С.В., Симонов И.В., Зверева Э.Р. Исследование энергетических систем на водородных топливных элементах для транспортных средств // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей “Энергетика и автоматизация в современном обществе”; Санкт-Петербург. 2023. С 189 – 198.
4. Killingland M, Taylor C, Eriksen R. Hydrogen forecast to 2050 // DNV. 2022. 114 с.
5. Pei P., Meng Y., Chen D., et al. Lifetime prediction method of proton exchange membrane fuel cells based on current degradation law // Energy. 2023. V. 265, 126341. doi: 10.1016/j.energy.2022.126341.
6. Zhang T., Wang P., Chen H., et al. A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition // Appl Energy. 2018. Vol. 4, pp. 249 - 262. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.049.
7. Oyarse A., Zakrisson E., Ivity M., at al. Comparing shut-down strategies for proton exchange membrane fuel cells // Journal of Power Sources. 2014. Vol. 254, pp. 232–240. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.12.058.
8. Drugeot T., Micoud F., Pinton E., at al. Experimental assessment of proton exchange membrane fuel cell performance degradations during emulated start-up/shut-down phases // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, pp. 5630 - 5642. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.020.
9. Arrigoni A., Arosio V., Basso A., at al. Greenhouse Gas Implications of Extending the Service Life of PEM Fuel Cells for Automotive Applications: A Life Cycle Assessment // Clean Technologies. 2022. Vol. 4, pp. 132–148. doi: 10.3390/cleantechnol4010009.
10. Dirkes S., Leidig J., Fisch P., at al. Prescriptive Lifetime Management for PEM fuel cell systems in transportation applications, Part II: On-board operando feature extraction, condition assessment and lifetime prediction // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 283, 116943. doi: 10.1016/j.enconman.2023.116943.
11. Zhou Z., Ye L., Qiu D., at al. Experimental investigation and decoupling of voltage losses distribution in proton exchange membrane fuel cells with a large active area // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 452, 139497. doi: 10.1016/j.cej.2022.139497.
12. Bisello A., Colombo E., Baricci A., at al. Mitigated Start-Up of PEMFC in Real Automotive Conditions: Local Experimental Investigation and Development of a New Accelerated Stress Test Protocol // Journal of The Electrochemical Society. 2021. Vol. 168, 054501. doi: 10.1149/1945-7111/abf77b.
13. Reiser C., Bregoli L., Patterson T., at al. A Reverse-Current Decay Mechanism for Fuel Cells // Electrochemical and Solid-State Letters. 2005. Vol. 8, pp 273 - 276. doi: 10.1149/1.1896466.
14. Clemens F., Edjokola J., Telenta M., at al. Modeling of Catalyst Degradation in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells Applied to Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulation // Fuel Cells From Fundamentals to Systems. 2024. Vol. 24. doi: 10.1002/fuce.202300237.
15. Soleymani A., Bonville L., Wang C., at al. Quantifying key parameters to provide better understating of microstructural changes in polymer electrolyte membrane fuel cells during degradation: A startup/shutdown case study // Journal of Power Sources. 2023. Vol. 563. 232807. doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232807.
16. He L., Zhan Z., Hong C., at al. A quick evaluation method for the lifetime of the fuel cell MEA with the particle filter algorithm // International Journal of Green Energy. 2021. Vol. 18, pp 1536 – 1549. doi: 10.1080/15435075.2021.1911809.
17. Fan J., Yang Y., Ma T., at al. Investigation on a Shutdown Control Strategy with Residual Oxygen Rapid Elimination for Proton Exchange Membrane Fuel Cell System // Energies. 2023. Vol. 16. 1285. doi: 10.3390/en16031285.
18. Liu J., Chen H., Zhang T. Analysis of cold start characteristics in a PEMFC stack with different current loading modes // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 51, pp. 1456 – 1476. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.303.
19. Burlatsky S., Gummalla M., Atrazhev V., at al. The Dynamics of Platinum Precipitation in an Ion Exchange Membrane // Journal of The Electrochemical Society. 2011. Vol. 158, pp. 322- 330. doi: 10.1149/1.3532956.
20. Wong K., Kjeang E. Macroscopic In-Situ Modeling of Chemical Membrane Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells // Journal of The Electrochem Society. 2014. Vol. 161, pp. 823–832. doi: 10.1149/2.0031409jes.

Авторы публикации

Симонов Иван Владимирович – ведущий инженер-конструктор, центр электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *Simonov.IV@kamaz.ru*

Кудинов Даниил Владимирович – аспирант ФГБОУ ВО «Казанский федеральный университет», г. Казань, Россия; ведущий инженер-конструктор, центр электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *KudinovDV@kamaz.ru*

Шевченко Денис Иванович – начальник отдела, ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *ShevchenkoDI@kamaz.ru*

Корнилов Семён Владимирович – аспирант ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия; главный конструктор энергетических систем, центр электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *Kornilov.SV@kamaz.ru*

Фардеев Ленар Ильдарович – директор центра электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *Lenar.Fardeev@kamaz.ru*

References

1. Bravo D., Boillot L. Historical Analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles, Buses and Refuelling Infrastructure Projects // JRC Publications Repository. 2024. doi:10.2760/892745.
2. Kornilov S.V., Zvereva E.R., Fedorova A.A., et al. Prospects for the development of hydrogen energy and the market for hydrogen-powered vehicles // Kazan state power engineering university bulletin. 2022. Vol. 14. No. 4 (56). pp. 3–18.
3. Kornilov S.V., Simonov I.V., Zvereva E.R. Research on hydrogen fuel cell energy systems for vehicles // Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Teachers “Energy and Automation in Modern Society”; St. Petersburg. 2023. pp. 189–198.
4. Killingland M, Taylor C, Eriksen R. Hydrogen forecast to 2050 // DNV. 2022. 114 c.
5. Pei P., Meng Y., Chen D., et al. Lifetime prediction method of proton exchange membrane fuel cells based on current degradation law // Energy. 2023. V. 265, 126341. doi: 10.1016/j.energy.2022.126341.
6. Zhang T., Wang P., Chen H., et al. A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition // Appl Energy. 2018. Vol. 4, pp. 249 - 262. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.049.
7. Oyarce A., Zakrisson E., Ivity M., at al. Comparing shut-down strategies for proton exchange membrane fuel cells // Journal of Power Sources. 2014. Vol. 254, pp. 232–240. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.12.058.
8. Drugeot T., Micoud F., Pinton E., at al. Experimental assessment of proton exchange membrane fuel cell performance degradations during emulated start-up/shut-down phases // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, pp. 5630 - 5642. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.020.
9. Arrigoni A., Arosio V., Basso A., at al. Greenhouse Gas Implications of Extending the Service Life of PEM Fuel Cells for Automotive Applications: A Life Cycle Assessment // Clean Technologies. 2022. Vol. 4, pp. 132–148. doi: 10.3390/cleantechnol4010009.
10. Dirkes S., Leidig J., Fisch P., at al. Prescriptive Lifetime Management for PEM fuel cell systems in transportation applications, Part II: On-board operando feature extraction, condition assessment and lifetime prediction // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 283, 116943. doi: 10.1016/j.enconman.2023.116943.
11. Zhou Z., Ye L., Qiu D., at al. Experimental investigation and decoupling of voltage losses distribution in proton exchange membrane fuel cells with a large active area // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 452, 139497. doi: 10.1016/j.cej.2022.139497.
12. Bisello A., Colombo E., Baricci A., at al. Mitigated Start-Up of PEMFC in Real Automotive Conditions: Local Experimental Investigation and Development of a New Accelerated Stress Test Protocol // Journal of The Electrochemical Society. 2021. Vol. 168, 054501. doi: 10.1149/1945-7111/abf77b.
13. Reiser C., Bregoli L., Patterson T., at al. A Reverse-Current Decay Mechanism for Fuel Cells // Electrochemical and Solid-State Letters. 2005. Vol. 8, pp 273 - 276. doi: 10.1149/1.1896466.
14. Clemens F., Edjokola J., Telenta M., at al. Modeling of Catalyst Degradation in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells Applied to Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulation // Fuel Cells From Fundamentals to Systems. 2024. Vol. 24. doi: 10.1002/fuce.202300237.
15. Soleymani A., Bonville L., Wang C., at al. Quantifying key parameters to provide better understating of microstructural changes in polymer electrolyte membrane fuel cells during degradation: A startup/shutdown case study // Journal of Power Sources. 2023. Vol. 563. 232807. doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232807.
16. He L., Zhan Z., Hong C., at al. A quick evaluation method for the lifetime of the fuel cell MEA with the particle filter algorithm // International Journal of Green Energy. 2021. Vol. 18, pp 1536 – 1549. doi: 10.1080/15435075.2021.1911809.

17. Fan J., Yang Y., Ma T., et al. Investigation on a Shutdown Control Strategy with Residual Oxygen Rapid Elimination for Proton Exchange Membrane Fuel Cell System // *Energies*. 2023. Vol. 16. 1285. doi: 10.3390/en16031285.

18. Liu J., Chen H., Zhang T. Analysis of cold start characteristics in a PEMFC stack with different current loading modes // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 51, pp. 1456 – 1476. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.303.

19. Burlatsky S., Gummalla M., Atrazhev V., et al. The Dynamics of Platinum Precipitation in an Ion Exchange Membrane // *Journal of The Electrochemical Society*. 2011. Vol. 158, pp. 322- 330. doi: 10.1149/1.3532956.

20. Wong K., Kjeang E. Macroscopic In-Situ Modeling of Chemical Membrane Degradation in Polymer Electrolyte Fuel Cells // *Journal of The Electrochem Society*. 2014. Vol. 161, pp. 823–832. doi: 10.1149/2.0031409jes.

Authors of the publication

Ivan V. Simonov – PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia. *Simonov.IV@kamaz.ru*

Daniil V. Kudinov – Kazan Federal University, Kazan, Russia; PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia. *KudinovDV@kamaz.ru*

Denis I. Shevchenko – PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia. *ShevchenkoDI@kamaz.ru*

Semyon V. Kornilov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia; PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia. *Kornilov.SV@kamaz.ru*

Lenar I. Fardeev – PJSC “KAMAZ”, Naberezhnye Chelny, Russia. *Lenar.Fardeev@kamaz.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **04.08.2025 г.**

Отредактировано **23.12.2025 г.**

Принято **17.01.2026 г.**



ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАТНОГО ЭЛЕКТРОДИАЛИЗА НА ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОМ АППАРАТЕ С БИПОЛЯРНЫМИ МЕМБРАНАМИ

Филимонова А.А., Чичиров А.А., Ахметзянова А.Т., Черкасов А.С., Майоров Е.С.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

19aigul@rambler.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В данной работе исследован процесс обратного электродиализа (далее ОЭД) с использованием биполярных мембран, направленный на преобразование энергии градиента солености и рН в электрическую энергию. *ЦЕЛЬ.* Основной целью являлось изучение эффективности этой технологии при работе с модельными и промышленными растворами, включая регенерационные отходы тепловых электрических станций (далее ТЭС). *МЕТОДЫ.* В ходе экспериментов оценивались ключевые параметры системы, такие как плотность тока, удельная мощность, внутреннее сопротивление и коэффициент полезного действия (далее КПД), а также анализировались факторы, влияющие на производительность установки. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Результаты показали, что биполярный ОЭД позволяет не только генерировать электроэнергию, но и производить кислоты и щелочи за счет диссоциации воды в мембранах. Максимальная достигнутая удельная мощность составила 3,5 Вт/м² при плотности тока 12 А/м², а энергетический КПД превысил 20%. При этом промышленные растворы продемонстрировали характеристики, близкие к модельным, что подтверждает возможность их использования в реальных условиях. Научная значимость работы заключается в углублении понимания электрохимических процессов в биполярных мембранах и разработке методов оптимизации системы. Практическая ценность связана с созданием экологически безопасной технологии для утилизации отходов и одновременного получения энергии и химических продуктов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Технология имеет потенциал для применения в опреснении воды, водородной энергетике и химической промышленности, способствуя переходу к устойчивому развитию. Исследование также выявило основные ограничения, такие как узкий диапазон оптимальных рабочих параметров и потери энергии из-за паразитных процессов. Дальнейшие работы должны быть направлены на повышение селективности мембран и снижение внутреннего сопротивления системы. В целом, биполярный ОЭД представляет собой перспективное направление в возобновляемой энергетике и ресурсосбережении.

Ключевые слова: обратный электродиализ; биполярные мембраны; градиент солености; возобновляемая энергия; утилизация отходов; кислотно-щелочные растворы.

Для цитирования: Филимонова А.А., Чичиров А.А., Ахметзянова А.Т., Черкасов А.С., Майоров Е.С. Исследования процесса обратного электродиализа на электромембранном аппарате с биполярными мембранами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 103-117. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-103-117.

STUDIES OF THE REVERSE ELECTRODIALYSIS PROCESS ON AN ELECTROMEMBRANE APPARATUS WITH BIPOLAR MEMBRANES

Filimonova A.A., Chichirov A.A., Akhmetzyanova A.T., Cherkasov A.S., Mayorov E.S.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

19aigul@rambler.ru

Abstract: *RELEVANCE.* In this paper, the process of reverse electrodialysis (RED) using bipolar membranes is studied, aimed at converting the energy of the salinity and pH gradient into electrical energy. *THE PURPOSE* was to study the effectiveness of this technology when working with model and industrial solutions, including regenerative waste from thermal power plants. *METHODS.* During the experiments, key system parameters such as current density,

specific power, internal resistance and efficiency were evaluated, as well as factors affecting plant performance were analyzed. **RESULTS.** The results showed that bipolar RED allows not only to generate electricity, but also to produce acids and alkalis due to the dissociation of water in the membranes. The maximum achieved specific power was 3.5 W/m² at a current density of 12 A/m², and the energy efficiency exceeded 20%. At the same time, industrial solutions have demonstrated characteristics close to the model ones, which confirms the possibility of their use in real conditions. The scientific significance of the work lies in deepening the understanding of electrochemical processes in bipolar membranes and developing methods for optimizing the system. The practical value is associated with the creation of an environmentally friendly technology for waste disposal and simultaneous production of energy and chemical products. **CONCLUSION.** The technology has potential for applications in water desalination, hydrogen energy, and the chemical industry, contributing to the transition to sustainable development. The study also revealed the main limitations, such as a narrow range of optimal operating parameters and energy losses due to parasitic processes. Further work should be aimed at increasing the selectivity of the membranes and reducing the internal resistance of the system. In general, bipolar RED represents a promising direction in renewable energy and resource conservation.

Keywords: reverse electrodialysis; bipolar membranes; salinity gradient; renewable energy; waste management; acid-base solutions.

For citation: Filimonova A.A., Chichirov A.A., Akhmetzyanova A.T., Cherkasov A.S., Mayorov E.S. Studies of the reverse electrodialysis process on an electromembrane apparatus with bipolar membranes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 103-117. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-103-117.

Введение (Introduction)

Известно, что перед человечеством поставлены глобальные вызовы, такие как растущий энергодефицит и климатическая повестка. Так, по данным (IEA, 2023) к 2050 году мировой спрос на энергию вырастет на 50%. В тоже время для ограничения глобального потепления до 1,5С° необходимо к 2030 году сократить выбросы CO₂ на 45% (IPCC, 2022). При этом традиционные источники (нефть, уголь) исчерпаемы и загрязняют окружающую среду. Таким образом, взгляд общественности все больше направлен в сторону альтернативных источников энергии. В этой связи градиент солености между водными средами с разным уровнем минерализации имеет огромный потенциал и выступает как неиспользуемый ресурс.

Энергия, заключенная в смешении речной и морской воды (градиент солености), оценивается в 2,6 ТВт – это ~20% мирового потребления электроэнергии (Nature, 2021).

Таблица 1
Table 1

Преимущества перед другими возобновляемыми источниками энергии
Advantages over other renewable energy sources

Источник	Преимущества градиента солености
Солнечная/ветровая	Работает 24/7, независимо от погоды
Гидроэлектростанция	Не требует плотин и не вредит экосистемам
Биомасса	Не конкурирует с сельским хозяйством

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

В данной работе исследован механизм процессов при обратном электродиализе и обратном биполярном электродиализе с высокоминерализованными отходами.

Следовательно, цель исследования заключается в использовании градиента солености – это неисчерпаемый и стабильный источник энергии, ключевой элемент циркулярной экономики при использовании сточных вод в качестве высокоминерализованных растворов с одновременной генерацией энергии, стратегическое направление для стран с протяженной береговой линией (Россия, ЕС, США, Китай).

Научная значимость заключается в обосновании использовании сточных вод в качестве высокоминерализованных растворов с одновременной выработкой электроэнергии в одной схеме методом обратного электродиализа и обратного

биполярного электродиализа.

Практическая значимость исследования заключается в том, что данная технология обеспечивает рекуперацию энергетического потенциала жидких отходов предприятий энергетического сектора для их использования в цепях генерации и трансформации электроэнергии.

Литературный обзор (Literature Review)

Обратный электродиализ (Reverse Electrodialysis, ОЭД) – это технология преобразования энергии градиента солености (разницы концентраций соли) в электрическую энергию. Использование биполярных мембран (БМ) в ОЭД позволяет дополнительно генерировать кислоты и щелочи за счет диссоциации воды, что расширяет возможности системы [1].

ОЭД основан на разнице химических потенциалов между растворами с высокой и низкой концентрацией солей. Ионы (Na^+ и Cl^-) проходят через ионоселективные мембраны, создавая электрический ток.

КПД системы зависит от:

- числа мембранных пар;
- сопротивления мембран;
- градиента концентраций.

БМ в ОЭД состоят из катионообменного (КМ) и анионообменного (АМ) слоев. Под действием электрического поля в БМ происходит диссоциация воды на H^+ и OH^- (рис. 1). Таким образом, наличие биполярных мембран позволяет одновременно генерировать электроэнергию и производить кислоту (HCl) и щелочь (NaOH) [2].

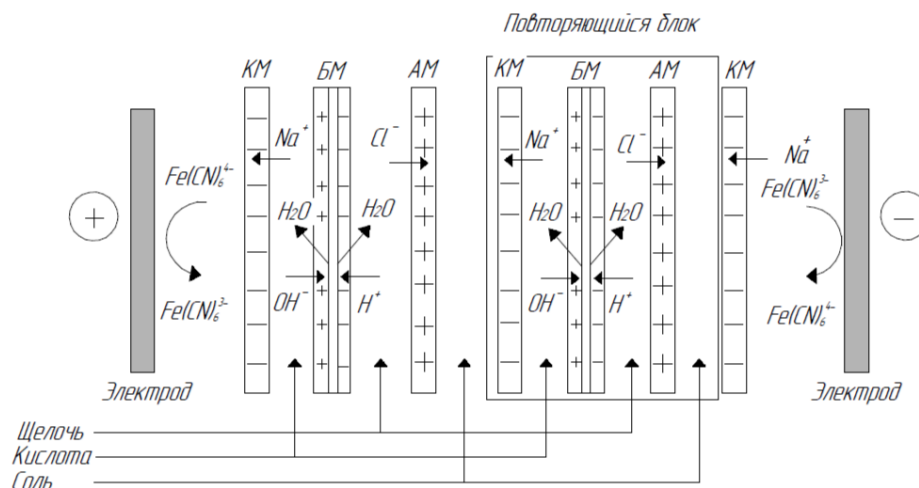


Рис. 1. Принцип обратного биполярного обратного электродиализа Fig. 1. The principle of reverse bipolar reverse electrodialysis

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

Технология ОЭД с БМ активно развивается, о чем свидетельствует рост числа патентных заявок за последние 10 лет. Патенты охватывают такие направления, как:

- улучшение конструкции мембран;
- гибридные системы ОЭД совместно с опреснением, ОЭД и электролиз;
- применение в энергетике и химической промышленности.

Таблица 2
Table 2

Географическое распределение патентов
Geographical distribution of patents

Страна	Количество патентов (2015-2025)	Основные патентообладатели
США	45	General Electric, Dow Chemical
Китай	62	Tsinghua University, Sinopec
Япония	28	Toray Industries, Hitachi
Европа	37	Fujifilm, SUEZ
Россия	12	РХТУ им. Менделеева, Роснано

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

Китай и США лидируют по числу заявок, что связано с господдержкой «зеленых» технологий.

Ключевые направления исследований в области биполярного обратного электродиализа фокусируются на совершенствовании материалов и конструкции мембран, а также на оптимизации работы системы биполярного электродиализа.

Главным трендом усовершенствования технологии является разработка БМ нового поколения. Так, внедрение наночастиц IrO_2 , TiO_2 или графена в межфазный слой БМ для ускорения диссоциации воды повышает КПД на 15-20%. Примером являются мембраны с графеновым покрытием [3].

Долгое время американские мембраны Nafion были безальтернативным вариантом мембран, используемых для ОЭД. В последние десятилетия поступают предложения по замене дорогостоящего Nafion на SPEEK (сульфированный полиэфирэфиркетон) или керамику для снижения стоимости, примерно на 40%. Другим вариантом являются мембраны с пористыми структурами для уменьшения сопротивления [4].

Следующим направлением является модификация мембран, например, ввод функции селективности к ионам. Модификация поверхностей для избирательного транспорта Li^+ , Mg^{2+} актуальна для переработки рассолов. Другим вариантом модификации являются антифоулинговые покрытия, представляющие собой полимерные слои, предотвращающие биообрастание, например, на основе полидопамина.

С целью оптимизации работы и повышения эффективности энергетических систем на основе ОЭД с БМ применяется динамическое управление потоками. Алгоритмы для попеременного изменения направления тока снижают концентрационную поляризацию и повышают КПД до 50%).

Также повышают эффективность процесса каскадные системы с многоступенчатым принципом работы для максимального использования градиента солености, что повышает мощность до 5-10 Вт/м².

Таблица 3

Table 3

Гибридизация биполярного электродиализа с другими технологиями

Hybridization of bipolar electro dialysis with other technologies

Технология	Преимущества	Пример проекта
Электролиз	Одновременное производство H_2 и NaOH/HCl	Проект EU Horizon 2020 (Нидерланды)
Опреснение (RO)	Утилизация рассолов и снижение энергозатрат на 30%	Установка REDstack (50 кВт)
Микробные топливные элементы (MFC)	Очистка сточных вод с генерацией энергии	Исследования Tsinghua University

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

Таким образом, биполярный ОЭД представляет собой перспективную технологию, объединяющую генерацию энергии из градиента солености с производством ценных химических продуктов, опреснением, утилизацией сточных вод.

Таблица 4 систематизирует ключевые исследования и разработки в этой области, отражая эволюцию технологии от фундаментальных исследований до промышленных применений.

В таблице представлены научные исследования, демонстрирующие прогресс в понимании физико-химических принципов ОЭД с БМ и способов оптимизации системы; технологические разработки, направленные на повышение эффективности и расширение функциональных возможностей; патентные решения, отражающие коммерциализацию технологии и ее адаптацию для различных секторов экономики.

Таблица 4

Table 4

Ключевые исследования и разработки технологии биполярного обратного электродиализа

Key research and development of bipolar reverse electro dialysis technology

Проект	Ссылка
Исследование влияния сопротивления мембран на КПД ОЭД	[5]
Моделирование работы БМ в гибридных ОЭД-системах	[6]
Демонстрация комбинированной ОЭД с биполярными мембранами системы с КПД до 40%	[7]
Использование морской и речной воды в ОЭД с биполярными мембранами для получения кислот и щелочей	[8]
Применение наноразмерных биполярных мембран для снижения энергопотерь	[9]
Опреснение воды	[10]

Восстановление ресурсов из промышленных стоков	[11]
Интеграция с ВИЭ (солнечная энергия с ОЭД) с биполярными мембранами	[12]
Оптимизация биполярных мембран Уменьшает сопротивление и повышает эффективность диссоциации воды Применение: гибридные ОЭД-системы для опреснения	[13]
Повышает химическую стойкость и срок службы	[14]
Гибридные энергетические системы Сочетает генерацию электроэнергии и производство водорода	[15]
Использует избыток энергии для повышения КПД системы	[16]
Промышленные приложения Извлечение Li ⁺ и других металлов с одновременной генерацией энергии	[17]
Получение HCL/NaOH из промышленных отходов	[18]

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

Данный обзор позволяет проследить взаимосвязь между фундаментальными исследованиями и практическими разработками, а также оценить текущий уровень зрелости технологии обратного биполярного электролиза и перспективы ее дальнейшего развития. Представленные работы демонстрируют значительный потенциал данной технологии для решения актуальных задач в области возобновляемой энергетики, ресурсосбережения и экологически чистого производства.

Ключевые направления исследований в области технологии ОЭД с БМ фокусируются на следующих аспектах:

- материалы (дешевые, стабильные, селективные мембраны);
- гибридации (электролиз, опреснение, микробные топливные элементы);
- приложениях (промышленность, энергетика, медицина).

По данным различных аналитических отчетов в перспективе к 2030 году технология может занять нишу в сфере опреснения с рынком в \$30 млрд., «зеленой» химии (замена хлор-щелочного процесса), водородной энергетике.

Целью работы явилось исследование процесса ОЭД с использованием БМ в электромембранном аппарате для оценки эффективности преобразования энергии градиента солености и pH в электрическую энергию. Работа сочетает фундаментальные исследования с прикладными решениями, направленными на преодоление энергетических и экологических вызовов.

Научная значимость работы состоит в следующем:

1. Углубление понимания механизмов массопереноса и электрохимических процессов в системах с биполярными мембранами.

2. Разработка методик оптимизации параметров ОЭД (число мембран, градиенты концентраций, управление сопротивлением) для повышения КПД.

3. Вклад в развитие альтернативной энергетики, основанной на использовании неисчерпаемых ресурсов, таких как градиент солености и промышленные отходы.

Практическая значимость:

1. Создание энергоэффективных и экологически безопасных технологий для утилизации отходов (например, регенерационных растворов ТЭС) с одновременной генерацией электроэнергии и ценных химических продуктов (кислот, щелочей).

2. Потенциальное применение в опреснении воды, водородной энергетике и «зеленой» химии, что соответствует глобальным трендам устойчивого развития.

3. Возможность коммерциализации технологии, особенно в регионах с протяженной береговой линией или промышленными стоками, благодаря снижению затрат на мембраны и повышению мощности системы.

Материалы и методы (Materials and methods)

Лабораторные и опытно-промышленные эксперименты проведены на лабораторном стенде, включающем модернизированный многокамерный электромембранный аппарат с ионоселективными мембранами, дополнительные устройства, комплектующие и приборы контроля (табл. 5).

Таблица 5
Table 5

Конструкционные характеристики электромембранного аппарата
Structural characteristics of the electromembrane apparatus

Проект	Ссылка
Общее число рабочих камер	100
Число камер по 1 тракту	25
Ширина камеры	226 мм
Длина камеры	358 мм
Мембранное расстояние (толщина мембранных прокладок)	1,0 мм
Число электродов	2
Материал электродов	титан, покрытый платиной
Предел напряжения на электродах, В	0 – 100
Максимальный рабочий ток, А	15

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

Исследование ОЭД на лабораторной установке

В ходе серии экспериментов изучены характеристики ОЭД на различных модельных растворах, включая хлорид натрия, серную кислоту и гидроксид натрия. Исследованы ключевые параметры процесса, зависящие от:

- конструкции электромембранного модуля (число рабочих камер, тип мембран);
- характеристик электродной системы (состав раствора, тип электрохимической реакции);
- вольтамперных показателей;
- величины внешней нагрузки;
- гидродинамических условий (скорость подачи растворов в режимах ожидания и разряда).

В качестве рабочих сред использованы реальные технологические жидкости из системы водоподготовки ТЭС. В тракт диализата подавался низкоминерализованный раствор (частично обессоленная или водопроводная вода), а в тракт концентрата – высокоминерализованные жидкие отходы водоподготовки.

Методы анализа растворов:

- щелочность: по фенолфталеину (Щф/ф) и метилоранжу (Щм/о);
- концентрации ионов: Cl^- , Na^+ , Fe^{2+} , SiO_2 ;
- перманганатная окисляемость;
- рН и удельная электропроводность (УЭП) (методики ГОСТ);
- общее солесодержание (ОСС) – расчет по калибровочной зависимости УЭП;
- гидратная щелочность (Щг) – расчет по стехиометрическим уравнениям.

Характеристики использованных мембран приведены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6
Table 6

Характеристики использованных мембран ОАО «ЩекиноАзот»
Characteristics of used membranes of JSC "ShchekinoAzot"

Марка мембран	Тип мембраны	Ионообменная группа	Толщина, мм	Обменная емкость, мг-экв/г	Поверхностное электрическое сопротивление, Ом.см ²
МК-40	Катионообменная мембрана, гетерогенная	R - SO_3^-	0,45-0,55	1,4-1,6(наб) 2,3 (сух)	<10
МА-41	Анионообменная мембрана, гомогенная	R - $(CH_3)_3 N^+$	0,6	2,5	<20
МБ-2	Получена прессованием МК-40 и МА-41	–	0,80-1,00	–	<20

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

Характеристики использованных ультратонких гомогенных мембран (Китай)
Characteristics of used ultrathin homogeneous membranes (China)

Марка мембран	Тип мембран	Удельный вес мембраны, мг/см ²	Ионообменная мощность, мЭкв/г	Удельная электропроводность, мСм/см	Скорость переноса мМоль/ (мин*см ²)	Толщина, мкм	Прочность при разрыве, МПа	Поверхностное электрическое сопротивление Ом*см ²	Число переноса, доли
FKS-30	КМ	3,4-4,3	1,3-1,6	>2,8	<350	24-34	30	<1,2	0,965
FAS-30	АМ	3,5-4,4	1,6-2,0	3-7	3000-4000	25-35	25-40	0,3-0,6	0,92-0,96
FBM-РК	БМ	15-17	–	–	–	130-160	–	–	–
FKS-30	КМ	3,4-4,3	1,3-1,6	>2,8	<350	24-34	30	<1,2	0,965

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

Методика проведения эксперимента

Сборка электромембранного модуля осуществлялась в соответствии с исследовательскими задачами. На подготовительном этапе подбирались:

- тип ионоселективных мембран;
- конфигурация потоков;
- количество рабочих ячеек.

После подготовки модуля выполнялись следующие операции:

- приготовление рабочих растворов требуемой концентрации;
- заполнение соответствующих резервуаров растворами по отдельным трактам;
- запуск циркуляционной системы с заданным объемным расходом (v , л/ч);
- регулярный контроль параметров с фиксированным временным интервалом (τ , ч).

Продолжительность каждого эксперимента составляла:

- стандартно – 12 часов;
- либо до достижения полного выравнивания концентраций в камерах концентрата и диализата.

Исследование проводилось в двух режимах:

- рабочий режим с подключенной внешней нагрузкой (режим разряда);
- холостой режим с разомкнутой цепью (режим батареи).

Программа измерений включала:

- в первые 2 часа – замеры каждые 5 минут;
- следующие 2 часа – контроль каждые 15 минут;
- далее до завершения опыта – измерения с 30-минутным интервалом.

В ходе эксперимента фиксировались следующие рабочие параметры установки обратного электродиализа:

U_{OC} – напряжение при разомкнутой цепи (open circuit), В;

U_R – напряжение при замыкании цепи с подключением нагрузки R , В;

I – сила тока при замыкании цепи с подключением нагрузки, А;

χ – УЭП циркулирующих рабочих растворов, мСм/см;

pH – водородный показатель циркулирующих рабочих растворов, ед.;

Щ, К, ПО, c – щелочность, кислотность, перманганатная окисляемость, концентрация и др. показатели при работе с растворами сложного состава;

V – объемы растворов по каждому тракту, л;

T, t – температуры растворов, °С;

E – ЭДС, В.

По полученным экспериментальным данным и разработанной математической модели, учитывающей электрохимические, электро-, гидро-, термодинамические и массообменные процессы, происходящие в аппарате ОЭД, рассчитываются основные и

вспомогательные параметры и функции, характеризующие работу установки. К основным относятся параметры, описывающие массообменные и электродинамические процессы в аппарате;

– разница между ЭДС стека и напряжением разомкнутой цепи, В

$$\Delta U = E_{\text{стек}} - U_{\text{OC}} \quad (1)$$

сравнивается с расчетным ЭДС по уравнению Нернста;

– расчетное внешнее сопротивление, Ом

$$R_{\text{расч}} = U_R / I \quad (2)$$

$$R_{\text{расч}} \approx R_{\text{внеш}} \quad (3)$$

сравнивается с R подключенной нагрузки;

– внутреннее сопротивление стека (r), Ом

$$r = (U_{\text{OC}} - U_R) / I \quad (4)$$

– удельное сопротивление рабочих растворов, Ом*м

$$\rho = 10 / \chi \quad (5)$$

рассчитывается по измеренной удельной электропроводности (χ), См/см;

– плотность тока на мембране, А/м²

$$i_m = I / S_m \quad (6)$$

измеренной силе тока (I), А, S_m – рабочая площадь мембраны, м²;

– поток вещества с эквивалентной массой (Мэ) из концентрата в диализат, моль экв/м²;

– мощность, снимаемая с аппарата, Вт/апп;

– удельная мощность или плотность мощности, Вт/м² мембранной пары;

– электрическая эффективность, энергетическая эффективность и выход тока по веществу.

Лабораторные исследования процесса ОЭД проводились на специально разработанном электромембранном стенде. Установка была собрана в трехконтурной конфигурации, оптимизированной для биполярного электродиализа.

Конструктивные особенности установки:

Применены ионоселективные мембраны:

– гетерогенные мембраны IONSEP-МС-С и IONSEP-МС-А (китайского производства);

– биполярные мембраны МБ-2 (производства «Щекиноазот», Россия).

Общее количество мембран – 73, включая 24 мембраны каждого типа.

Электродная система: платинированные титановые электроды.

Электродный раствор: 0,1 н. раствор Na₂SO₄.

Протекающие электродные реакции: выделение водорода и кислорода

Характеристика рабочих растворов:

В качестве рабочих сред использовались реальные регенерационные растворы ионообменной установки Казанской ТЭЦ-3:

1. Кислый раствор:

Состав: остатки серной кислоты с сульфатами Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺.

Параметры:

– УЭП: 40,8 мСм/см

– рН: 1,78

– Эквивалентная концентрация Н⁺: 16,6 моль/л

2. Щелочной раствор:

Состав: остатки щелочи с солями натрия (сульфаты, хлориды, карбонаты) и органическими примесями

Параметры:

– УЭП: 29 мСм/см

– рН: 12,17

– Эквивалентная концентрация ОН⁻: 16,1 моль/л

Условия проведения эксперимента:

Солевой тракт заполнялся нейтрализованной смесью кислого и щелочного растворов.

Режим работы: рециркуляция всех растворов.

Скорость потока: 200 л/ч.

Температурный режим: 20-25°C (комнатная температура).

Схема движения потоков: параллельноточная.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Результаты исследований процесса обратного биполярного электродиализа в условиях кислотно-щелочного градиента

Экспериментальная часть работы была посвящена изучению характеристик обратного электродиализа с использованием биполярных мембран на модельных растворах. В качестве рабочих сред применялись:

1. Щелочной раствор (ЩР) – водный раствор NaOH.
2. Кислый раствор (КР) – водный раствор H₂SO₄.

Особенности методики:

- объемы ЩР и КР подбирались эквивалентными;
- в солевом тракте (СР) использовали концентрированный раствор Na₂SO₄ (10-15 г/л) вместо воды для снижения внутреннего сопротивления системы и минимизации осмотических эффектов.

В ходе исследований изучались следующие параметры:

1. Кинетика рекомбинации ионов H⁺ и OH⁻.
2. Особенности межмембранного массопереноса.
3. Влияние факторов:

- характер электродных процессов;
- размер мембранного блока;
- величина рН-градиента;
- скорость циркуляции растворов;
- температурный режим;
- величина внешней нагрузки.

Специфика ОЭД с биполярными мембранами:

- усложненная трехконтурная схема (рис. 2);
- более сложный состав рабочих растворов;
- наличие дополнительных транспортных процессов;
- необходимость учета большего числа параметров.

Основные отличия от классического ОЭД:

1. Наличие трех отдельных потоков вместо двух.
2. Дополнительные процессы переноса протонов и гидроксид-ионов.
3. Более сложная зависимость от градиента рН.
4. Необходимость точного контроля баланса ионных потоков.

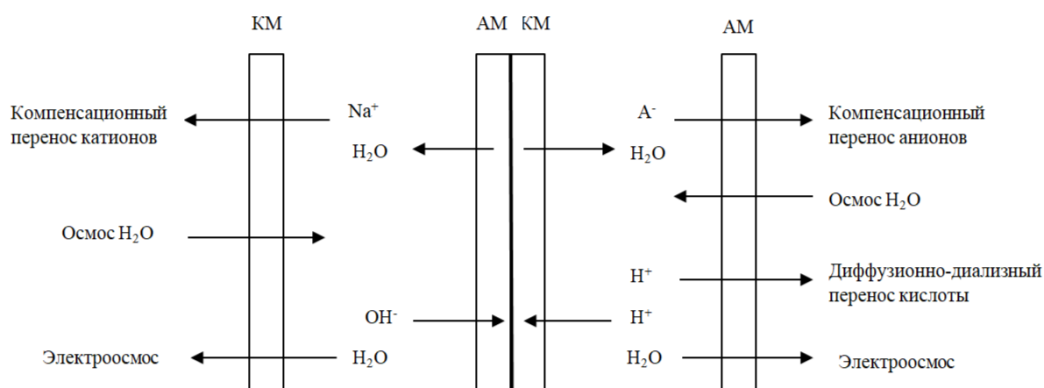


Рис. 2. Структура и направление массопотоков при ОЭД с биполярными мембранами с кислотно-основной биполярной нейтрализацией

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

Из-за неидеальной селективности (проницаемости) мембран растворы содержат одновременно с кислотой или щелочью еще и нейтральную соль. Типичная динамика процесса представлена на рисунке 3.

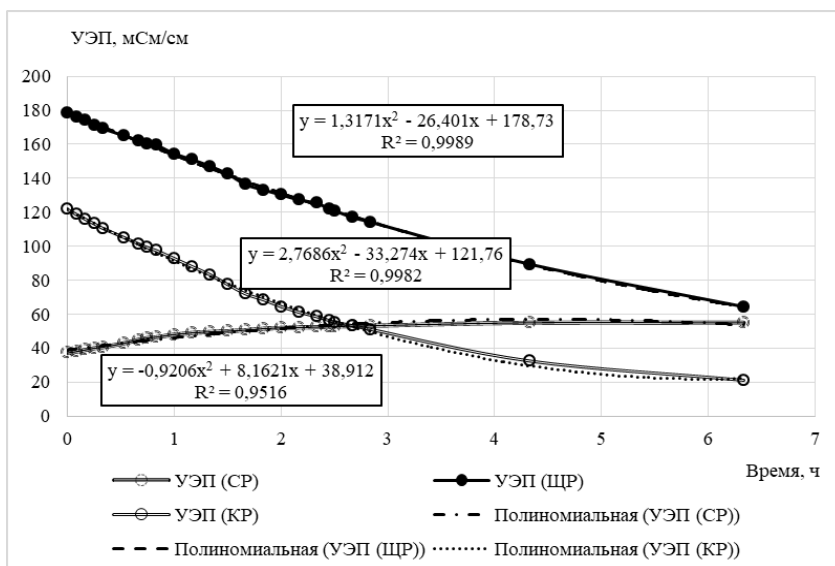


Рис. 3. Динамика деминерализации кислого, щелочного и солевого растворов при обратном биполярном электролизе модельных растворов 0,1 н NaOH и 0,1 н H₂SO₄ на электромембранном аппарате с мембранами МК40-МБ2-МА41. Число ячеек или МБ – 24. Внешнее сопротивление – 10 Ом, приэлектродный раствор 0,05 н Na₂SO₄

Fig. 3. Dynamics of demineralization of acidic, alkaline, and saline solutions during reverse bipolar electro dialysis of 0.1 n NaOH and 0.1 n H₂SO₄ model solutions on an electromembrane apparatus with МК40-МБ2-МА41 membranes. The number of cells or MB is 24. The external resistance is 10 Ohms, the electrode solution is 0.05 n Na₂SO₄

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

Обработка экспериментальных данных представлена на рисунке 4. Проведены расчеты зависимости генерируемого электричества (Q, Ф) и электроэнергии (Вт*ч) от количества рекомбинации кислоты и щелочи, выраженной в моль экв (рис. 5).

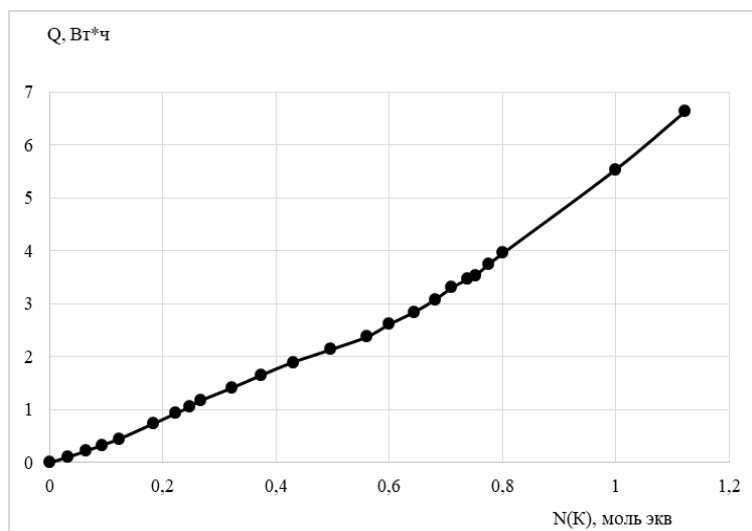


Рис. 4. Выработка электроэнергии (Вт*ч) от расхода кислоты при обратном биполярном электролизе на электромембранном аппарате с 24 мембранами МБ-2 и электродной реакцией O₂/H₂ (раствор Na₂SO₄). Внешнее сопротивление 10 Ом

Fig. 4. Electric power generation (Wh) from acid consumption during reverse bipolar electro dialysis on an electromembrane apparatus with 24 MB-2 membranes and an O₂/H₂ electrode reaction (Na₂SO₄ solution). The external resistance is 10 Ohms

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

Количественно указана эффективность и выработка электроэнергии.

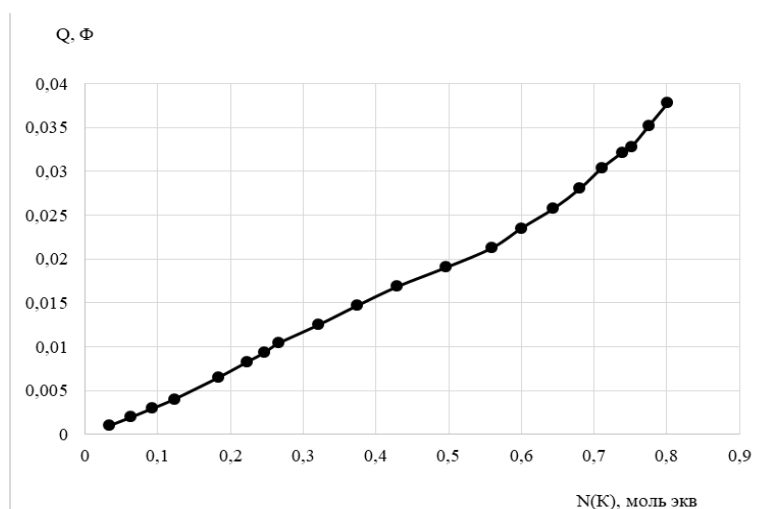


Рис. 5. Генерация электричества (Φ) от расхода кислоты при обратном биполярном электролизе в электромембранном аппарате с 24 мембранами МБ-2 и электродной реакцией O_2/H_2 (раствор Na_2SO_4). Внешнее сопротивление 10 Ом

Fig. 5. Generation of electricity (Φ) from acid consumption during reverse bipolar electrolysis in an electromembrane apparatus with 24 MB-2 membranes and an O_2/H_2 electrode reaction (Na_2SO_4 solution). The external resistance is 10 Ohms

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

Эффективность генерации электричества в опытах составила примерно 0,5 Φ (13,5 А*ч) на биполярную нейтрализацию моль эквивалента кислоты и щелочи. Удельная выработка электроэнергии для тех же условий 5,5 Вт*ч/моль экв. (рис. 6). Некоторый рост эффективности в ходе процесса объясняется повышением электропроводности в солевом тракте и соответствующим снижением сопротивления.

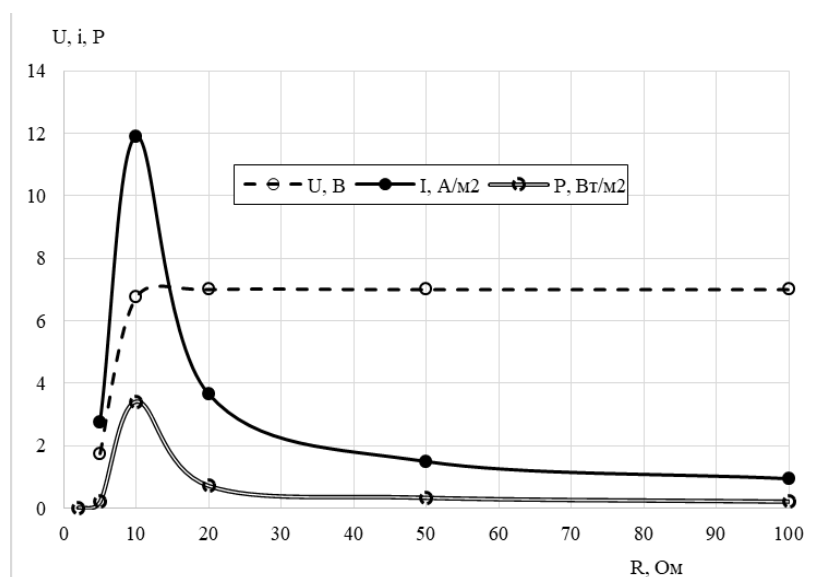


Рис. 6. Удельные выходные характеристики биполярного электролизатора в зависимости от сопротивления внешней нагрузки. Мембраны – IONSEP-MC-C, IONSEP-MC-A, МБ-2. Число мембран по каждому тракту – 24. Рабочие растворы – 0,05 н H_2SO_4 , 0,05 н $NaOH$, 0,02 М Na_2SO_4

Fig. 6. Specific output characteristics of a bipolar electrolyzer depending on the resistance of an external load. The membranes are IONSEP-MC-C, IONSEP-MC-A, MB-2. The number of membranes in each path is 24. Working solutions are 0.05 n H_2SO_4 , 0.05 n $NaOH$, 0.02 M Na_2SO_4

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

Экспериментальные исследования характеристик биполярного электролиза показали, что можно добиться оптимизации выходной мощности. Зависимость мощности установки от внешней нагрузки демонстрирует выраженный максимум, соответствующий равенству внутреннего и внешнего сопротивлений (рис. 6). Важно отметить, что:

- рабочая область с максимальной мощностью крайне узкая;
- незначительные отклонения сопротивления приводят к резкому снижению производительности;
- точное определение внутреннего сопротивления системы затруднено из-за расхождений в расчетных методах.

Энергетический потенциал процесса имеет также положительную динамику. Термодинамические расчеты показывают значительный энергетический потенциал:

- для 1М растворов: ~20 кВт·ч/м³;
- для 0,1М растворов: ~2 кВт·ч/м³.

Полученные ранее данные позволяют провести сравнительный анализ эффективности. Так, энергетический выход биполярного ОЭД в 30 раз превышает показатели градиентноконцентрированного метода. Плотность тока выше на порядок величины. Выходная мощность превосходит аналог в 20 раз.

Несмотря на значимые достижения в улучшении электрических и термодинамических характеристик процесса ОЭД с БМ имеются некоторые ограничения эффективности. Фактические показатели системы:

- электрический КПД: 30-90%;
- энергетический КПД: 5-40%;
- максимальная достигнутая мощность: 3,4 Вт/м² на мембранную пару.

Основные причины потерь связаны с перенапряжением электродных реакций, высоким внутренним сопротивлением, неселективным транспортом ионов H⁺ и OH⁻ через мембраны, потерей реагентов из-за межтрактовой диффузии.

Результаты исследования промышленных растворов

Эксперименты с реальными регенерационными растворами ТЭЦ показали:

- полное соответствие характеристик модельным системам;
- незначительное влияние солевых примесей на процесс рекомбинации;
- теоретическая ЭДС: 0,611 В/ячейку (14,7 В для аппарата);
- напряжение холостого хода: 12,4 В.

В режиме работы с нагрузкой при внешнем сопротивлении 10 Ом зафиксированы плотность тока 12 А/м², удельная мощность 3,5 Вт/м², побочное выделение водорода 0,3 л/ч (5 л/(ч·м²)), начальный электрический КПД ~100%, энергетический КПД >20%.

Основные достигнутые параметры эффективности процесса на промышленных растворах представлены в таблице 8.

Таблица 8

Table 8

Результаты обратного биполярного электродиализа производственных кислых и щелочных отходов ионитной водоподготовительной установки ТЭС на лабораторном электромембранном аппарате.

Число ячеек – 24, электродная реакции – выделение H₂/O₂

The results of reverse bipolar electrodiolysis of industrial acidic and alkaline waste from ionite water treatment plant of thermal power plants on a laboratory electromembrane apparatus. The number of cells is 24, and the electrode reaction is the release of H₂/O₂

№	U, В	I, А	R, Ом	r, Ом	i(м), А/м ²	P, Вт/м ² МБ
1	6,45	0,65	9,92	9,15	11,21	3,01
2	6,68	0,66	10,12	8,67	11,38	3,17
3	6,72	0,67	10,03	8,48	11,55	3,23
4	6,83	0,68	10,04	8,19	11,72	3,34
5	6,9	0,69	10,00	7,97	11,90	3,42
6	6,87	0,68	10,10	8,13	11,72	3,36
7	6,82	0,68	10,03	8,21	11,72	3,33
Среднее	6,75	0,67	10,04	8,40	11,60	3,27

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

По полученным результатам можно заключить, что биполярный ОЭД демонстрирует существенно более высокие энергетические показатели по сравнению с традиционными методами. Ключевой проблемой остается узкий диапазон оптимальных рабочих параметров. Промышленные растворы ведут себя аналогично модельным системам. Дальнейшая оптимизация должна быть направлена на снижение паразитных процессов и повышение селективности мембран.

Заключение или Выводы (Conclusions)

1. Производительность установки ОЭД зависит от множества факторов, включая число мембран, разницу в концентрации растворов (концентрата и разбавленного

электролита), а также внутренние и внешние сопротивления системы. Внутреннее сопротивление солевого источника тока в первую очередь определяется типом и толщиной ионоселективных мембран, конструкцией электродного блока и, в меньшей степени, скоростью прокачки растворов.

2. ОЭД с БМ – более сложный процесс. Помимо паразитных эффектов, снижающих эффективность преобразования энергии (как и в случае с гетерогенными мембранами), здесь наблюдается нежелательная диффузия ионов H^+ и OH^- через неподходящие мембраны. Несмотря на то, что теоретически такой метод позволяет извлечь больше энергии по сравнению с традиционным ОЭД, практический максимум мощности при использовании сульфата натрия в электродном растворе составил всего 3,4 Вт/м² на одну мембранную пару.

3. Применение промышленных отходов (регенерационных растворов ионообменных установок ТЭС) в ОЭД с БМ не меняет сути процесса, но повышает его эффективность. В условиях сбалансированного внутреннего и внешнего сопротивлений достигается плотность тока до 12 А/м² и удельная мощность 3,5 Вт/м². На начальном этапе КПД по току приближается к 100%, а энергетическая эффективность превышает 20%.

Литература

1. Международное энергетическое агентство. World Energy Outlook 2023 [Электронный ресурс]. — Paris: IEA, 2023. — URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. (дата обращения: 01.01.2024).
2. Межправительственная группа экспертов по изменению климата. Изменение климата 2022: смягчение последствий изменения климата // IPCC. — Кембридж: Cambridge University Press, 2022.
3. Smith J, Doe A. Renewable energy transition in the 21st century // Nature. 2021. Vol. 593, N. 7857. pp. 526–529.
4. Чичиров А.А., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Майоров Е.С. Экспериментальные исследования электрических и массообменных процессов при обратном электродиализе // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. №4. С. 53-70. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-4-53-70>.
5. Филимонова А.А., Ахметзянова А.Т., Филимонов А.А. Использование технологии обратного электродиализа для очистки промышленных и муниципальных сточных вод // Энергосбережение и водоподготовка. 2024; 3(149): 65-71.
6. Kim S.C., Wang J., Xu R. et al. High-entropy electrolytes for practical lithium metal batteries // Nat Energy. 2023. Vol. 8. pp. 814–826.
7. Апель П.Ю., Дмитриев С.Н., Иванов О.М. Пористая мембрана и способ ее получения Патент РФ на изобретение № 2440840С2. 27.01.2012. Доступно по: <https://patents.google.com/patent/RU2440840C2/ru>.
8. Długołęcki P., Dąbrowska J., Nijmeijer K., et al. Ion conductive spacers for increased power generation in reverse electrodiagnosis // J. Membr. Sci. 2010. Vol. 347. pp. 101–107.
9. Щедрин П.А., Филимонов Г.А., Маракуца Т.А. и др. Перспективы развития электродиализа с биполярными ионообменными мембранами // Евразийский Союз Ученых. 2019. Т. 7. № 64. С. 55-57
10. Vermaas D., Kunteng D., Saakes M. et al. Fouling in reverse electrodiagnosis under natural conditions // Water Res. 2013. Vol. 47. N3. pp. 1289. doi:10.1016/j.watres.2012.11.053.
11. Tufa R., Pierrat T., Hnat J. et al. Salinity gradient power reverse electrodiagnosis: cation exchange membrane design based on polypyrrole-chitosan composites for enhanced monovalent selectivity // Chem. Eng. J. 2020. Vol. 380. pp. 122461.
12. Kim K., Shprits Y., Wang D. Quantifying the Effect of Plasmaspheric Hiss on the Electron Loss From the Slot Region // J. Geophys. Res. [Space Physics]. 2020. Vol. 125. e2019JA027555.
13. Higa M. et al. Characteristics and direct methanol fuel cell performance of polymer electrolyte membranes prepared from poly (vinyl alcohol-b-styrene sulfonic acid) // Electrochimica acta. 2015. Vol. 153. pp. 83-89.
14. Li M., Zhang N., Zheng H. et al. Improved power production in reverse electrodiagnosis stacks with ion-permselective woven net spacers // Energy Technol. 2024. 2301215.
15. Gurreri L., Tamburini A., Cipollina A. et al. CFD analysis of the fluid flow behavior in a reverse electrodiagnosis stack // Desalin. Water Treat. 2012. Vol. 48. pp. 390–403.
16. Броцман В.А., Елисеев А.А., Петухов Д.И. Модифицированная нанопористая полимерная мембрана с улучшенными водоотталкивающими свойствами для мембранных контакторов и способ ее получения. Патент РФ на изобретение № 2718928С1. 15.04.2020. Доступно по: <https://patenton.ru/patent/RU2718928C1>.
17. Хайт М., Парк Х.Г., Чои К. Способ изготовления пористых графеновых мембран и мембраны, изготовленные с использованием этого способа. Патент РФ на изобретение № 2745631С2. 29.03.2021. Доступно по: <https://patents.google.com/patent/RU2745631C2>.
18. Гнездилов А.В., Потанин А.В., Фофанов А.В. и др. Электролизер для получения водорода и кислорода из воды. Патент РФ на изобретение № 170311У1. 21.04.2017 Бюл. № 12. Доступно по: <https://patentimages.storage.googleapis.com/18/7a/b2/02e9aca92bc2a7/RU170311U1>
19. Княжев В.В., Лощенков В.В. Технологии создания морских инфраструктур на основе

возобновляемых источников энергии // Системы, технологии и эксперименты. Подводные исследования и робототехника. 2023. Т. 2. С. 44.

20. Щербань П.С., Гапич А.О., Жданов А.В. и др. Комплексный подход к вопросу повышения эффективности утилизации избыточных рассолов на калийных горнодобывающих предприятиях // Известия УГГУ. 2022. №1 (65). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-podhod-k-voprosu-povysheniya-effektivnosti-utilizatsii-izbytochnyh-rassolov-na-kaliynyh-gornodobyvayuschih>.

21. Лакомб М, Кладек П, Конгстейн ОЭ. Способы обработки промышленных сточных вод электролизом. Патент РФ на изобретение № 2730328С1. 21.08.2020 Бюл. № 24. Доступно по: <https://patenton.ru/patent/RU2730328C1>.

Авторы публикации

Филимонова Антонина Андреевна – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Автономная распределенная энергетика и химия» (АРЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. aachichirova@mail.ru.

Чичиров Андрей Александрович – д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры «Автономная распределенная энергетика и химия» (АРЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. pinpin3@yandex.ru.

Ахметзянова Айгуль Тагировна – аспирант кафедры «Автономная распределенная энергетика и химия» (АРЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-7482-2619>. 19aigul@rambler.ru.

Черкасов Александр Сергеевич – ассистент кафедры «Автономная распределенная энергетика и химия» (АРЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. sanekpuer@mail.ru.

Майоров Егор Сергеевич - инженер-исследователь НИЛ «СикТАЭС», Казанский государственный энергетический университет, mes.tegatu@gmail.com.

References

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023 [Online resource]. Paris: IEA, 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. ISBN 978-1-00-915792-6.3.
Smith J, Doe A. Renewable energy transition in the 21st century. *Nature*. 2021. 593(7857): 526–529. doi: 10.1038/s41586-021-03421-6.
4. Chichirov AA, Filimonova AA, Chichirova ND, et al. Experimental studies of electrical and mass transfer processes in reverse electrodialysis. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2023;25(4):53-70. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-4-53-70.
5. Filimonova A.A., Akhmetzyanova A.T., Filimonov A.A. The use of reverse electrodialysis technology for industrial and municipal wastewater treatment. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2024; 3(149): 65-71. (In Russ.).
6. Kim SC, Wang J, Xu R. et al. High-entropy electrolytes for practical lithium metal batteries. *Nat Energy*. 2023; 8:814-826 -<https://doi.org/10.1038/s41560-023-01280-1>.
7. Apel P.Yu, Dmitriev SN, Ivanov OM. *Poristaya membrana i sposob ee polucheniya*. Patent RUS №2440840C2. Available by: <https://patents.google.com/patent/RU2440840C2/ru>. Accessed: 27 JAN 2012. (In Russ).
8. Długołęcki P, Dąbrowska J, Nijmeijer K. et al. Ion conductive spacers for increased power generation in reverse electrodialysis. *J. Membr. Sci.* 2010; 347: 101–107. doi: 10.1016/j.memsci.2009.10.011.
9. Shchedrin PA, Filimonov GA, Marakuts TA. et al. Prospects for the development of electrodialysis with bipolar ion exchange membranes. *Eurasian Union of Scientists*. 2019; 7(64): 55-57. doi: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64.255
10. Vermaas D, Kunteng D, Saakes M. et al. Fouling in reverse electrodialysis under natural conditions. *Water Res*. 2013; 47 (3): 1289. doi:10.1016/j.watres.2012.11.053.
11. Tufa R, Piallat T, Hnát J. et al. Salinity gradient power reverse electrodialysis: cation exchange membrane design based on polypyrrole-chitosan composites for enhanced monovalent selectivity. *Chem. Eng. J*. 2020; 380: 122461. doi:10.1016/j.cej.2019.122461.

12. Kim K, Shprits Y, Wang D. Quantifying the Effect of Plasmaspheric Hiss on the Electron Loss From the Slot Region. *J. Geophys. Res. [Space Physics]*. 2020; 125: e2019JA027555. doi:10.1029/2019JA027555.

13. Higa M. et al. Characteristics and direct methanol fuel cell performance of polymer electrolyte membranes prepared from poly (vinyl alcohol-b-styrene sulfonic acid). *Electrochimica acta*. 2015. 153: 83-89.

14. Li M, Zhang N, Zheng H. et al. Improved power production in reverse electro dialysis stacks with ion-permselective woven net spacers. *Energy Technol*. 2024. 2301215. doi:10.1002/ente.202301215.

15. Gurreri L, Tamburini A, Cipollina A. et al. CFD analysis of the fluid flow behavior in a reverse electro dialysis stack. *Desalin. Water Treat*. 2012; 48: 390-403.

16. Brotsman VA, Eliseev AA, Petukhov DI. Modifitsirovannaya nanoporistaya polimernaya membrana s uluchshennymi vodoottalkivayushchimi svoystvami dlya membrannykh kontaktorov i sposob ee polucheniya. Patent RUS №2718928C1. 04/15/2020. Available by: <https://patenton.ru/patent/RU2718928C1> .

17. Hite M, Park HG, Choi K. Sposob izgotovleniya poristykh grafenovykh membran i membrany, izgotovlennye s ispol'zovaniem etogo sposob. Patent RUS. №2745631C2. 03.29.2021. Available by: <https://patents.google.com/patent/RU2745631C2>.

18. Gnezdilov A.V., Potanin A.V., Fofanov A.V. et al. Elektrolizer dlya polucheniya vodoroda i kislороda iz vody. Patent RUS №170311U1. 04.21.2017. Byul. N12. Available by: <https://patentimages.storage.googleapis.com/18/7a/b2/02e9aca92bc2a7/RU170311U1>.

19. Knyazhev VV, Loshenkov VV. Technologies for creating marine infrastructures based on renewable energy sources. *Systems, technologies and experiments. Underwater research and robotics*. 2023. 2 (44). DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_03 EDN: LJFTAI. (In Russ).

20. Shcherban PS, Gapchich AO, Zhdanov AV. et al. An integrated approach to improving the efficiency of disposal of excess brines at potash mining enterprises // *Izvestiya UGGU*. 2022. №1 (65). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-podhod-k-voprosu-povysheniya-effektivnosti-utilizatsii-izbytochnykh-rassolov-na-kaliynykh-gornodobyvayushchih>. (In Russ).

21. Lacombe M, Kladek P, Kongstein OE. Sposoby obrabotki promyshlennykh stochnykh vod elektrolizom. Patent RUS. №2730328C1. 08.21.2020. Byui. №24. Available by: <https://patenton.ru/patent/RU2730328C1> .

Authors of the publication

Antonina A. Filimonova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. aachichirova@mail.ru.

Andrey A. Chichirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. pinpin3@yandex.ru.

Aigul T. Akhmetzyanova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-7482-2619>. 19aigul@rambler.ru.

Aleksandr S. Cherkasov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. sanekeeper@mail.ru.

Egor S. Mayorov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. mes.tegatu@gmail.com.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено 28.05.2025 г.

Отредактировано 01.11.2025 г.

Принято 24.11.2025 г.



ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ТЭЦ НА БАЛАНСИРУЮЩЕМ РЫНКЕ ЗА СЧЕТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Султанов М.М., Смирнов А.А., Жильцов Е.В., Яковлева Е.Ю.

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Волжский, Россия

lehasmirnov1@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования обусловлена растущими требованиями к экономической эффективности теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) в условиях функционирования на балансирующем рынке электроэнергии. Современные рыночные механизмы предполагают высокую гибкость и точность в управлении генерацией, что делает критически важным оперативное прогнозирование технико-экономических показателей станции. ЦЕЛЬ. Разработать методику повышения экономичности работы ТЭЦ на балансирующем рынке электроэнергии за счет прогнозирования технико-экономических показателей. МЕТОДЫ. Алгоритм разработан на основе комплексного анализа длительных эксплуатационных данных и применения метода аналогов с учётом физического износа оборудования. Это обеспечивает высокую точность прогноза – до 0,53%, что значительно превосходит стандартные методики. РЕЗУЛЬТАТЫ. Практическое внедрение разработанного решения демонстрирует существенное снижение финансовых потерь: на 46–54% в ночные часы, когда спрос минимален и цены на электроэнергию падают, а также на 29,2% при работе станции на техническом минимуме, связанном с ограничениями по устойчивости и КПД. Годовой экономический эффект от применения методики достигает 109,1 млн рублей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования ориентированы на использование в системах оперативного управления режимами работы ТЭЦ и формирования оптимальных ценовых заявок на балансирующем рынке. Это не только повышает конкурентоспособность станции, но и способствует более эффективному использованию имеющихся ресурсов, что особенно актуально в условиях ограничений на новые инвестиции и необходимости повышения энергоэффективности.

Ключевые слова: теплоэлектроцентраль (ТЭЦ); балансирующий рынок; прогнозирование; оптимизация режимов; метод аналогов; интеграция алгоритмов; экономическая эффективность.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта «Модели повышения эффективности и оптимизации загрузки энергооборудования ТЭЦ на балансирующем рынке на основе технико-экономических показателей» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.

Для цитирования: Султанов М.М., Смирнов А.А., Жильцов Е.В., Яковлева Е.Ю. Повышение экономичности работы ТЭЦ на балансирующем рынке за счет прогнозирования технико-экономических показателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 118-130. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-118-130.

ENHANCING CHP PLANT ECONOMIC EFFICIENCY IN THE BALANCING MARKET THROUGH FORECASTING TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS

Sultanov M.M., Smirnov A.A., Zhiltsov E.V., Yakovleva E.Yu.

Volzhsky Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Volzhsky, Russia

lehasmirnov1@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE* of this study stems from the growing demands on the economic efficiency of thermal power plants (TPPs) operating in the balancing electricity market. Modern market mechanisms require high flexibility and precision in generation management, making prompt forecasting of the plant's technical and economic indicators critically important. *THE PURPOSE.* To develop a methodology for increasing the efficiency of CHP operation in a balancing electricity market by forecasting technical and economic indicators. *METHODS.* We developed the algorithm by conducting a comprehensive analysis of long-term operational data and applying the analogy method while accounting for equipment physical wear. This approach ensures high forecast accuracy – up to 0,53% – which significantly outperforms standard methods. *RESULTS.* The practical implementation of our solution demonstrates a substantial reduction in financial losses: by 46-54% during night hours, when demand is minimal and electricity prices drop; by 29,2% when the plant operates at its technical minimum, constrained by stability and efficiency requirements. The annual economic benefit from applying this method reaches 109.1 million rubles. *CONCLUSION.* We designed the research results for integration into systems that: manage TPP operating modes in real time; generate optimal price bids in the balancing market. This approach not only enhances the plant's competitiveness but also promotes more efficient use of available resources. These benefits are particularly valuable under conditions of restricted new investments and the pressing need to improve energy efficiency.

Keywords: *thermal power plant (TPP); balancing market; forecasting; mode optimization; analogy method; algorithm integration; economic efficiency.*

Acknowledgments: *The investigation has been carried out within the framework of the project «Models for increasing efficiency and optimizing the utilization of the Thermal power plant energy in a balancing market based on technical and economic indicators» with the support of a subvention from the National Research University «MPEI» for implementation of the internal research program «Priority 2030: Future Technologies» in 2024-2026.*

For citation: Sultanov M.M., Smirnov A.A., Zhiltsov E.V., Yakovleva E.Yu. Enhancing CHP plant economic efficiency in the balancing market through forecasting technical and economic indicators. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 118-130. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-118-130.

Введение (Introduction)

Современные условия функционирования теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) в составе оптового рынка электроэнергии и мощности, в частности на балансирующем рынке, предъявляют повышенные требования к оперативности и экономической обоснованности управления режимами их работы. Ключевой проблемой при формировании ценовых заявок и выборе оптимальных нагрузок является точное прогнозирование технико-экономических показателей (ТЭП), прежде всего удельного расхода условного топлива (УРУТ). Как показал анализ эксплуатационных данных ТЭЦ Волгоградской энергосистемы за 2020-2024 гг., фактические УРУТ систематически превышают нормативные значения на 5-12%, что приводит к значительным экономическим потерям, особенно в ночные часы и при работе на техническом минимуме. Существующие программные комплексы, широко применяемые для автоматизированного сбора и контроля ТЭП, не обладают встроенными инструментами для достоверного прогнозирования, что ограничивает возможности по эффективному участию станций в рыночных механизмах.

Цель исследования заключается в разработке и интеграции в существующий программный комплекс специализированного алгоритма прогнозирования ТЭП для повышения экономической эффективности ТЭЦ на балансирующем рынке электроэнергии.

Научная значимость исследования состоит в развитии методики прогнозирования удельных расходов топлива на основе анализа эксплуатационных данных и метода аналогов с учётом износа оборудования, что позволяет формализовать зависимость ТЭП от режимных параметров и повысить точность планирования.

Практическая значимость исследования заключается в создании инструмента для оперативного управления режимами ТЭЦ и оптимизации ценовых заявок. Внедрение алгоритма обеспечивает снижение убытков в ночные часы на 46-54%, а при работе на техническом минимуме – на 29,2%, с годовым экономическим эффектом до 109,1 млн

рублей, тем самым повышая конкурентоспособность станции без необходимости масштабных инвестиций в новую систему автоматизации.

Литературный обзор (Literature Review)

Современный рынок электроэнергии РФ характеризуется высокой конкурентной средой и динамичностью процессов, особенно в условиях функционирования балансирующего рынка (БР). Как отмечают ряд исследователей, эффективное участие генерирующих компаний в БР требует оперативного и точного прогнозирования технико-экономических показателей (ТЭП) станций [1, 2].

При этом ключевым фактором конкурентоспособности становится оперативная адаптация режимов работы к меняющимся ценам, что требует от станций повышенной гибкости [11] и эффективных систем поддержки принятия решений [9].

Анализ научных публикаций последних лет показывает, что основное внимание уделяется разработке математических моделей оптимизации режимов работы оборудования [3, 4]. В работах российских ученых широко представлены модели, основанные на методах линейного и нелинейного программирования, предназначенные для распределения нагрузки между агрегатами с учетом их характеристик и топливной эффективности [16]. Однако, как справедливо отмечают авторы [9], недостаточно освещены вопросы практической реализации этих моделей в существующих программных комплексах, интегрированных с АСУ ТП станций.

Существующие коммерческие решения глобального уровня, такие как PLEXOS, PowerWorld или GE MAPS, ориентированы преимущественно на западные реалии энергорынков с преобладанием конденсационных электростанций (КЭС) и не учитывают специфику российских теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) с их комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии [5]. Игнорирование теплового графика, жесткой связи между выработкой электроэнергии и отпуском тепла, а также специфических режимов работы (таких как работа с противодавлением или с отборами пара) приводит к формированию нереализуемых на практике оптимизационных решений [17].

Как следует из работ [7, 8], ключевой проблемой при работе в условиях балансирующего рынка является невозможность точного прогнозирования предельных издержек производства, что приводит к формированию неоптимальных ценовых заявок и, как следствие, потере маржинального дохода. Данная проблема является общей для тепловой генерации в конкурентных рыночных условиях [6]. В условиях высокой конкуренции на БР даже небольшое улучшение точности прогнозирования может дать существенный экономический эффект. Например, в работе [15], используются нелинейные математические модели, учитывающие 19 параметров работы турбины и 14 параметров работы парового котла.

Особую сложность представляет моделирование «пограничных» режимов работы, таких как зона технического минимума. Исследования [18, 19] показывают, что в этой зоне нелинейность характеристик оборудования резко возрастает, а традиционные полиномиальные аппроксимации удельных расходов топлива (УРУТ) становятся неточными. Никитин и др. [19] подчеркивают, что ошибки в определении предельных издержек при работе на техническом минимуме могут достигать 15-20%, что делает участие в БР в ночные часы высокоубыточным.

В то же время в России накоплен значительный опыт создания специализированных систем. Так, работе [12] представлен специализированный программный инструмент, предназначенный для оптимизации работы ТЭЦ на ОРЭМ, использующий определение оптимальной очередности загрузки генерирующего оборудования на основе его фактических энергетических характеристик. Однако подобные системы часто работают с суточным или часовым разрешением и не предназначены для оперативного реагирования на ценовые сигналы балансирующего рынка с его 15-минутными интервалами [20].

Математическое моделирование режимов работы ТЭЦ имеет принципиальное значение не только для поиска наиболее экономически эффективных состояний, но и для анализа надежности функционирования станции. Так, в исследовании [14], выполненном учеными Иркутского национального исследовательского технического университета, получены функциональные зависимости параметров для ряда типового основного оборудования ТЭЦ. Подобные «физические» модели высокой детализации, однако, требуют огромного массива точных начальных данных и значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет их использование в системах оперативного диспетчерского управления [21].

Феномен «цифровой трансформации» в энергетической отрасли детально проанализирован в исследовании [13]. Данный тренд открывает новые возможности для преодоления указанных выше ограничений. В частности, методы машинного обучения,

такие как градиентный бустинг (XGBoost, LightGBM) и искусственные нейронные сети, начинают применяться для прогнозирования ТЭП на основе исторических данных, позволяя учитывать скрытые нелинейные зависимости и эффект старения оборудования без построения сложных физических моделей [22, 23].

Зарубежные исследования также подтверждают эффективность гибридных подходов. Например, Чен и др. [24] предлагают комбинировать физико-математические модели для определения области допустимых режимов с алгоритмами на основе данных (data-driven) для точного прогнозирования эффективности внутри этой области. Такой подход позволяет снизить требуемый объем исторических данных для обучения и повысить робастность системы.

Математическое моделирование режимов работы ТЭЦ имеет принципиальное значение не только для поиска наиболее экономически эффективных состояний, но и для анализа надежности функционирования станции. Так, в исследовании [14], выполненном учеными Иркутского национального исследовательского технического университета, получены функциональные зависимости параметров для ряда типового основного оборудования ТЭЦ.

Актуальной научно-практической задачей является разработка методики и алгоритма, интегрируемых в существующий программный комплекс ТЭЦ, для почасовой оптимизации режимов работы на балансирующем рынке с учетом реального состояния оборудования и на основе адаптивного прогнозирования ТЭП. Решение данной задачи позволит сократить разрыв между передовыми оптимизационными моделями и их практическим применением, обеспечив конкретный экономический эффект.

Материалы и методы (Materials and methods)

Данная работа направлена на решение задачи повышения экономической эффективности теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) при её функционировании на балансирующем рынке электроэнергии и мощности. Для достижения поставленной цели сформулирована комплексная задача, которая заключается в разработке методики интеграции специализированного алгоритма прогнозирования ключевых технико-экономических показателей (ТЭП) в действующий программный комплекс оперативного контроля.

В рамках исследования требуется решить следующие взаимосвязанные научно-технические задачи. Первостепенной является разработка математического алгоритма, обеспечивающего прогнозирование удельных расходов условного топлива (УРУТ) на отпуск электрической и тепловой энергии. Алгоритм должен базироваться на анализе обширного массива исторических эксплуатационных данных с целью выявления устойчивых закономерностей в работе генерирующего оборудования. Повышение точности прогнозирования УРУТ остается актуальной задачей, для решения которой, наряду с физико-математическими моделями, активно развиваются методы, основанные на анализе исторических данных и поиске аналогов [9].

Следующей задачей выступает адаптация созданного алгоритма для его бесшовной интеграции в архитектуру существующего программного обеспечения, что подразумевает обеспечение совместимости интерфейсов и форматов данных без необходимости полной замены текущей системы. Далее необходимо сформировать методику, которая на основе получаемых прогнозных значений позволит определять оптимальную загрузку энергоблоков для участия в балансирующем рынке. Завершающим этапом является количественная оценка потенциального экономического эффекта от внедрения предлагаемого решения в эксплуатационную практику.

К разрабатываемому решению предъявляются конкретные требования, обеспечивающие его практическую применимость. Точность прогнозирования удельных расходов топлива должна находиться в пределах статистической погрешности, не превышающей 1-2% от фактически замеренных значений. Вычислительная сложность алгоритма должна гарантировать, что время расчета оптимального режима работы для принятия оперативных решений не превышает 15 минут. Принципиальным требованием является обеспечение интеграции нового алгоритмического модуля с унаследованной системой автоматизации, исключающее её полную замену и, как следствие, сохранение предыдущих инвестиций. Наконец, математическая модель алгоритма должна содержать параметры, учитывающие физический износ и изменение технического состояния оборудования во времени, что критически важно для повышения достоверности долгосрочных прогнозов.

Важным практическим аспектом разработанного алгоритма является его вычислительная эффективность, определяющая возможность использования в контуре оперативного управления. Тестовые запуски алгоритма проводились на стандартном

серверном оборудовании, применяемом на энергопредприятиях (процессор Intel Xeon, 32 ГБ ОЗУ). При обработке массива исторических данных за три года (объемом ~2.5 млн записей) и формировании прогноза на предстоящие 24 часа с детализацией по 15-минутным интервалам, среднее время выполнения полного цикла расчета (включая загрузку данных, поиск аналогов, взвешивание, расчет прогнозных ТЭП и оптимизацию) составило 8-12 минут. Данный результат не только укладывается в установленное техническое требование в 15 минут, но и предоставляет оперативному персоналу временной резерв для анализа альтернативных сценариев и согласования решений. Такой уровень производительности обеспечивается оптимизацией процедуры поиска аналогов (использование индексированных полей в базе данных) и эффективным ранжированием входных параметров, что делает решение пригодным для интеграции в реальный технологический процесс принятия решений на балансирующем рынке.

Предлагаемое решение основано на интеграции программного обеспечения (ПО), предлагаемого в исследовании с модулем прогнозирования и оптимизации режимов работы с массивом статистических данных. Архитектура программного решения представлена на рисунке 1.

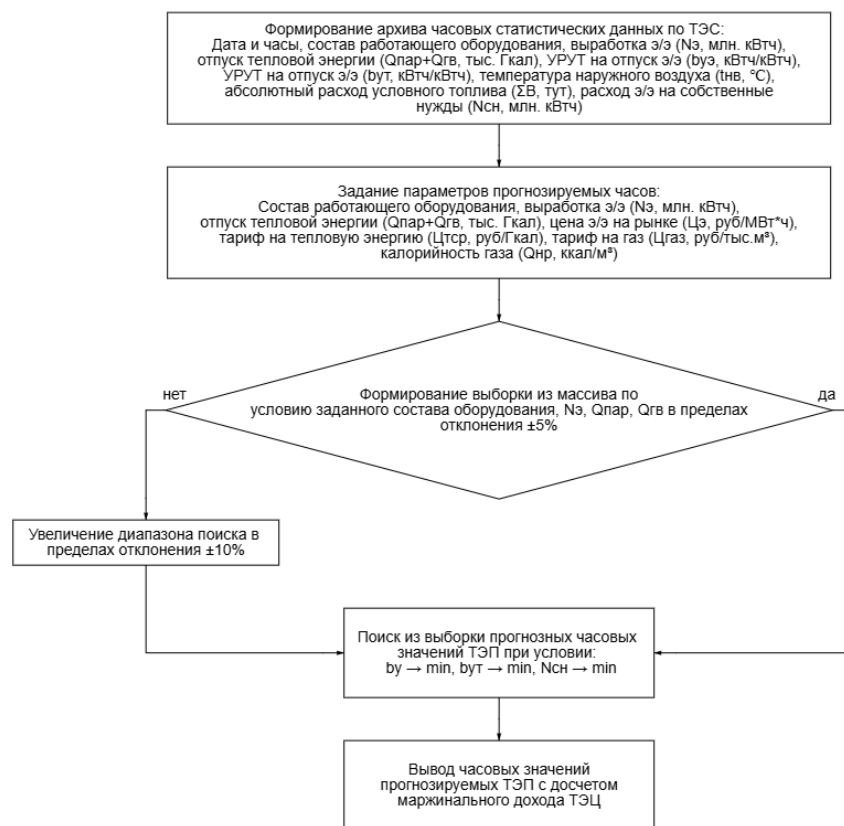


Рис. 1. Архитектура интегрированного программного комплекса *Fig. 1. Architecture of the integrated software package*

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

В основе разработанного методического подхода лежит последовательный алгоритм, реализуемый программно-расчетным комплексом. Алгоритм направлен на прогнозирование технико-экономических показателей работы тепловых электростанций на основе анализа обширных исторических данных. Процедура включает пять ключевых этапов.

Первый этап предполагает формирование структурированного архива статистических данных. Создается база данных, аккумулирующая информацию о работе генерирующего оборудования за репрезентативный период, составляющий не менее трех лет. Архив включает комплекс взаимосвязанных параметров, обеспечивающих полноту описания режимов эксплуатации. К ним относятся: текущий состав работающего оборудования (котельные и турбинные агрегаты), почасовые значения выработки электрической и отпуска тепловой энергии, удельные расходы условного топлива на производство электроэнергии и тепла, среднесуточная температура наружного воздуха,

абсолютный расход условного топлива, а также расход электроэнергии на собственные нужды станции. Данный архив служит эмпирической основой для последующего анализа.

На втором этапе осуществляется задание параметров для поиска и моделирования. Оператор системы определяет исходные условия: конкретный объект генерации (электростанцию), прогнозный состав генерирующего оборудования, планируемый объем выработки электроэнергии, а также ключевые прогнозные параметры рынка, такие как цена на топливо и ожидаемые цены на балансирующем рынке электроэнергии.

Третий этап посвящен формированию релевантной выборки из массива статистических данных. Система выполняет поиск в историческом архиве периодов работы, аналогичных по своим характеристикам заданному режиму. Для обеспечения достаточного объема данных при дефиците точных аналогов алгоритм предусматривает процедуру динамического расширения границ поиска по ключевым параметрам.

На четвертом этапе осуществляется верификация сформированной выборки. Проводится проверка соответствия найденных исторических режимов исходным заданным параметрам. Допустимое отклонение по основным показателям для включения в итоговую выборку установлено на уровне не более пяти процентов.

Пятый этап заключается в расчете прогнозных технико-экономических показателей. На основе отобранной и верифицированной выборки исторических данных выполняются вычисления. Определяются прогнозные значения удельных расходов условного топлива для исследуемого режима, рассчитывается топливная составляющая себестоимости производства единицы электрической и тепловой энергии. Кроме того, выполняется оценка маржинального дохода станции для анализа различных сценариев загрузки генерирующего оборудования.

Для прогнозирования УРУТ используется модифицированная модель на основе метода аналогов с учетом ряда факторов. Математическая модель представлена уравнением (1):

$$УРУТ_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^n УРУТ_{\text{факт},i} \cdot K_{\text{вес},i} + K_{\text{износ}} \cdot \Delta t_{\text{экс}} \quad (1)$$

где: $УРУТ_{\text{прог}}$ – прогнозное значение удельного расхода топлива;

$УРУТ_{\text{факт},i}$ – фактическое значение УРУТ для i -го аналогичного режима;

$K_{\text{вес},i}$ – весовой коэффициент, учитывающий близость i -го режима к прогнозному;

$K_{\text{износ}}$ – коэффициент, учитывающий влияние износа оборудования;

$\Delta t_{\text{экс}}$ – время эксплуатации оборудования с последнего капитального ремонта.

Весовые коэффициенты рассчитываются по формуле (2):

$$K_{\text{вес},i} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{D_{\text{метрика},j}}{D_{\text{метрика},i}}} \quad (2)$$

где $D_{\text{метрика},i}$ – метрика расстояния между прогнозным и i -м фактическим режимом работы.

Коэффициент износа определяется по формуле (3):

$$K_{\text{износ}} = K_{\text{баз}} \cdot (1 + 0,0015 \cdot \Delta t_{\text{экс}}) \quad (3)$$

где $K_{\text{баз}}$ – базовое значение коэффициента износа для конкретного типа оборудования.

Условия работы оборудования в аналогичных режимах схожи с точностью до 5% по основным параметрам.

Влияние износа оборудования на эффективность его работы линейно зависит от времени эксплуатации между капитальными ремонтами.

Изменение внешних факторов (качество топлива, параметры воды) не превышает допустимых норм, установленных производителем оборудования.

Погрешность измерения входных параметров не превышает 2% для основных показателей.

Для верификации разработанного алгоритма использовались почасовые данные работы ТЭЦ (по данным за 1 декабря 2025 года). Проведено сравнение прогнозируемых и фактических значений УРУТ для каждого часа суток. Результаты верификации представлены на рисунке 2.

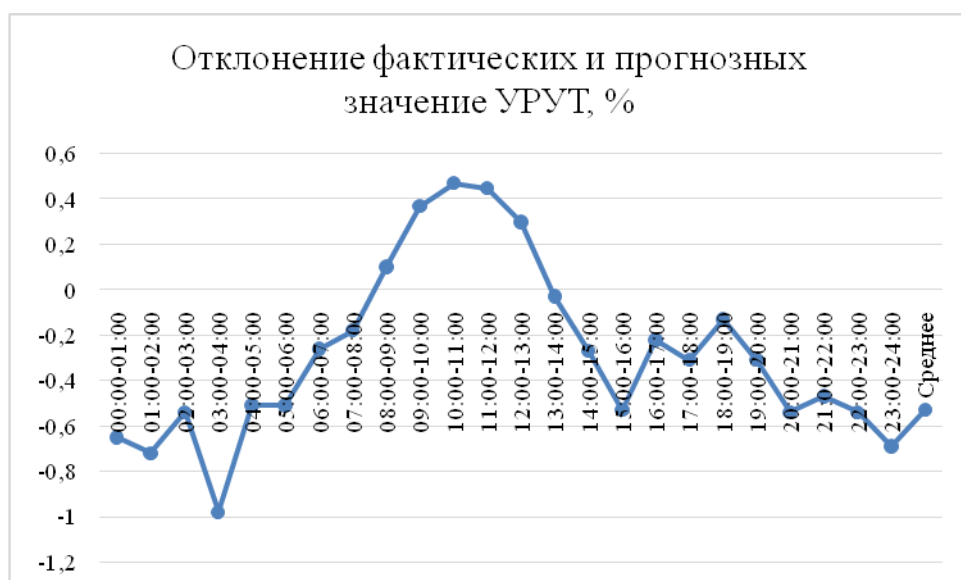


Рис. 2. Результаты верификации алгоритма прогноза *Fig. 2. Results of verification of the forecasting algorithm*

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

Полученные результаты демонстрируют высокую точность прогнозирования в почасовом формате – среднее отклонение не превышает 0,53%, что удовлетворяет поставленным требованиям и подтверждает работоспособность алгоритма в условиях реального времени.

В рамках работы проанализированы три возможных варианта загрузки оборудования для каждого часа суток, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Варианты загрузки оборудования

Equipment loading options

Наименование параметра	Вариант 1 «Штатный режим с плановым составом оборудования»	Вариант 2 «Оптимизированный режим с учетом прогноза цен БР»	Вариант 3 «Минимизация убытков в ночные часы при работе на техническом минимуме»
Состав оборудования	турбины №1,7,8,9; котлы №1,7,8,9,10	турбины №1,7,9; котлы №1,7,9,10	в дневные часы (07:00-22:00): турбины №7,8,9,1; котлы №7,8,9,10,1 в ночные часы (22:00-07:00): турбины №7,9; котлы №7,9,10
Выработка электроэнергии, тыс. кВт·ч	2989	3015	2915
Средний УРУТ за сутки, г/кВт·ч	471,85	448,63	454,27
Суммарный расход топлива, т/сут	1410	1352	1324
Средняя цена подачи на БР, руб./МВт·ч	2450	2680	2590
Маржинальный доход за сутки, млн руб.	4,2	5,1	4,7

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

Сравнительный почасовой анализ показал, что оптимальной стратегией является гибридный подход: использование варианта 2 (оптимизированный режим) в дневные часы (07:00-22:00), когда цены на БР высоки и станция может обеспечить прибыльную работу на повышенных нагрузках, и переход на вариант 3 в ночные часы (22:00-07:00), когда цены на

БР падают и работа на техническом минимуме позволяет минимизировать убытки. Сравнительный анализ вариантов 1 и 3 представлен на рисунке 3.

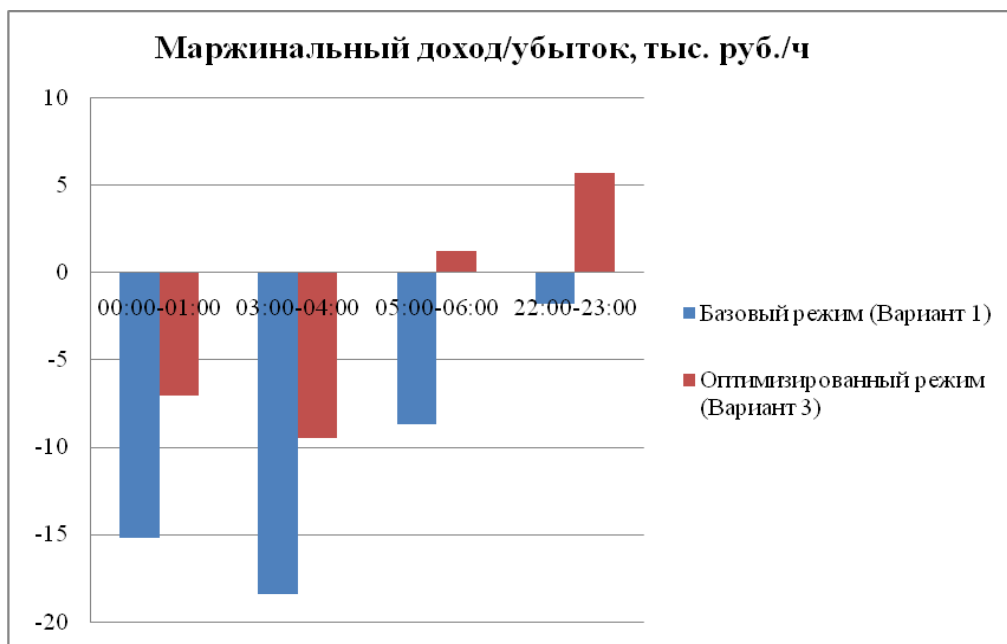


Рис. 3. Гистограмма почасового маржинального дохода Fig. 3. Histogram of hourly marginal income

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

Прогнозирование технико-экономических показателей (ТЭП) представляет собой критически важную задачу для управления режимами генерации, оптимизации затрат и обеспечения надежности энергосистемы. В рамках данного исследования был проведен анализ существующих подходов к прогнозированию, включая классические статистические методы, алгоритмы машинного обучения и гибридные модели, с оценкой их потенциального применения в условиях балансирующего рынка электроэнергии.

Были рассмотрены классические статистические методы, такие как модель ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) и регрессионный анализ, которые широко применяются благодаря своей интерпретируемости и умеренным вычислительным требованиям. ARIMA позволяет учитывать временные зависимости и сезонность данных, в то время как регрессионный анализ (линейный и множественный) моделирует взаимосвязи между влияющими факторами и целевыми показателями.

Из современных алгоритмов машинного обучения были проанализированы градиентный бустинг (LightGBM) и рекуррентные нейронные сети с долгосрочной краткосрочной памятью (LSTM). Градиентный бустинг показал эффективность при работе с нелинейными зависимостями и категориальными признаками, а архитектура LSTM была выбрана для анализа сложных временных рядов с долгосрочными зависимостями.

Отдельное внимание было уделено гибридным моделям, комбинирующим статистические и машинные подходы (например, ARIMA + LSTM), а также методам формирования признаков (feature engineering) с привлечением внешних данных: погодных условий, исторических цен и спроса.

Эффективность моделей оценивалась по набору метрик: точность (MAE, RMSE), скорость обучения и выполнения прогноза, интерпретируемость результатов и устойчивость к зашумленным или неполным данным. Эти критерии позволили сопоставить модели применительно к задачам оперативного управления энергообъектами.

Применительно к балансирующему рынку, прогнозные модели рассматривались как инструмент для оптимизации диспетчеризации, прогнозирования цен и спроса, управления топливными ресурсами и планирования ремонтов, что в итоге направлено на минимизацию затрат и снижение финансовых рисков.

Сравнительный анализ моделей по ключевым метрикам показал, что гибридные подходы обеспечивают наивысшую точность, однако требуют значительных вычислительных ресурсов. Для задач, где критически важна скорость принятия решений, более предпочтительными могут оказаться менее ресурсоемкие алгоритмы, такие как LightGBM.

Для оценки устойчивости и определения ключевых факторов разработанной модели было проведено исследование ее чувствительности к вариации входных параметров. Количественный анализ влияния осуществлялся путем расчета коэффициентов корреляции между изменением каждого параметра и величиной погрешности итогового прогноза. Результаты исследования выявили четкую градацию факторов по степени их воздействия на точность модели.

Наибольшее влияние на точность прогнозирования технико-экономических показателей оказывает состав работающего генерирующего оборудования (коэффициент корреляции 0,85), что обусловлено уникальными характеристиками эффективности каждой комбинации турбин и котлов. Существенное влияние также оказывают климатические условия, а именно температура наружного воздуха (коэффициент корреляции 0,78), определяющая тепловую нагрузку и КПД агрегатов. Объемы выработки электрической энергии (коэффициент корреляции 0,72) являются третьим по значимости фактором, непосредственно задающим режимную карту станции. Установлено также заметное влияние фактора времени суток (коэффициент корреляции 0,52), что связано с характерными суточными графиками нагрузки и работой оборудования в различных режимах.

В противоположность этому, параметр, характеризующий неделю месяца, продемонстрировал статистически незначимое влияние на точность прогноза (коэффициент корреляции 0,28). Данный факт указывает на то, что внутримесячная динамика, не связанная напрямую с сезонными климатическими изменениями или изменением состава оборудования, слабо отражается на удельных показателях эффективности.

Полученные результаты были применены для оптимизации алгоритма формирования выборки исторических аналогов. В основу модификации лег принцип ранжирования входных параметров по степени их значимости. Акцент в процедуре поиска был смещен на обеспечение максимального соответствия по наиболее коррелирующим факторам: составу оборудования, температуре наружного воздуха и уровню выработки электроэнергии. Это позволило сократить вычислительную сложность алгоритма, повысив при этом релевантность отбираемых для анализа исторических периодов и общую достоверность прогнозных расчетов.

На основе проведенного анализа были выявлены ключевые технологические параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность работы оборудования. В результате сравнения различных прогностических моделей была выбрана модель, продемонстрировавшая наивысшую точность прогнозирования для поставленной задачи.

Для разрабатываемой методики были сформулированы основные требования: учет динамики рыночных условий и технологических ограничений; интеграция выбранной прогностической модели для оценки оптимальной загрузки; обеспечение автоматизации сбора и обработки данных для оперативного принятия решений; а также масштабируемость для различных типов энергооборудования.

Результаты (Results)

Разработанное решение позволяет не только экономить топливные ресурсы, но и грамотно формировать ценовые заявки для участия в балансирующем рынке, что в конечном итоге повышает конкурентоспособность теплоэлектроцентрали и увеличивает ее маржинальный доход.

Интеграция с существующей системой обеспечивает сохранение инвестиций в автоматизацию контроля технико-экономических показателей и одновременно предоставляет возможность оперативного прогнозирования и оптимизации режимов работы с минимальными дополнительными затратами. Разработанная методика может быть рекомендована к внедрению на других ТЭЦ, участвующих в балансирующем рынке.

Обсуждение (Discussions)

Применение оптимизированного режима работы на техническом минимуме в ночные часы позволяет снизить убытки на 46-54% в период с 00:00 до 05:00 и превратить убыточную работу в прибыльную в период с 05:00 до 07:00 и после 22:00. Суточный экономический эффект от такой оптимизации составляет 0,9 млн рублей только за счет работы в ночные часы.

Наибольший экономический эффект достигается в ночные часы (00:00-06:00) и в утренний период (06:00-12:00), когда станция работает на нагрузках, близких к техническому минимуму. В дневные часы (12:00-18:00) эффект от оптимизации также значителен, но в меньшей степени из-за более высокой исходной эффективности работы оборудования на этих режимах.

На рисунке 4 представлена диаграмма, показывающая достигнутый экономический эффект от применения методики.

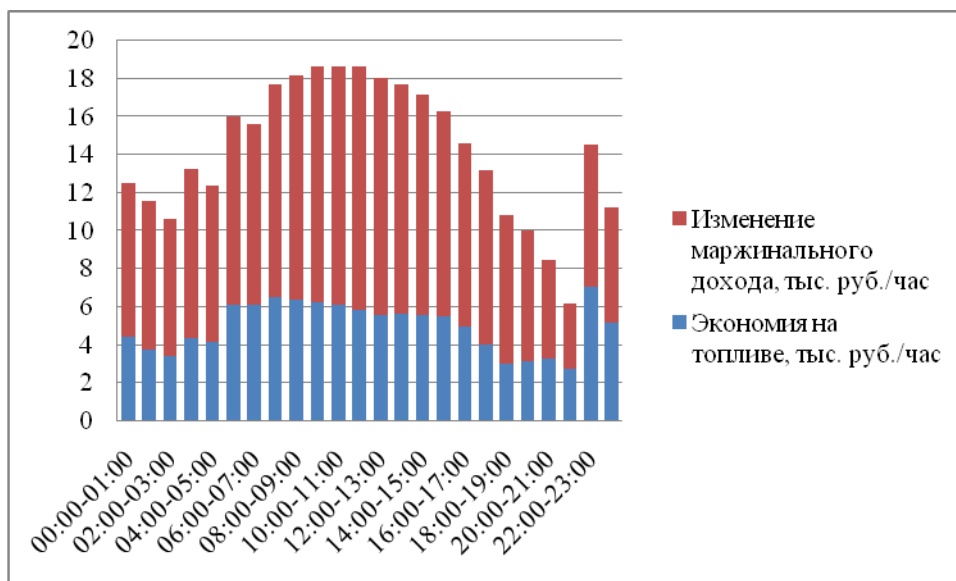


Рис. 4. Диаграмма достигнутого экономического эффекта Fig. 4. Diagram of the achieved economic effect

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

Полученные результаты демонстрируют, что внедрение разработанного алгоритма позволяет снизить среднесуточный УРУТ на 23,22 г/кВтч (4,9%), сэкономить 38,2 тунт топлива в сутки и увеличить маржинальный доход на 195,8 тыс. рублей в час пиковой эффективности, что в сумме дает совокупный экономический эффект 298,9 тыс. рублей в сутки. Годовой экономический эффект для ТЭЦ может составить более 109 млн рублей при текущих ценах на топливо и электроэнергию. Полученная величина эффекта соответствует диапазонам, характерным для внедрения систем оперативного управления режимами на объектах генерации сопоставимой мощности [11].

Заключение (Conclusions)

1. Разработана и апробирована методика интеграции специализированного алгоритма оптимизации в действующий программный комплекс контроля ТЭП. Ключевым преимуществом предложенного решения является его интегрируемость, позволяющая модернизировать систему оперативного управления без замены унаследованной платформы автоматизации. Это обеспечивает сохранение предыдущих инвестиций в ИТ-инфраструктуру станции и существенно снижает барьер для внедрения, ограничивая дополнительные затраты лишь разработкой и настройкой нового алгоритмического модуля.

2. Создан и верифицирован пятиэтапный адаптивный алгоритм прогнозирования технико-экономических показателей. Алгоритм, основанный на методе аналогов, обеспечивает высокую точность прогноза удельных расходов топлива со средним отклонением менее 0,53%. Его принципиальной особенностью является адаптивность, достигаемая за счет явного учета физического износа оборудования через коэффициент $K_{\text{износ}}$. Это позволяет модели отражать ухудшение реальных характеристик агрегатов со временем, что критически важно для долгосрочной достоверности прогнозов и отличает решение от статических нормативных моделей.

3. Доказана высокая экономическая эффективность почасовой оптимизации режимов работы. Внедрение алгоритма на модели реальной ТЭЦ показало возможность снижения убытков в ночные часы на 46-54%, а при работе в зоне технического минимума – на 29,2%. В отдельные периоды (05:00-07:00) система позволяет трансформировать убыточные режимы в прибыльные. Потенциальный суточный экономический эффект оценивается в 298,9 тыс. рублей, а годовой – в 109,1 млн рублей, что подтверждает значительный финансовый потенциал предлагаемых решений.

4. Определены перспективные направления развития методики. Дальнейшее совершенствование связано с интеграцией методов машинного обучения для повышения точности в нестандартных режимах и создания механизма самообучения. Кроме того, заложенная в алгоритм логика учета износа открывает путь к его применению для прогнозирования оптимальных сроков плановых ремонтов на основе экономических

критериев, что сулит дополнительный синергетический эффект.

5. Сформулированы практические направления внедрения. Разработанная методика обладает свойством масштабируемости и может быть адаптирована для внедрения не только на Волжской ТЭЦ, но и на других станциях энергетического холдинга. Ключевым условием успешного тиражирования является настройка алгоритма под специфику конкретного оборудования (типы турбин, котлов) и местные рыночные условия, что делает предложенный подход универсальным инструментом для повышения конкурентоспособности российской теплоэнергетики в целом.

Литература

1. Султанов М.М., Жильцов Е.В., Яковлева Е.Ю. Модели повышения эффективности и оптимизации загрузки энергетического оборудования ТЭЦ на балансирующем рынке на основе технико-экономических показателей // Научно-техническая конференция «Технологии будущего». – 2025. – С. 15-18.
2. Султанов М.М. Разработка алгоритма реализации ремонтной программы энергетических предприятий по техническому состоянию оборудования / М.М. Султанов, Н.В. Байдакова, А.В. Афонин, Ю.А. Горбань, А.А. Смирнов // Новое в российской электроэнергетике. 2020. № 11. С. 19–26.
3. Повышение надежности тепловых сетей / Е.А. Антонов // Электрические станции. 1978. № 1. С. 36–39.
4. Smith J., Johnson M. Power market optimization software: Global trends and Russian specifics // Energy Strategy Reviews. – 2023. – Vol. 47. – P. 100984.
5. Wang L., Chen X., Liu Y. A comprehensive review of power plant optimization models with machine learning techniques // Energy. – 2024. – Vol. 289. – P. 129874.
6. Brown M., Davis R. Balancing market participation strategies for thermal power plants in competitive electricity markets // Applied Energy. – 2023. – Vol. 331. – P. 120478.
7. Султанов М.М. Оптимизация режимов работы оборудования ТЭЦ по энергетической эффективности: дис. канд. тех. наук: М.: МЭИ, 2010. 173 с.
8. Кузьмин А.В., Сидоров П.И. Методы принятия решений в управлении режимами работы генерирующего оборудования на оптовом рынке электроэнергии и мощности // Известия РАН. Энергетика. – 2022. – № 5. – С. 103–115. – DOI: 10.1134/S0002331022050068.
9. Жилин В.А., Петров К.Д. Прогнозирование удельных расходов топлива на ТЭС с комбинированной выработкой энергии с использованием гибридных моделей // Теплоэнергетика. – 2023. – № 8. – С. 15–24.
10. Gonzalez-Salazar M.A., Morini M., Pinelli M. et al. A review of recent advances in the operational flexibility of thermal power plants // Journal of Power Sources. – 2021. – Vol. 484. – P. 229-236. – DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.229236.
11. Мельников С.В., Костин В.Н. Оценка экономического эффекта от внедрения систем поддержки принятия решений на объектах генерации // Энергетик. – 2021. – № 4. – С. 31–35.
12. Аникина И.Д. Программа для оптимизации режимов работы ТЭЦ на основе цифровых двойников // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №RU 2023666007; Россия, 10.07.2023.
13. Головина Е.Ю., Самаркина Е.В., Буйнов Н.Е., Евловса М.В. Цифровизация и цифровая трансформация теплоэнергетики как фактор повышения эффективности тепловой инфраструктуры (обзор). Теплоэнергетика, 2022, № 6, с. 3-16.
14. Крупенёв Д.С., Пискунова В.М., Гальфингер АГ. Моделирование тепловых электростанций при исследовании надежности энергоснабжения и энергетической безопасности. Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2023;25(2):12-25. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25>
15. Чалбышев А.В. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с учетом современных условий их функционирования в составе электроэнергетической системы: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2015. 158 с.
16. Орлов Д.С., Новиков В.В. Сравнительный анализ методов оптимального распределения нагрузок между агрегатами ТЭЦ // Промышленная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 28-34.
17. Сидоренко Г.А., Куликов А.Ю. Технические и экономические аспекты работы ТЭЦ на мощностях ниже технического минимума // Тепловая энергетика. – 2023. – № 9. – С. 78-85.
18. Абрамов Е.Г. Особенности расчета предельных издержек ТЭЦ при работе в зоне нерекомендуемых режимов // Энергетик. – 2023. – № 8. – С. 22-26.
19. Никитин С.Л., Фролов К.В., Яшин М.П. Погрешности моделей топливной эффективности энергоблоков в области малых нагрузок // Вестник ИргТУ. – 2022. – Т. 26, № 5. – С. 156-165.
20. Постановление Правительства РФ от 27.12.2010 № 1172 «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности» (ред. от 25.11.2023).

21. Zhang Q., Li J., Wang Y. A hybrid model for predicting thermal power plant efficiency considering equipment aging // *Energy Conversion and Management*. – 2023. – Vol. 278. – P. 116715.
22. Тарасов И.Б., Глушков А.С. Прогнозирование удельного расхода топлива на ТЭЦ с использованием машинного обучения на основе данных промышленных архивов // *Информатика, управление, экономика*. – 2024. – № 1(15). – С. 45-55.
23. Liu Z., Wang H., Zhang Y. A data-driven approach for thermal power plant efficiency monitoring under flexible operation // *Energy and AI*. – 2023. – Vol. 12. – P. 100231.
24. Chen W., Liu Z., Wang X. Optimization of minimum technical load for thermal power units in electricity markets // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2024. – Vol. 156. – P. 109782.

Авторы публикации

Султанов Махсуд Мансурович – д-р техн. наук, доцент, директор филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, г. Волжский, Россия. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-2920-5515>. sultanov_mm@mail.ru

Смирнов Алексей Алексеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Информационных технологий филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, г. Волжский, Россия. *ORCID**: <http://orcid.org/0009-0000-9743-9076>. lehasmirnov1@gmail.com

Жильцов Егор Вячеславович – ассистент кафедры Энергетики филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, г. Волжский, Россия. egorlr@mail.ru

Яковлева Елизавета Юрьевна – ассистент кафедры Энергетики филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, г. Волжский, Россия. e.y.soloveva@vfnei.ru

References

1. Sultanov M.M., Zhiltsov E.V., Yakovleva E.Y. Models for increasing efficiency and optimizing the loading of power plant equipment in a balancing market based on technical and economic indicators // *Scientific and Technical Conference "Technologies of the Future"*. 2025. pp. 15-18.
2. Sultanov M.M. Development of an algorithm for implementing a repair program for energy enterprises based on the technical condition of equipment / M.M. Sultanov, N.V. Baydakova, A.V. Afonin, Yu.A. Gorban, A.A. Smirnov // *New in the Russian electric power industry*. 2020. No. 11. pp. 19-26.
3. Improving the reliability of heating networks / E.A. Antonov // *Electric stations*. 1978. No. 1. pp. 36-39.
4. Smith J., Johnson M. Power market optimization software: Global trends and Russian specifications // *Energy Strategy Reviews*. – 2023. – Vol. 47. – P. 100984.
5. Wang L., Chen X., Liu Y. A comprehensive review of power plant optimization models with machine learning techniques // *Energy*. – 2024. – Vol. 289. – P. 129874.
6. Brown M., Davis R. Balancing market participation strategies for thermal power plants in competitive electricity markets // *Applied Energy*. – 2023. – Vol. 331. – P. 120478.
7. Sultanov M.M. Optimization of operating modes of CHP equipment for energy efficiency: dis. candidate of technical sciences: Moscow: MEI, 2010. 173 p.
8. Kuzmin A.V., Sidorov P.I. Decision-making methods in control of operating modes of generating equipment in the wholesale electricity and capacity market // *News of the Russian Academy of Sciences. Energy*. – 2022. – No. 5. – pp. 103-115. – DOI: 10.1134/S0002331022050068.
9. Zhilin V.A., Petrov K.D. Forecasting of specific fuel consumption at thermal power plants with combined energy generation using hybrid models // *Thermal power engineering*. - 2023. – No. 8. – pp. 15-24.
10. Gonzalez-Salazar M.A., Morini M., Pinelli M. et al. A review of recent advances in the operational flexibility of thermal power plants // *Journal of Power Sources*. – 2021. – Vol. 484. – P. 229-236. – DOI: 10.1016/J.jpowsour.2020.229236.
11. Melnikov S.V., Kostin V.N. Assessment of the economic effect of implementation decision support systems at generation facilities // *Energetik*. – 2021. – No. 4. – pp. 31-35.
12. Anikina I.D. A program for optimizing the operation modes of thermal power plants based on digital twins // *Certificate of state registration of a computer program No.RU 2023666007; Russia, 07/10/2023*.
13. Golovina E.Yu., Samarkina E.V., Buinov N.E., Evlosva M.V. Digitalization and digital transformation of thermal power engineering as a factor of increasing efficiency thermal infrastructure (overview). *Teplozenergetika*, 2022, No. 6, pp. 3-16.

14. Krupenev D.S., Piskunova V.M., Galfinger AG. Modeling of thermal power plants while ensuring the reliability of energy supply and energy security. News of higher educational institutions. Energy Problems. 2023;25(2):12-25. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25>
15. Chalbyshev A.V. Optimization of the modes of operation of thermal power plants, taking into account the modern conditions of their functioning as part of the electric power system: dis. ... Candidate of Technical Sciences. Irkutsk, 2015. 158 p.
16. Orlov D.S., Novikov V.V. Comparative analysis of methods for optimal load distribution between CHP units // Industrial Power engineering. – 2024. – No. 3. – pp. 28-34.
17. Sidorenko G.A., Kulikov A.Yu. Technical and economic aspects of operation of thermal power plants at capacities below the technical minimum // Thermal power engineering. – 2023. – No. 9. – pp. 78-85.
18. Abramov E.G. Features of calculating the marginal costs of CHP plants when operating in the zone of non-recommended modes // Energetik. – 2023. – No. 8. – pp. 22-26.
19. Nikitin S.L., Frolov K.V., Yashin M.P. Errors in models of fuel efficiency of power units in the field of low loads // Bulletin of IrSTU. – 2022. – Vol. 26, No. 5. – pp. 156-165.
20. Decree of the Government of the Russian Federation dated December 27, 2010 No. 1172 "On approval of the Rules of the wholesale market of electric energy and capacity" (ed. from 11/25/2023).
21. Zhang K., Li J., Wang Y. Hybrid model for predicting the efficiency of thermal power plants, taking into account the aging of equipment // Energy conversion and management. – 2023. – Volume 278. – p. 116715.
22. Tarasov I.B., Glushkov A.S. Forecasting specific fuel consumption at a thermal power plant using machine learning based on data from industrial archives // Informatics, management, Economics. – 2024. – № 1(15). – Pp. 45-55.
23. Liu Z., Wang H., Zhang Yu. A data-based approach to monitoring the efficiency of thermal power plants under flexible operating conditions // Energy and artificial intelligence. – 2023. – Volume 12. – p. 100231.
24. Chen W., Liu Z., Wang H. Optimization of the minimum technical load of thermal power units in the electricity markets // International Journal of Electric Power Engineering and Energy Systems. – 2024. – Volume 156. – p. 109782.

Authors of the publication

Mahsud M. Sultanov – Volzhsky Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Volzhsky, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-2920-5515>. sultanov_mm@mail.ru

Alexey A. Smirnov – Volzhsky Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Volzhsky, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0009-0000-9743-9076>. lehasmirnov1@gmail.com

Egor V. Zhiltsov – Volzhsky Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Volzhsky, Russia. egorlr@mail.ru

Elizaveta Yu. Yakovleva – Volzhsky Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Volzhsky, Russia. e.y.soloveva@vfmei.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **13.01.2026 г.**

Отредактировано **21.01.2026 г.**

Принято **02.02.2026 г.**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 662.613

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-1-131-140

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА НА ВЫБРОСЫ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Демин А.В.¹, Демина Г.В.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

alexei_demin@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Определение количественных характеристик выбросов оксидов азота при сжигании газовых смесей, содержащих водород, монооксид углерода и метан. РЕЗУЛЬТАТЫ. Рассматривалось несколько типов газов различных химических составов и количественного содержания компонентов: CH_4 ; CO ; H_2 ; 7 типов синтез-газа с разным содержанием CH_4 , CO , H_2 , CO_2 , N_2 . Такие типы синтез-газа имели низкие, средние и высокие значения теплоты сгорания. При выполнении численных исследований параметров и состава продуктов сгорания использовался подход, основанный на химически равновесном состоянии многокомпонентной реагирующей смеси при минимальном значении изобарно-изотермического потенциала. Получены значения основных параметров продуктов сгорания и оценки выбросов оксидов азота при различном соотношении исходных компонентов в газовой смеси и различных значениях коэффициента избытка воздуха. Значения относительных показателей расхода продуктов сгорания достаточно сильно коррелируют со значениями относительных показателей выбросов оксидов азота. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Получены численные оценки взаимосвязи между теплотой сгорания генераторных газов, расходными характеристиками продуктов сгорания, определяемыми составом исходной газовой смеси, и выбросами оксидов азота. Количественный показатель W_{nc} , определяемый отношением массовых расходов продуктов сгорания базового топлива и альтернативного генераторного газа, при условии одинаковой тепловой мощности энергоустановки, дает возможность предварительной сравнительной оценки ожидаемого уровня выбросов NO_x . При значениях $W_{nc} \approx 1$ уровень выбросов NO_x у сравниваемых топливных композиций примерно одинаков. Соответственно, при значениях этого показателя больше или меньше единицы уровни выбросов оксидов азота при сжигании альтернативного генераторного газа выше или ниже, чем при сжигании базового топлива. Практическое использование показателя W_{nc} наиболее эффективно на стадиях разработки и проектирования новых энергоустановок, включая оптимизацию планирования вычислительных и натурных экспериментов, а также при переводе эксплуатируемых энергоустановок на альтернативное газовое топливо.

Ключевые слова: генераторный газ; горение; моделирование; численные исследования; выбросы; оксиды азота.

Для цитирования: Демин А.В., Демина Г.В. Влияние состава генераторного газа на выбросы загрязняющих веществ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 131-140. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-131-140.

THE INFLUENCE OF GENERATOR GAS COMPOSITION ON POLLUTANT EMISSIONS

Demin A.V.¹, Demina G.V.²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

alexei_demin@mail.ru

Abstract: PURPOSE. Determination of quantitative characteristics of nitrogen oxide emissions during combustion of gas mixtures containing hydrogen, carbon monoxide and methane. **RESULTS.** Several types of gases with different chemical compositions and quantitative content of components were considered: CH₄; CO; H₂; 7 types of synthesis gas with different content of CH₄, CO, H₂, CO₂, N₂. These types of synthesis gas had low, medium and high values of heat of combustion. When performing numerical studies of the parameters and composition of combustion products, an approach based on the chemical equilibrium state of a multicomponent reacting mixture at a minimum value of isobaric-isothermal potential was used. The values of the main parameters of combustion products and estimates of nitrogen oxide emissions were obtained at different ratios of the initial components in the gas mixture and different values of the excess air coefficient. The values of the relative indicators of combustion product consumption correlate quite strongly with the values of the relative indicators of nitrogen oxide emissions. **CONCLUSION.** Numerical estimates of the relationship between the combustion heat of generator gases, the flow characteristics of the combustion products determined by the composition of the initial gas mixture, and nitrogen oxide emissions are obtained. The quantitative indicator W_{ps} , determined by the ratio of the mass flow rates of the combustion products of the base fuel and alternative generator gas, under the condition of the same thermal power of the power plant, makes it possible to preliminary compare the expected level of NO_x emissions. At $W_{ps} \approx 1$, the level of NO_x emissions for the compared fuel compositions is approximately the same. Accordingly, at values of this indicator greater or less than one, the levels of nitrogen oxide emissions during combustion of the alternative generator gas are higher or lower than during combustion of the base fuel. The practical use of the W_{ps} indicator is most effective at the stages of development and design of new power plants, including optimization of planning of computational and full-scale experiments, as well as during the transfer of operating power plants to alternative gas fuel.

Keywords: flammable gas; combustion; modeling; numerical studies; emissions; nitrogen oxides.

For citation: Demin A.V., Demina G.V. The influence of generator gas composition on pollutant emissions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 131-140. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-131-140.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

В настоящее время в энергетике постоянно возрастает доля использования альтернативных возобновляемых топливных ресурсов, к которым, в частности, относится биомасса. При термохимической конверсии биомассы основным продуктом является генераторный газ (синтез-газ), в составе которого находятся горючие газы (H₂, CO, CH₄ и др.) и газы, которые считаются балластными (CO₂, N₂ и др.). Для производства синтез-газа основным способом является газификация. Эффективность процессов газификации биомассы во многом определяется её химическим составом, видом газифицирующего агента, технологией подвода необходимой тепловой энергии и т.д.

Для наиболее эффективной организации процессов газификации необходимо выполнение соответствующих теоретических и экспериментальных исследований. Многими исследователями уделяется большое внимание поиску решений такой сложной задачи, как повышение степени конверсии исходного сырья в конечные продукты, содержащие горючие газы в наибольшем количестве, при уменьшении затрат на технологические процессы газификации [1-8].

При практическом использовании генераторных газов – сжигании с целью получения тепловой энергии, основными научными задачами являются повышение полноты сгорания и снижение эмиссии загрязняющих веществ (NO_x, CO и др.) [9-13].

Еще одним важным аспектом данной проблемы является организация производственного экологического контроля при увеличении доли использования синтез-газа при генерации тепловой энергии [14]. В производственных условиях генераторные газы сжигают непосредственно в смеси с воздухом или в определенных соотношениях с природным газом, содержащим в наибольших количествах метан. В зависимости от состава генераторного газа или его доли в смеси с природным газом выбросы загрязняющих веществ, главным образом, оксидов азота, могут превышать или быть меньшими по сравнению с выбросами при сжигании природного газа [9-11]. Например, в работе [9] представлены результаты исследований горения чистого метана и синтез-газов различного состава: синтез-газ А (67% CO: 33% H₂), синтез-газ В (50% CO: 50% H₂) и синтез-газ С (33%

СО: 67% H₂). Результаты показали, что для полного сгорания синтез-газа с более высоким содержанием СО требуется больше времени пребывания в камере сгорания по сравнению с другими газами. Также подтверждена высокая зависимость выбросов NO_x от максимального уровня температуры продуктов горения. Продукты горения синтез-газа С характеризуются наиболее высокими выбросами NO_x, а продукты горения синтез-газа А – наименьшими. Результаты исследований [13] показали, что при сжигании синтез-газа, содержащего СО и H₂, при определенных условиях выбросы NO_x могут быть выше, более чем на порядок, выбросов NO_x при сжигании метана.

В данной работе рассматриваются горючие газы нескольких типов в зависимости от состава компонентов: CH₄; СО; H₂; 7 типов синтез-газа с различным содержанием CH₄, СО, H₂, СО₂, N₂ в зависимости от вида газифицирующего агента. Такие типы синтез-газа имели низкие, средние и высокие значения теплоты сгорания.

Основной целью работы являлось выявление взаимосвязей между соотношением исходных компонентов в газовой смеси при различных значениях коэффициента избытка воздуха и выбросами оксидов азота.

Новизна результатов исследования заключается в определении факторов, в наибольшей степени влияющих на эмиссию NO_x при сжигании генераторных газов. Прежде всего, состав газовой смеси предопределяет значение низшей теплоты сгорания и количество воздуха, необходимого для полного сжигания газа. В свою очередь, эти показатели однозначно определяют максимальную температуру продуктов сгорания и, соответственно – уровень эмиссии термических оксидов азота.

Полученные результаты практически значимы при выборе методов подавления образования оксидов азота, проектировании и создании горелочных устройств с возможностью регулирования режимных параметров в зависимости от состава сжигаемых газов в тепловых энергоустановках.

Материалы и методы (Materials and methods)

При моделировании процессов горения использован метод расчета, основанный на допущении, что химически реагирующая многокомпонентная смесь продуктов горения находится в состоянии термодинамического и химического равновесия [3]. Такому состоянию смеси соответствует минимальное значение изобарно-изотермического потенциала.

Принятые условные обозначения и показатели:

Q_H – низшая теплота сгорания газообразного горючего, кДж/кг;

k_{m0} – массовое стехиометрическое соотношение окислителя (воздух) и горючего;

k_m – массовое соотношение окислителя и горючего;

$\alpha_v = k_m / k_{m0}$ – коэффициент избытка воздуха;

$m_{nc} = (1 + k_m)$ – массовый расход продуктов сгорания при сжигании 1 кг газа, кг/с;

$\beta = Q_{HCH_4} / Q_{Hi}$ – отношение низшей теплоты сгорания метана к низшей теплоте сгорания газа i -го типа;

$M_{nc} = \beta \cdot (1 + k_m)$ – массовый расход продуктов сгорания при сжигании газа в количестве, необходимом для достижения одинаковой тепловой мощности энергоустановки, кг/с;

T – температура продуктов сгорания, К;

m_{NOx} – массовый расход оксидов азота при сжигании 1 кг газа, кг/с;

M_{NOx} – массовый расход оксидов азота при сжигании β кг газа, кг/с;

$W_{nci} = M_{ncCH_4} / M_{nci}$ – отношение массовых расходов продуктов сгорания метана и i -го газа;

$W_{NOxi} = M_{NOxi} / M_{NOxCH_4}$ – отношение массовых расходов оксидов азота при сжигании i -го газа и метана.

Показатели, характеризующие выбросы СО₂ при сжигании топлива:

G_C – количество углерода в топливе, т/С/т;

$W_C = G_C \cdot 10^3 / H_f$ – энергетический эквивалент содержания углерода, т/С/ТДж;

$EF_{CO_2} = W_C \cdot 44 / 12$ – коэффициент выбросов СО₂ при сжигании топлива, т СО₂/ТДж.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

На первом этапе работы прогнозирование состава и параметров продуктов сгорания было выполнено для газов, содержащих только метан, монооксид углерода, водород и еще для следующих четырех типов генераторного газа.

Тип А: условная формула – $C_{0,37}H_{0,38}O_{0,5}N_{0,96}$; газифицирующий агент – продукты неполного сгорания части биомассы при подводе воздуха [8];

Тип В: условная формула – $C_{0,58}H_{1,12}O_{0,75}N_{0,04}$; газифицирующий агент – продукты неполного сгорания части биомассы при подводе кислорода [8];

Тип С: условная формула – $C_{0,6}H_{0,8}O_{0,8}$; газифицирующий агент – водяной пар [8];

Тип D: условная формула – $C_{0,501}H_{1,046}O_{0,527}N_{0,008}$; газифицирующий агент – водяной пар [15].

Основные характеристики генераторных газов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Характеристика генераторного газа

Characteristics of generator gas

Состав и параметры генераторного газа	Тип генераторного газа			
	А	В	С	D
CO, об. %	20	25	40	44,7
H ₂ , об. %	15	40	40	49,5
CH ₄ , об. %	2	8	0	1,4
CO ₂ , об. %	15	25	20	4,0
N ₂ , об. %	48	2	0	0,4
Q _m , кДж/кг	4145	11209	10081	16507
k _{m0}	1,1298	3,2417	2,6534	4,4191
G _C , т C/т	0,1689	0,3369	0,3459	0,3849
W _C , т C/ТДж	40,76	30,06	34,33	23,36
EF _{CO2} , т CO ₂ /ТДж	149,5	110,2	125,9	85,68

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

Наиболее информативные параметры продуктов сгорания различных газов при значениях коэффициентов избытка воздуха > 1 приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Параметры продуктов сгорания

Combustion product parameters

Газ	Параметры	Значения параметров			
		α=1,0	α=1,1	α=1,2	α=1,4
CH ₄	k _m	17,211	18,932	20,654	24,096
	T, К	2224	2143	2043	1859
	NO _x , масс. %	0,2095	0,3349	0,35174	0,2774
CO	k _m	2,4644	2,7108	2,9573	3,4502
	T, К	2376	2332	2275	2138
	NO _x , масс. %	0,4469	0,4993	0,5198	0,4831
H ₂	k _m	34,241	37,665	41,089	47,938
	T, К	2369,2	2292,8	2198,6	2019,4
	NO _x , масс. %	0,3039	0,4669	0,5135	0,4450
А	k _m	1,129	1,242	1,355	1,581
	T, К	1839	1770	1727	1622
	NO _x , масс. %	0,0305	0,0834	0,0993	0,0907
В	k _m	3,241	3,565	3,89	4,538
	T, К	2160,4	2091,4	2026,3	1875,2
	NO _x , масс. %	0,1724	0,2518	0,28455	0,2498
С	k _m	2,653	2,918	3,184	3,714
	T, К	2225	2177	2110	1966
	NO _x , масс. %	0,2331	0,3101	0,3395	0,3122
D	k _m	4,419	4,861	5,303	6,186
	T, К	2328	2274	2202	2044
	NO _x , масс. %	0,3443	0,4325	0,4647	0,4193

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

При сжигании генераторных газов в одной и той же установке, при условии достижения одинаковых значений тепловой мощности, такой же, как при сжигании CH_4 , требуется изменение расхода газов пропорционально отношению низшей теплоты сгорания метана к низшей теплоте сгорания газа конкретного состава. В таблицах 3-6 приведены расходные характеристики продуктов сгорания и выбросов NO_x при сжигании одного ($m_{\text{пс}}$, m_{NO_x}) и β ($M_{\text{пс}}$, M_{NO_x}) кг газа в секунду.

Таблица 3
Table 3

Характеристика расходов продуктов сгорания и выбросов NO_x при $\alpha=1$
Characteristics of combustion product consumption and NO_x emissions at $\alpha=1$

Параметры	Значения параметров для различных типов газа						
	CH_4	CO	H_2	A	B	C	D
$m_{\text{пс}}$, кг/с	18,211	3.464	35.242	2,129	4,241	3,653	5,419
m_{NO_x} , кг/с	0,0381	0.0154	0.1070	0,0006	0,0073	0,0085	0,0186
$M_{\text{пс}}$, кг/с	18,211	17.122	14.705	25,69	18,921	18,12	16,414
M_{NO_x} , кг/с	0,0381	0.0765	0.0446	0,0078	0,0326	0,0422	0,0565
$W_{\text{пс } i}$	1,0	1.0636	1.2385	0,7088	0,9624	1,005	1,1095
$W_{\text{NO}_x i}$	1,0	2.0055	1.1712	0,2053	0,8552	1,1072	1,4814

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

Таблица 4
Table 4

Характеристика расходов продуктов сгорания и выбросов NO_x при $\alpha=1,1$
Characteristics of combustion product consumption and NO_x emissions at $\alpha=1.1$

Параметры	Значения параметров для различных типов газа						
	CH_4	CO	H_2	A	B	C	D
$m_{\text{пс}}$, кг/с	19,933	3.710	38.666	2,242	4,565	3,918	5,861
m_{NO_x} , кг/с	0,0667	0.0185	0.1805	0,0018	0,0114	0,0121	0,0253
$M_{\text{пс}}$, кг/с	19,933	18.34	16.134	27,054	20,367	19,436	17,753
M_{NO_x} , кг/с	0,0667	0.0915	0.0753	0,0225	0,05128	0,0602	0,0767
$W_{\text{пс } i}$	1,0	1.086	1.235	0,736	0,978	1,025	1,122
$W_{\text{NO}_x i}$	1,0	1.371	1.128	0,338	0,768	0,903	1,15

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

Таблица 5
Table 5

Характеристика расходов продуктов сгорания и выбросов NO_x при $\alpha=1,2$
Characteristics of combustion product consumption and NO_x emissions at $\alpha=1.2$

Параметры	Значения параметров для различных типов газа						
	CH_4	CO	H_2	A	B	C	D
$m_{\text{пс}}$, кг/с	21,654	3.957	42.09	2,355	4,89	4,184	6,302
m_{NO_x} , кг/с	0,0761	0.0205	0.2161	0,0023	0,0139	0,0142	0,0292
$M_{\text{пс}}$, кг/с	21,654	19.558	17.562	28,415	21,813	20,752	19,091
M_{NO_x} , кг/с	0,0761	0.1016	0.0901	0,0282	0,062	0,0704	0,0887
$W_{\text{пс } i}$	1	1.107	1.233	0,762	0,992	1,043	1,134
$W_{\text{NO}_x i}$	1	1.3348	1.1841	0,3707	0,8149	0,925	1,165

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

Таблица 6
Table 6

Характеристика расходов продуктов сгорания и выбросов NO_x при $\alpha=1,4$
Characteristics of combustion product consumption and NO_x emissions at $\alpha=1.4$

Параметры	Значения параметров для различных типов газа						
	CH_4	CO	H_2	A	B	C	D
$m_{\text{пс}}$, кг/с	25.096	4.4502	48.938	2.581	5.538	4.714	7.186
m_{NO_x} , кг/с	0.0696	0.0214	0.2177	0.0023	0.0138	0.0147	0.0301
$M_{\text{пс}}$, кг/с	25.096	21.994	20.42	31.141	24.705	23.384	21.768
M_{NO_x} , кг/с	0.0696	0.1062	0.0908	0.0282	0.0617	0.073	0.0912
$W_{\text{пс } i}$	1	1.141	1.229	0.805	1.015	1.073	1.152
$W_{\text{NO}_x i}$	1	1.525	1.305	0.405	0.886	1.048	1.311

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

При сравнении полученных относительных показателей $W_{\text{пс } i}$ и $W_{\text{NO}_x i}$ получено, что

при их значениях близких к 1,0 выбросы оксидов азота вполне сопоставимы с выбросами при использовании базового топлива – метана. В большинстве случаев при значениях $W_{\text{пс } i} > 1$ значение $W_{\text{NOx } i} > 1$, и наоборот.

Значения показателя расхода $W_{\text{пс } i}$ достаточно сильно коррелируют со значениями показателя выбросов $W_{\text{NOx } i}$. Результаты статистической обработки с использованием функции КОРРЕЛ (Excel) представлены в таблице 7.

Таблица 7
Table 7

Значения коэффициентов корреляции между $W_{\text{пс } i}$ и $W_{\text{NOx } i}$
Values of the correlation coefficients between $W_{\text{пс } i}$ and $W_{\text{NOx } i}$

Коэффициент корреляции	Коэффициент избытка воздуха			
	1,0	1,1	1,2	1,4
r	0,713	0,865	0,911	0,925

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

Полученные значения коэффициента корреляции r показывают, что существует высокая сила связи между переменными $W_{\text{пс } i}$ и $W_{\text{NOx } i}$. В камерах сгорания тепловых энергоустановок сжигание горючих газов, как правило, осуществляется при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1,2-1,4$. При таких значениях α сила связи очень высокая.

На следующем этапе работы выполнены численные исследования для генераторных газов, имеющих в своем составе одинаковые компоненты, но в различных концентрациях. В качестве базового горючего был выбран газ типа С (табл. 1). В таком газе балластом является диоксид углерода. Другие варианты содержания компонентов формировались при уменьшении доли CO_2 . Таким образом, увеличивалось содержание CO и H_2 . Основные характеристики газовых смесей группы С приведены в таблице 8.

Таблица 8
Table 8

Характеристика генераторного газа
Characteristics of generator gas

Состав и параметры генераторного газа	Тип генераторного газа		
	C_1	C_2	C_3
CO , об. %	42,5	45	47,5
H_2 , об. %	42,5	45	47,5
CO_2 , об. %	15	10	5
Q_{H} , кДж/кг	11506	13169	15125
k_{m0}	3,0303	3,4682	3,9833
G_{C} , т С/т	0,3563	0,3684	0,3826
W_{C} , т С/ТДж	30,968	27,976	25,299
EF_{CO_2} , т CO_2 /ТДж	113,55	102,58	92,762

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

Некоторые параметры продуктов сгорания газов, входящих в группу С, представлены в таблицах 9 и 10.

Таблица 9
Table 9

Параметры продуктов сгорания
Combustion product parameters

Газ	Параметры	Значения параметров			
		$\alpha=1,0$	$\alpha=1,1$	$\alpha=1,2$	$\alpha=1,4$
C_1	k_{m}	3,03	3,333	3,636	4,242
	T , К	2256	2206	2137	1988
	NO_x , масс. %	0,2645	0,3442	0,3737	0,3406
C_2	k_{m}	3,468	3,815	4,162	4,855
	T , К	2293	2242	2173	2021
	NO_x , масс. %	0,3059	0,3877	0,4186	0,3811
C_3	k_{m}	3,983	4,382	4,78	5,577
	T , К	2327	2275	2206	2052
	NO_x , масс. %	0,3475	0,4314	0,4633	0,4215

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

Характеристика расходов продуктов сгорания и выбросов NO_x
Characteristics of combustion product consumption and NO_x emissions

Коэффициент избытка воздуха	Параметры	Значения параметров для различных типов газа			
		C	C ₁	C ₂	C ₃
$\alpha=1,0$	$m_{\text{пс}}$, кг/с	3,653	4,03	4,468	4,983
	m_{NO_x} , кг/с	0,0085	0,0106	0,0136	0,0173
	$W_{\text{пс } i}$	1	1,034	1,068	1,1
	$W_{\text{NO}_x i}$	1	1,096	1,228	1,355
$\alpha=1,1$	$m_{\text{пс}}$, кг/с	3,918	4,333	4,815	5,381
	m_{NO_x} , кг/с	0,0121	0,0149	0,0186	0,0232
	$W_{\text{пс } i}$	1	1,032	1,063	1,092
	$W_{\text{NO}_x i}$	1	1,075	1,1756	1,2731
$\alpha=1,2$	$m_{\text{пс}}$, кг/с	4,184	4,636	5,162	5,78
	m_{NO_x} , кг/с	0,0142	0,0173	0,0216	0,0267
	$W_{\text{пс } i}$	1	1,03	1,059	1,086
	$W_{\text{NO}_x i}$	1	1,069	1,164	1,256
$\alpha=1,4$	$m_{\text{пс}}$, кг/с	4,714	5,242	5,855	6,576
	m_{NO_x} , кг/с	0,0147	0,0178	0,0223	0,0277
	$W_{\text{пс } i}$	1	1,026	1,052	1,076
	$W_{\text{NO}_x i}$	1	1,063	1,161	1,255

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

Приведенные в таблице 10 значения показателей $W_{\text{пс } i}$ и $W_{\text{NO}_x i}$ определены для условия, что базовым в данном случае является газ типа C. Полная взаимосвязь этих показателей при изменении состава газа также подтверждается значениями коэффициента корреляции $r > 0,99$.

Изменение массовых расходов продуктов сгорания газов, входящих в группу C, и выбросов оксидов азота в зависимости от коэффициента избытка воздуха приведено при одинаковой тепловой мощности энергоустановки на рисунках 1 и 2.

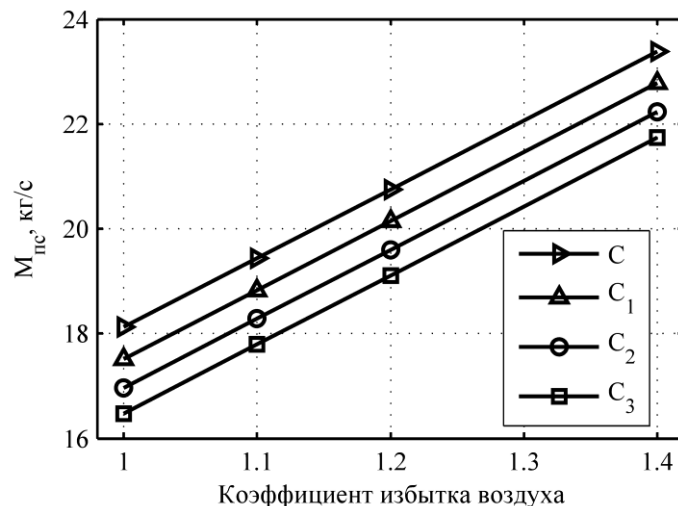


Рис. 1. Массовые расходы продуктов сгорания генераторных газов (C, C₁, C₂, C₃) в зависимости от коэффициента избытка воздуха
Fig. 1. Mass flow rates of combustion products of generator gases (C, C₁, C₂, C₃) depending on the equivalent ratio

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

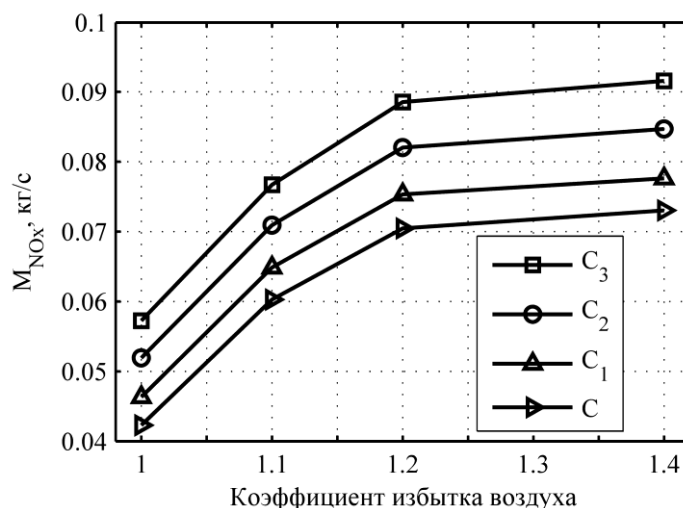


Рис. 2. Выбросы оксидов азота при сжигании генераторных газов (C, C₁, C₂, C₃) в зависимости от коэффициента избытка воздуха

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

Анализ данных (табл. 10 и рис.1, 2) показывает, что при увеличении доли горючих газов и, следовательно, увеличении теплоты сгорания газовой смеси, соответственно снижается расход продуктов сгорания, но увеличиваются выбросы оксидов азота.

Заключение (Conclusions)

Выполнены численные исследования влияния состава генераторных газов при их сжигании на выбросы оксидов азота.

Подтверждено существование и получены численные оценки взаимосвязи между теплотой сгорания генераторных газов, расходными характеристиками продуктов сгорания, определяемыми составом исходной газовой смеси, и выбросами оксидов азота.

Количественный показатель W_{nc} , определяемый отношением массовых расходов продуктов сгорания базового топлива и альтернативного генераторного газа, при условии одинаковой тепловой мощности энергоустановки, дает возможность предварительной сравнительной оценки ожидаемого уровня выбросов NO_x. При значениях $W_{nc} \approx 1$ уровень выбросов NO_x у сравниваемых топливных композиций примерно одинаковый. Соответственно, при значениях этого показателя больше или меньше единицы уровни выбросов оксидов азота при сжигании альтернативного генераторного газа выше или ниже, чем при сжигании базового топлива.

Практическое использование показателя W_{nc} наиболее эффективно на стадиях разработки и проектирования новых энергоустановок, включая оптимизацию планирования вычислительных и натуральных экспериментов, а также при переводе эксплуатируемых энергоустановок на альтернативное газовое топливо.

Литература

1. Ramos A., Monteiro E., Rouboa A. Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. V. 110. pp. 188 – 206. doi: 10.1016/j.rser.2019.04.048.
2. Mazaheri N., Akbarzadeh A.H., Madadian E., et al. Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production // Energy Conversion and Management. 2019. V. 183. pp. 671 – 688. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.097.
3. Naoumov V. I., Krioukov V.G., Abdullin A.L., et al. Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications. – Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108581714
4. Perera S., Wickramasinghe C., Samarasinghe B., et al. Modeling of thermochemical conversion of waste biomass – a comprehensive review // Biofuel Research Journal. 2021. V. 8(4). pp. 1481 – 1528. doi: 10.18331/BRJ2021.8.4.3.
5. Kushwah A., Reina T.R., Short M. Modelling approaches for biomass gasifiers: a comprehensive overview // Science of the Total Environment. 2022. V. 834. pp. 155243. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155243.
6. Ajorloo M., Ghodrati M., Scott J., et al. Recent advances in thermodynamic analysis of biomass gasification: a review on numerical modelling and simulation // Journal of the Energy Institute. 2022. V. 102. pp. 395 – 419. doi: 10.1016/j.joei.2022.05.003.

7. Tezer Ö., Karabağ N., Öngen A., et al. Biomass gasification for sustainable energy production: a review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. V. 47(34). pp. 15419-15433. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.158
8. Khan M. J., Al-attab K. A. Steam Gasification of Biomass for Hydrogen Production – A Review and Outlook // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022. V. 98(2). pp. 175 – 204. doi: 10.37934/arfmts.98.2.175204
9. Sanusi Y.S., Dandajeh H.A. Effect of different syngas compositions on the combustion characteristics and emission of a model combustor // *Nigerian Journal of Technology*. 2020. V. 39(3). pp. 767 – 775 doi: 10.4314/njt.v39i3.16
10. Othman N.F., Boosroh M.H. Effect of H₂ and CO contents in syngas during combustion using Micro Gas Turbine // *IOP Publishing IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* V. 32. 2016. 012037. doi:10.1088/1755-1315/32/1/012037
11. Van Huynh C., Kong S-C. Combustion and NO_x emissions of biomass-derived syngas under various gasification conditions utilizing oxygen-enriched-air and steam // *Fuel*. V. 107. pp. 455-464. doi:10.1016/j.fuel.2012.12.016
12. Таймаров М.А., Ильин В.К., Чикляев Е.Г., Сунгатуллин Р.Г. Особенности применения метано-водородной фракции в качестве топлива для котлов ТЭС. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2019;21(3):109-116. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-109-116>
13. Гнутикова М.И. Влияние температуры топливно-воздушной смеси на массовую долю выбросов оксидов азота в процессе термохимической рекуперации // *Математические методы в технологиях и технике*. 2021; (5): 115-118. doi:10.52348/2712-8873_ММТТ_2021_5_115
14. Иваницкий М.С. Производственный экологический контроль полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания органического топлива. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(1):3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-3-12>
15. Демин А.В., Демина Г.В. Экологические характеристики термической утилизации отходов с внешним и внутренним подводом тепловой энергии. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022;24(6):143-152. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152>.

Авторы публикации

Демин Алексей Владимирович – профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-3658-7830>. alexei_demin@mail.ru

Демина Галина Владимировна – доцент кафедры «Ботаника и физиология растений», Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия.

References

1. Ramos A., Monteiro E., Rouboa A. Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. V. 110. pp. 188 – 206. doi: 10.1016/j.rser.2019.04.048.
2. Mazaheri N., Akbarzadeh A.H., Madadian E., et al. Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production // *Energy Conversion and Management*. 2019. V. 183. pp. 671 – 688. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.097.
3. Naoumov V. I., et al. Chemical kinetics in combustion and reactive flows: modeling tools and applications. – Cambridge University Press, 2019. doi:10.1017/9781108581714
4. Perera S., Wickramasinghe C., Samarasinghe B., et al. Modeling of thermochemical conversion of waste biomass – a comprehensive review // *Biofuel Research Journal*. 2021. V. 8(4). pp. 1481 – 1528. doi: 10.18331/BRJ2021.8.4.3.
5. Kushwah A., Reina T.R., Short M. Modelling approaches for biomass gasifiers: a comprehensive overview // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 834. pp. 155243. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155243.
6. Ajourloo M., Ghodrati M., Scott J., et al. Recent advances in thermodynamic analysis of biomass gasification: a review on numerical modelling and simulation // *Journal of the Energy Institute*. 2022. V. 102. pp. 395 – 419. doi: 10.1016/j.joei.2022.05.003.
7. Tezer Ö., Karabağ N., Öngen A., et al. Biomass gasification for sustainable energy production: a review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. V. 47(34). pp. 15419-15433. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.158
8. Khan M. J., Al-attab K. A. Steam Gasification of Biomass for Hydrogen Production – A Review

and Outlook // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2022. V. 98(2). pp. 175 – 204. doi: 10.37934/arfmts.98.2.175204

9. Sanusi Y.S., Dandajeh H.A. Effect of different syngas compositions on the combustion characteristics and emission of a model combustor // Nigerian Journal of Technology. 2020. V. 39(3). pp. 767 – 775 doi: 10.4314/njt.v39i3.16

10. Othman N.F., Boosroh M.H. Effect of H₂ and CO contents in syngas during combustion using Micro Gas Turbine // IOP Publishing IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. V. 32. 2016. 012037. doi:10.1088/1755-1315/32/1/012037

11. Van Huynh C., Kong S-C. Combustion and NO_x emissions of biomass-derived syngas under various gasification conditions utilizing oxygen-enriched-air and steam // Fuel. V. 107. pp. 455-464. doi:10.1016/j.fuel.2012.12.016

12. Taymarov M.A., Ilyin V.K., Chiklyaev E.G., Sungatullin R.G. Features of application of the methane-hydrogen fraction as fuel for thermal power plant boiler. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(3):109-116. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-109-116>

13. Gnutikova M.I. Influence of fuel-air mixture temperature on the mass rates of nitrogen oxides emissions during thermochemical recovery // *Mathematical methods in technologies and technics*. 2021; (5): 115-118. doi:10.52348/2712-8873_MMTT_2021_5_115

14. Ivanitskiy M.S. Industrial environmental control of polycyclic aromatic hydrocarbons in organic fuel combustion product. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024;26(1):3-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-3-12>

15. Demin A.V., Demina G.V. Environmental characteristics of thermal utilization of waste with external and internal supply of thermal energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):143-152. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-143-152>

Authors of the publication

Alexey V. Demin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-3658-7830>. alexei_demin@mail.ru

Galina V. Demina – Kazan Federal University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **27.05.2025 г.**

Отредактировано **22.10.2025 г.**

Принято **01.11.2025 г.**



ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЗОННОГО ПОДЗЕМНОГО ТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА В ЗДАНИИ С НУЛЕВЫМ УГЛЕРОДНЫМ СЛЕДОМ

Султангузин И.А.¹, Чайкин В.Ю.¹, Цэрэндорж Ц.¹, Яворовский Ю.В.¹, Говорин А.В.²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²АО «САГА электроникс», г. Москва, Россия

tserendorzhT@mpei.ru, chaikinVY@mpei.ru

Резюме: ЦЕЛЬЮ данной статьи является анализ эффективности работы сезонного подземного теплового аккумулятора для обеспечения отопления жилого дома и оптимизация режимов его эксплуатации на основе экспериментальных данных 2022-2024 годов. Решение вопроса сезонности этого вида энергии позволит увеличить объёмы выработки энергии и достичь нулевого углеродного следа для энергоэффективных зданий. **ЗНАЧИМОСТЬ.** Впервые на экспериментальном уровне оценены реальные режимы работы подземного теплового аккумулятора в сочетании с плоскими солнечными коллекторами в условиях длительного холодного периода. Определен температурный предел безопасной эксплуатации теплового аккумулятора (ТА) с теплоизоляцией из XPS (83,7°C), что позволяет повысить надежность проектирования. Полученные данные использованы для адаптации и уточнения математических моделей в TRNSYS, что повышает точность прогнозирования работы системы. **Практическая значимость:** достижение снижения энергопотребления на отопление и ГВС до 42% по сравнению с исходным уровнем. Увеличение периода работы отопительной системы без включения теплового насоса – до 20 декабря 2024 года. Подтверждение достижимости нулевого углеродного следа для жилого дома. Возможность применения результатов при проектировании энергоэффективных зданий в условиях холодного климата. **МЕТОДЫ.** Экспериментальные измерения температур и энергопотребления оборудования в 2022-2024 гг. Математическое моделирование тепловых процессов: ANSYS Steady State Thermal – определение максимальной безопасной температуры ТА. TRNSYS – прогнозирование работы системы в зимний период. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В результате проведенных экспериментальных и расчетных исследований были осуществлены анализ и оценка данных мониторинга выработки и потребления тепловой энергии. Потребление электрической энергии на отопление и горячее водоснабжение дома за счет использования теплового насоса и солнечных коллекторов снизилось с 4420 кВт·ч в 2022 году до 3050 кВт·ч в 2023 году, т.е. на 31%, а в 2024 году снизилось до 2568 кВт·ч, т.е. на 42%. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Использование сезонного подземного теплового аккумулятора и солнечных коллекторов для отопления и ГВС, в сочетании с фотоэлектрическими панелями и электрочастью для автомобиля, обеспечило достижение нулевого углеродного следа в 2023 и 2024 гг.

Ключевые слова: энергоэффективность; тепловой насос; возобновляемые источники энергии; сезонный подземный тепловой аккумулятор; солнечный коллектор.

Для цитирования: Султангузин И.А., Чайкин В.Ю., Цэрэндорж Ц., Яворовский Ю.В., Говорин А.В. Исследование сезонного подземного теплового аккумулятора в здании с нулевым углеродным следом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 141-155. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-141-155.

RESEARCH OF SEASONAL UNDERGROUND THERMAL STORAGE IN A NET-ZERO CARBON BUILDING

Sultanguzin I.A.¹, Chaikin V.Y.¹, Tsetsgee Ts.¹, Yavorovsky Y.V.¹, Govorin A.V.²

¹National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia

²SAGA Electronics JSC, Moscow, Russia

tserendorzhT@mpei.ru, chaikinVY@mpei.ru

Abstract: THE PURPOSE of this paper is to analyze the efficiency of a seasonal UTES for heating a residential building and optimize its operational modes based on experimental data from 2022-2024. Addressing the seasonality of this energy source will increase energy generation and achieve net-zero carbon for energy-efficient buildings. SIGNIFICANCE. For the first time, the actual operating modes of UTES in combination with flat-plate solar collectors have been experimentally assessed under conditions of a long cold period. The temperature limit for safe operation of the UTES with XPS thermal insulation (83.7°C) has been determined, which allows for increased design reliability. The data obtained has been used to adapt and refine mathematical models in TRNSYS, improving the accuracy of system operation prediction. Practical significance: achieving a reduction in energy consumption for heating and hot water supply of up to 42% compared to the baseline. Extension of the heating system operation period without turning on the heat pump – until December 20, 2024. Confirmation of the achievability of net-zero carbon for individual building. Potential application of the results in the design of energy-efficient buildings in cold climates. METHODS. Experimental measurements of equipment temperatures and energy consumption in 2022-2024. Mathematical modeling of thermal processes: ANSYS Steady State Thermal – determination of the maximum safe temperature of the heating system. TRNSYS – forecasting system performance in winter. RESULTS. The experimental and computational study enabled comprehensive analysis and evaluation of thermal energy production and consumption monitoring data. The integrated heat pump and solar collector installation yielded substantial energy conservation: Electricity consumption for the heat supply system of building, thanks to the use of a heat pump and solar collectors, decreased from 4420 kWh in 2022 to 3050 kWh in 2023, i.e. by 31%, and in 2024 decreased to 2568 kWh, i.e. by 42%. CONCLUSION. The use of a UTES and solar collectors for the heat supply system, in combination with photovoltaic panels and electric car charging, ensured the achievement net-zero carbon in 2023 and 2024.

Keywords: energy efficiency; heat pump; renewable energy; seasonal underground thermal energy storage; solar collector.

For citation: Sultanguzin I.A., Chaikin V.Y., Tsetsgee Ts., Yavorovsky Y.V., Govorin A.V. Research of seasonal underground thermal storage in a net-zero carbon building. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (1): 141-155. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-141-155.

Введение (Introduction)

На данный момент, в мире наблюдается рост популярности строительства энергоэффективных домов. В связи с увеличением применения возобновляемых источников энергии возникает необходимость в исследованиях, направленных на повышение энергоэффективности зданий. Солнечные коллекторы являются одной из наиболее востребованных технологий для использования солнечной энергии. Значимость проблемы обусловлена тем, что зимой потребность в тепле возрастает, тогда как интенсивность солнечной радиации снижается. Для решения задачи сезонного накопления тепловой энергии и эффективного использования солнечной энергии применяется подземный тепловой аккумулятор. Популярной в строительстве остается концепция пассивного дома, для которой характерен показатель удельного теплопотребления на отопление менее 15 кВт·ч/(м²·год). Для достижения более высокой эффективности и снижения теплопотребления до нуля используются ВИЭ¹. В России нет зданий, отвечающих всем требованиям стандартов пассивного дома [1, 2] из-за сурового климата. Тем не менее, методы и основные принципы, заложенные в основу их конструкции, уже используются для строительства энергоэффективных домов.

Основным источником отопления рассматриваемого здания является грунтовый тепловой насос (ТН), совместно с ним работают солнечные коллекторы и сезонный подземный тепловой аккумулятор. Производство тепловой энергии в солнечных коллекторах зависит от времени суток, погодных условий и времени года. Преимущество комбинированных систем, объединяющих солнечные коллекторы и тепловые насосы, заключается в их признании как экологически безопасных и энергоэффективных технологий, обеспечивающих теплоснабжение и охлаждение зданий.

Сезонный подземный тепловой аккумулятор может служить эффективным

¹Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов

решением проблемы неравномерного производства тепловой энергии солнечными коллекторами. Выделяют два основных подхода к сезонному аккумулированию тепла и холода: с использованием теплового аккумулятора [3] и льдоаккумулятора [4]. Основное преимущество льдоаккумулятора заключается в том, что он может накапливать значительно больше энергии, чем обычные теплоаккумуляторы, за счет использования теплоты фазового перехода из воды в лед и обратно. Оба варианта расположены под землей и нагреваются за счет СК. В исследованиях [5, 6] показаны преимущества варианта с подземным ТА. Это позволяет использовать теплоту воды, нагретой до температуры (от 25 до 85°C), для отопления дома в осенний период. Работа льдоаккумулятора осуществляется только совместно с тепловым насосом. Это связано с тем, что температура внутри емкости опускается до 0 градусов используя скрытую теплоту кристаллизации.

В последние годы для запасаения тепла в системах солнечной энергетики всё шире используются материалы с фазовым переходом. Такой подход позволяет значительно увеличить ёмкость теплоаккумуляторов, что делает их особенно эффективными при сезонном накоплении тепловой энергии [7, 8].

Цель данного исследования – оценить возможность применения сезонного подземного теплового аккумулятора в системе отопления здания. Это требует комплексного подхода, включающего модернизацию инженерных систем, интеграцию возобновляемых источников энергии и организацию подземного хранения тепла. Анализ литературы показывает, что большинство работ посвящено теоретическому и компьютерному моделированию таких систем, тогда как экспериментальных исследований режимов их работы существенно меньше. Основной проблемой солнечной энергии является её неравномерное распределение: максимум солнечной радиации приходится на летние месяцы при высоком тепловом спросе зимой. Для устранения этого дисбаланса необходим сезонный подземный тепловой аккумулятор. В ряде исследований [9, 10] рассматриваются различные технологии сезонного накопления тепла, включая подземные тепловые аккумуляторы, водоносные горизонты и скважинные аккумуляторы, которые могут применяться в системах централизованного теплоснабжения [11, 12]. Наибольший интерес для нас представляют системы сезонного накопления тепловой энергии для отдельного здания [13, 14]. В исследовании [15], проведён сравнительный анализ потребностей в тепле для отопления, а также рассчитаны и проанализированы критические параметры площади солнечного коллектора и ёмкости аккумулирования при условии 100%-ной доли солнечной энергии. Были определены величины объемов хранения с использованием различных технологий хранения тепла, включая сезонный подземный ТА, различные термохимические способы с использованием различных материалов.

В России с её холодным климатом важно улучшать эффективность теплоснабжения зданий. Для этого нужно провести всесторонний анализ, который поможет уменьшить влияние фактора сезонности при применении солнечной энергии. Солнечная энергия в сочетании с сезонным аккумулированием тепла может существенно покрыть тепловые потребности зданий в таких условиях. В статье [16] описана солнечная тепловая система с подземным водным аккумулятором тепла объемом 36 м³, используемым для сезонного накопления тепла. Солнечная тепловая система обеспечивает отопление помещений и горячее водоснабжение для энергоэффективного двухэтажного дома в Оттаве, Канада.

Объектом исследования является дом с сезонным аккумулятором тепловой энергии в Московской области [5]. СК выступают ключевым источником теплоснабжения в энергоэффективных домах. В весенне-летние месяцы солнечные коллекторы производят энергии значительно больше, чем требуется дому в течение дня. Следовательно, важно обеспечить эффективное аккумулирование избыточной энергии для ее долгосрочного хранения и последующего применения совместно с тепловыми насосами в холодный осенне-зимний сезон.

Энергетический баланс здания формализуется посредством следующих уравнений:

$$Q_{\text{Приток}} = Q_{\text{Сумм}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{Приток}} = Q_{\text{СК}} + Q_{\text{ТН}} + Q_{\text{ТВ}} - Q_{\text{Пот}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{Сумм}} = Q_{\text{Отоп}} + Q_{\text{Вент}} + Q_{\text{ГВС}} \quad (3)$$

где поступление тепловой энергии равно $Q_{\text{Приток}}$, используется на суммарное потребление тепла $Q_{\text{Сумм}}$ и тепловые потери в сезонном ТА $Q_{\text{Пот}}$, $Q_{\text{Приток}}$ включает в себя

$Q_{СК}$ – тепло от солнечных коллекторов, поступающее непосредственно в дом, тепловую энергию от теплового насоса $Q_{ТН}$, внутреннее тепловыделение $Q_{ТВ}$. Потребление тепловой энергии включает в себя отопительную нагрузку Q_{Omon} , тепловую вентиляционную нагрузку $Q_{Вент}$ и горячее водоснабжение $Q_{ГВС}$.

Дальнейшие исследования направлены на уменьшение расхода тепловой энергии, получаемой от теплового насоса. Сезонный подземный теплоаккумулятор включается в уже существующую систему отопления здания. Теплообеспечение осуществляется геотермальным тепловым насосом, который связывается с установленным в теплоаккумуляторе теплообменником (рис. 1). Это позволяет дольше и эффективнее использовать тепловую энергию, получаемую от солнечного источника.

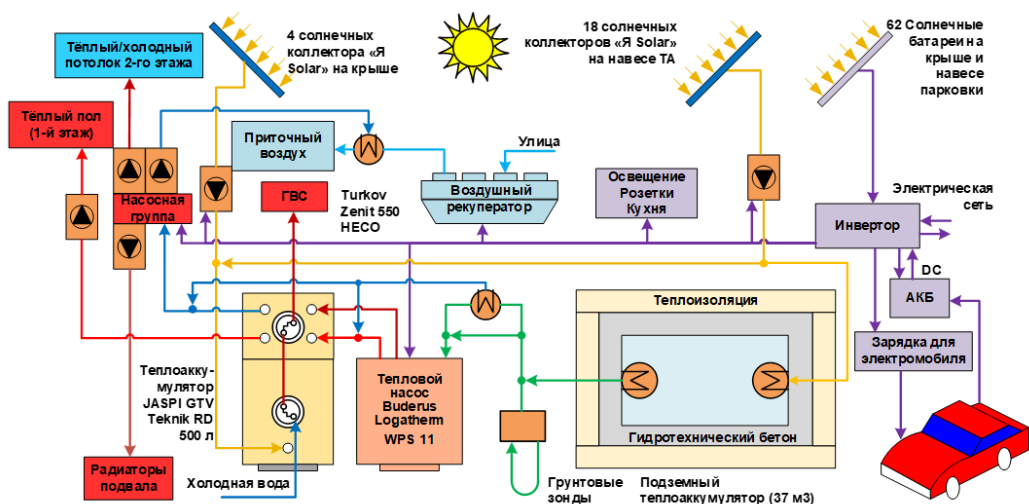


Рис. 1. Схема энергоснабжения дома с сезонным подземным тепловым аккумулятором

Fig. 1. House energy supply scheme with seasonal thermal energy storage

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

В исследовании [17] потери тепла в надземных и подземных коммуникациях составляют 6%, а потери энергии от ТА в землю в течение года составляют примерно 48% по фактическим данным. Таким образом, эффективность использования тепловой энергии подземного ТА составляет около 46%. Для уточнения этих данных требуются дополнительные расчетные и экспериментальные исследования.

Схема энергоснабжения энергоэффективного дома представлена на рисунке 1. Теплоснабжение здания функционирует в зависимости от времени года. Электроэнергия поступает из двух ключевых источников: из электросети и от 62 солнечных фотоэлектрических панелей, установленных на крыше и навесе, суммарной мощностью 22,14 кВт. Избыточная энергия направляется обратно в сеть для реализации. ГВС обеспечивается за счет использования бака емкостью 500 литров, а также при необходимости электрическим бойлером. Летом охлаждение дома осуществляется с помощью вертикальных подземных скважин теплового насоса, без использования компрессора.

Для четырех сезонов года предусмотрены соответствующие режимы функционирования системы теплоснабжения здания, представленной на рисунке 1. Далее приведены характеристики каждого режима.

1. Весенний режим

В весенний период тепловая энергия, генерируемая от солнечных коллекторов на крыше и частично от наземных СК, направляется напрямую для теплоснабжения здания. В солнечные дни ТН отключен, а избыточная солнечная энергия от наземных СК направляется в подземный ТА.

2. Летний режим

Солнечная энергия от СК направляется для нагрева ТА на протяжении всего летнего сезона. ГВС в солнечные дни покрывается от СК на крыше, электрический бойлер в это время не работает. Летом вода в подземном ТА нагревается до максимальной температуры. Охлаждение дома в жаркие дни осуществляется с помощью

циркуляционного насоса, подающего охлаждённый теплоноситель из подземных скважин. Компрессор ТН в это время также не работает.

3. Осенний режим

Осенью тепловая энергия из ТА поступает в бак объёмом 500 литров, а затем используется для теплоснабжения дома. В солнечные дни тепловая энергия от СК напрямую подается в дом. ТН в это время не работает. ТН включается, когда температура воды в ТА снижается до 21-22°C.

4. Зимний режим

ТН начинает работать на отопление дома при температуре воды в ТА ниже 21°C, забирая тепло из ТА. Когда температура в ТА опускается ниже 7°C, происходит переключение ТН с ТА на грунтовые зонды.

Одной из задач данной работы является исследование возможности поступления тепла от подземного ТА непосредственно в дом. В этом режиме тепловой насос не используется.

Ключевой задачей при исследовании режимов работы является определение условий достижения максимальной температуры в теплоаккумуляторе и управление функционированием системы аккумулирования тепла при высоких температурах. В летний период температура внутри теплоаккумулятора значительно повышается, а её чрезмерное увеличение может вызвать деградацию теплоизоляционных свойств конструкции.

Численное и физическое экспериментальное исследование сезонного подземного теплового аккумулятора

Все данные, представленные в статье, получены в результате экспериментов на энергоэффективном доме площадью 200 м², расположенном в Московской области. Для обеспечения работы оборудования в системе теплоснабжения объекта применялись системы управления и мониторинга [18]. Эти системы в режиме реального времени анализируют температуры в системе отопления и оптимизируют режимы работы оборудования. В системах мониторинга данные о температурах, расходах теплоносителя и тепловой мощности собираются в течение длительного периода времени.

Здание дополнительно утеплено, что уменьшает нагрузку на отопление, вентиляцию и кондиционирование. При его возведении применялись принципы пассивного дома, а планировка была разработана с использованием программного обеспечения РНПП [1, 2]. В РНПП создана математическая модель, определившая удельное годовое потребление тепла в размере 37 кВт·ч/(м²·год). Полученные данные позволили повысить энергоэффективность здания.

На рисунке 1 представлена схема объекта, которая в процессе эксплуатации была дополнена оборудованием для улучшения энергоэффективности.

Сезонный подземный теплоаккумулятор размещен на расстоянии 7 метров от здания (рис. 2). В качестве образца для тепловой схемы с теплоаккумулятором использовался пассивный дом в Ирландии [3]. В публикациях [18, 19] представлен подробный обзор современных теплоизоляционных материалов, применяемых в системах хранения тепловой энергии.

На основе анализа данных работ в качестве теплоизоляционных материалов для сезонных подземных ТА по соотношению цена-качество были выбраны экструдированный пенополистирол (XPS) и полиизоцианурат (PIR) [5, 6].

ТА был изготовлен из гидротехнического бетона с толщиной теплоизоляции от 500 до 600 мм. Сезонный подземный теплоаккумулятор состоит из трёх основных элементов: крыши, стен и дна. Дно изолировано слоем толщиной 550 мм, включающим 500 мм XPS и 50 мм PIR-плиты. Стены утеплены на 500 мм, где 400 мм представлены XPS, а по 50 мм составляют внутренний и наружный слой PIR. Крыша оснащена утеплением толщиной 600 мм, состоящим из 500 мм XPS и двух 50-миллиметровых слоев PIR.

Термическое сопротивление стен ТА достигает 16,2 (м²·К)/Вт (табл. 1), термическое сопротивление дна составляет 17,0 (м²·К)/Вт, а для потолка 19,15 (м²·К)/Вт. Объем сезонного подземного ТА составляет 37 м³ (рис. 2).

В некоторых работах, используется аналитический метод расчета сезонного подземного теплового аккумулятора в виде шара, но для более сложных конструкций сезонных подземных ТА с теплоизоляцией обычно применяют компьютерное моделирование [12, 20].

Расчетный параметр стены ТА
Design parameter of TES's envelope

Материалы	λ (теплопроводность),	R (тепловое сопротивление),	Толщина мм
	Вт/(м·К)	(м ² ·К)/Вт	
Бетон	2.04	0.12	200
Пенополиизоцианурат PIR-PIRRO	0.023	4.34	100
Экструдированный пенополистирол. URSA XPS N-III	0.034	11.76	400
ИТОГ		16.21	700

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

Солнечную энергию эффективнее всего производить в СК с вакуумными трубками для получения высокой температуры теплоносителя. Однако проблемой сезонного хранения тепловой энергии являются теплопотери. Эти потери могут быть уменьшены за счет хранения теплоносителя с низкой температурой, но в этом случае рекомендуется использовать тепловой насос для получения температуры в соответствии с потребностями системы отопления. С помощью программы TRNSYS можно разработать динамическую модель энергетической системы [20].

В данной работе рассматривается возможность использования сезонного подземного теплового аккумулятора в сочетании с системой плоских СК для обеспечения эффективной работы рассматриваемой системы в течение всего года с применением подхода жизненного цикла.



Рис. 2. Процесс монтажа сезонного подземного ТА Fig. 2. Installation process of a TES device

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

Подземный ТА для хранения тепла был смоделирован с помощью Steady State Thermal в программном обеспечении Ansys, в результате чего была определена максимально возможная температура нагрева воды в ТА. В качестве основного теплоизоляционного материала планировалось применение экструдированного пенополистирола (XPS), максимальная температура которого не должна превышать 75°C из-за риска деформации и выделения вредных веществ. Расчеты продемонстрировали, что применение PIR-плиты с максимальной температурой эксплуатации 120°C толщиной 50 мм, примыкающей к бетону, обеспечивает возможность повышения температуры воды в сезонном подземном ТА до 83°C без разрушения полистирола XPS (рис. 3).

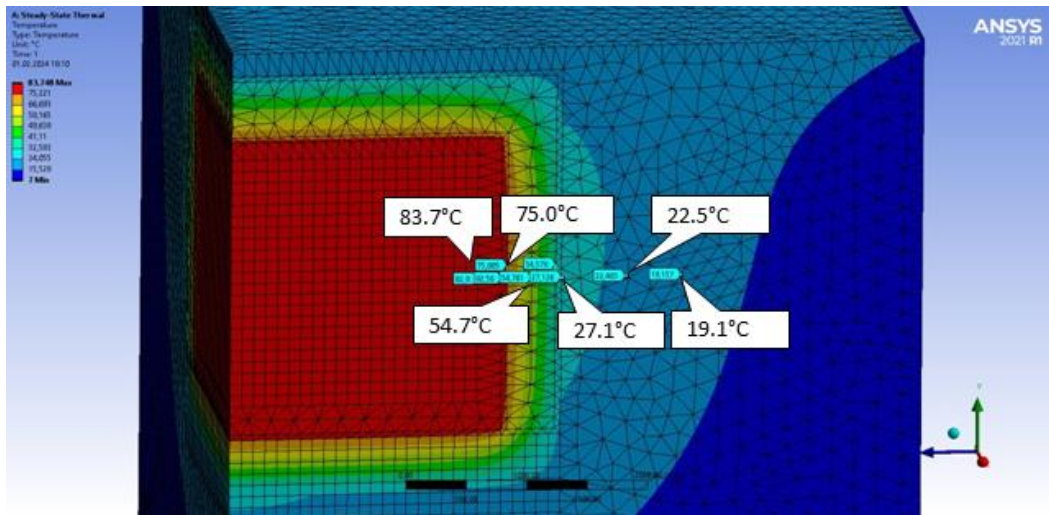


Рис. 3. Моделирование подземного теплового аккумулятора на расчетную температуру воды *Fig. 3. Modeling of TES for the calculated water temperature*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Система мониторинга и управления энергообеспечением здания

Система управления зданием (Building Management System) используется для автоматизации процессов в современных зданиях. В системах отопления, вентиляции и кондиционирования она позволяет экономить тепло и электроэнергию благодаря круглосуточному контролю параметров внутри помещений с учётом факторов, таких как присутствие людей, использование бытовой техники, освещения и инсоляции. В работах [18, 23] дается подробное объяснение системы мониторинга «ПолиТЭР» и управления «ZOND» здания.

В течение длительного периода времени в сезонном ТА проводился постоянный мониторинг различных параметров с последующим анализом.

На рисунке 4 представлена копия экрана программы мониторинга «ПолиТЭР» на 23 сентября 2024 года с фиксацией мгновенных значений температур воды в системе подземного ТА и наземных СК, температур внутри теплоизоляции над ТА и в боковой его части, а также температур грунта на различных расстояниях от ТА. Видно, что температура воды в ТА достигла уровня 75,6°C.

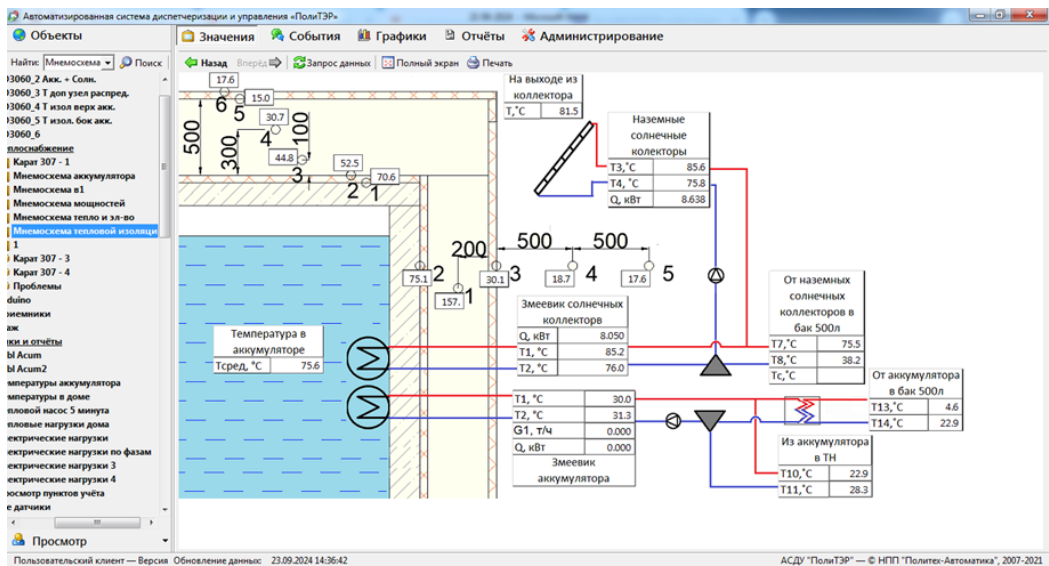


Рис. 4. Мониторинг параметров подземного ТА в программе ПолиТЭР *Fig. 4. Monitoring of TES parameters in the PolyTER program*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Результаты эксперимента (Results)

Метеостанция MISOL WS-2310-1 расположена на крыше исследуемого дома, а метеоданные, непрерывно измеряемые в течение трех лет, представлены на рисунке 5. В работе [23] описаны результаты измерений метеостанции.

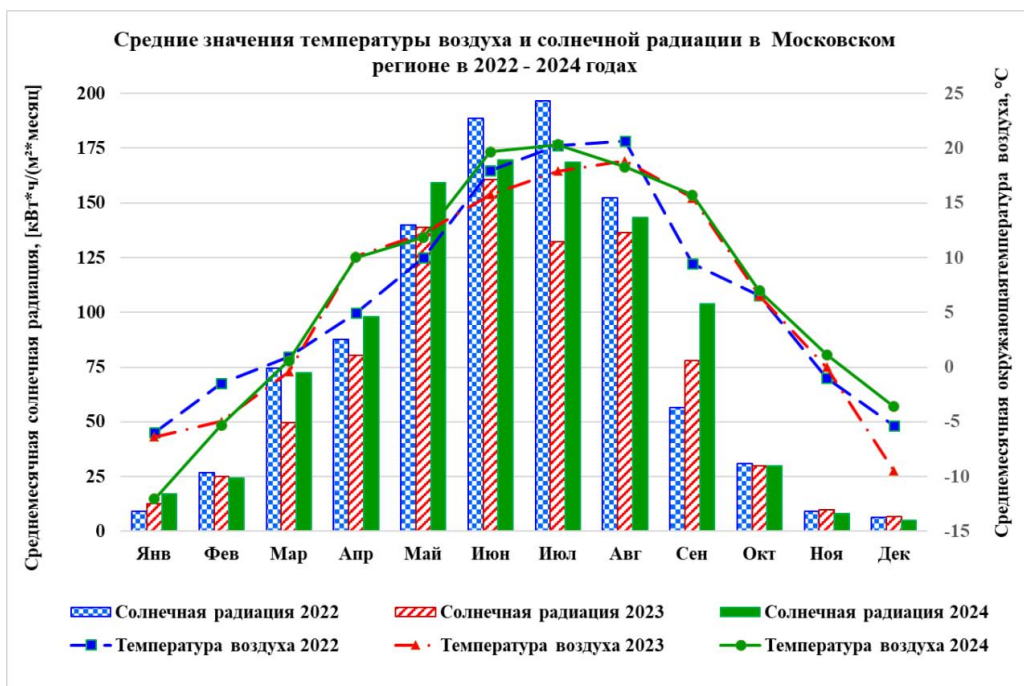


Рис. 5. График солнечной радиации и наружной радиации Fig. 5. Graph of solar radiation and outdoor radiation

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

На графике (рис. 6) представлены сравнительные данные о температуре внутри подземного теплового аккумулятора. Расчеты, проведенные с помощью программного обеспечения TRNSYS показали, что максимальная температура воды в подземном ТА в 2022 году составляла 72°C [18]. В 2022 году (пунктирная линия) в тестовом режиме было залито 27 м³ воды. В этот период максимальная температура составляла 73°C.

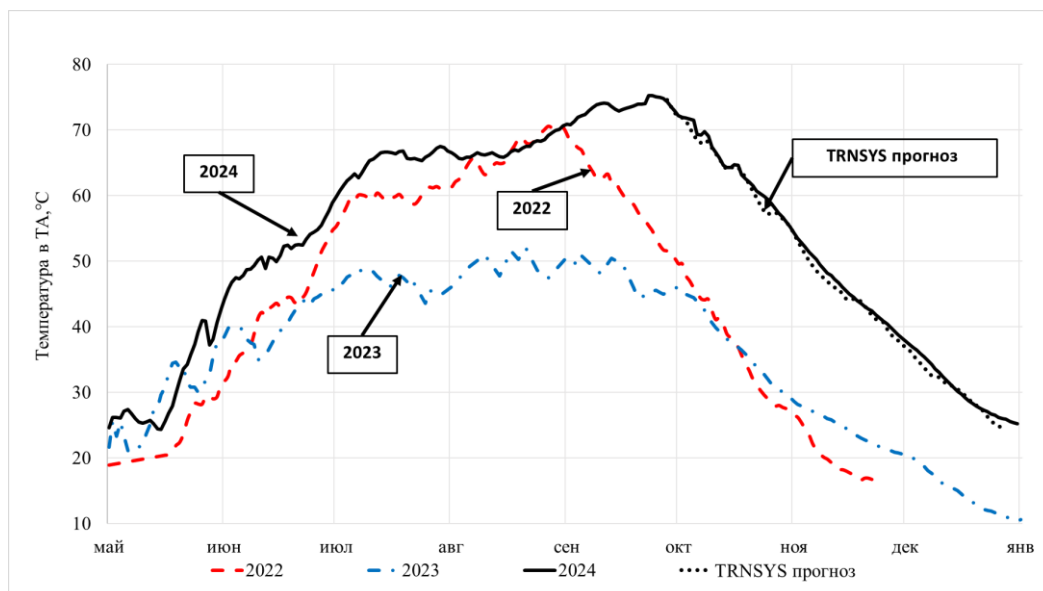


Рис. 6. Сравнение температуры в сезонном подземном тепловом аккумуляторе 2022-2024 Fig. 6. Comparison temperature in TES 2022-2024

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

В конце 2022 года были обнаружены утечки воды из-за недостаточной гидроизоляции. В апреле 2023 года была выполнена гидроизоляция с использованием Репреcrete и мастики Task-R. После этого в подземный теплоаккумулятор было залито 35 м³ воды. В течение 2023 года максимальная температура достигла лишь 52°C, что связано с продолжительным ремонтом теплоаккумулятора. Для расчёта температуры в аккумуляторе в программе TRNSYS были использованы данные о выработке тепловой энергии на СК из системы мониторинга, а также информация о тепловых нагрузках за

2021 год, что позволило смоделировать тепловую нагрузку и вычислить количество энергии, потребляемой для отопления дома напрямую из ТА.

В мае 2024 года было дополнительно установлено шесть СК Яsolar, объём воды был увеличен до 37 м³ в ТА. До середины июля температура в ёмкости росла и достигла 65°C, а к концу сентября достигла максимальной температуры 75.6°C (рис. 6). Расчеты в программе TRNSYS показали, что прогноз значений температуры воды в ТА составит 25°C к 25 декабря 2024 года, что обеспечит отопление дома от подземного ТА до этой даты без использования теплового насоса. Расчеты в TRNSYS проводились на основе фактических данных, полученных в системе мониторинга «ПолиТЭР» к концу сентября 2024 года. Моделирование осуществлялось с 1 октября до конца 2024 года с учетом прогнозной тепловой нагрузки дома, полученной усреднением данных 2020 и 2021 годов, когда не было подземного ТА (рис. 6). При сравнении графиков смоделированной температуры и реальных показателей разница составила в среднем 0,7°C. В 2024 году благодаря большей температуре в сезонном тепловом аккумуляторе, он смог использоваться в качестве источника тепла до 24 декабря, сократив использование ТН для отопления.

На рисунке 7 и в таблице 2 показано потребление различных видов энергии на отопление и ГВС с 2022 по 2024 год. Тепловая энергия, полученная от солнца для зарядки ТА в 2024 году, составила 11215 кВт·ч, в 2023 году – 6633 кВт·ч, а в 2022 году – 5900 кВт·ч.

Разница обусловлена тем, что в сентябре 2023 года потребление солнечной энергии на зарядку сезонного ТА было существенно выше вследствие повышенных значений солнечной радиации в данный период (рис. 5). В то же время рост выработки тепловой энергии в 2024 году объясняется увеличением числа солнечных коллекторов.

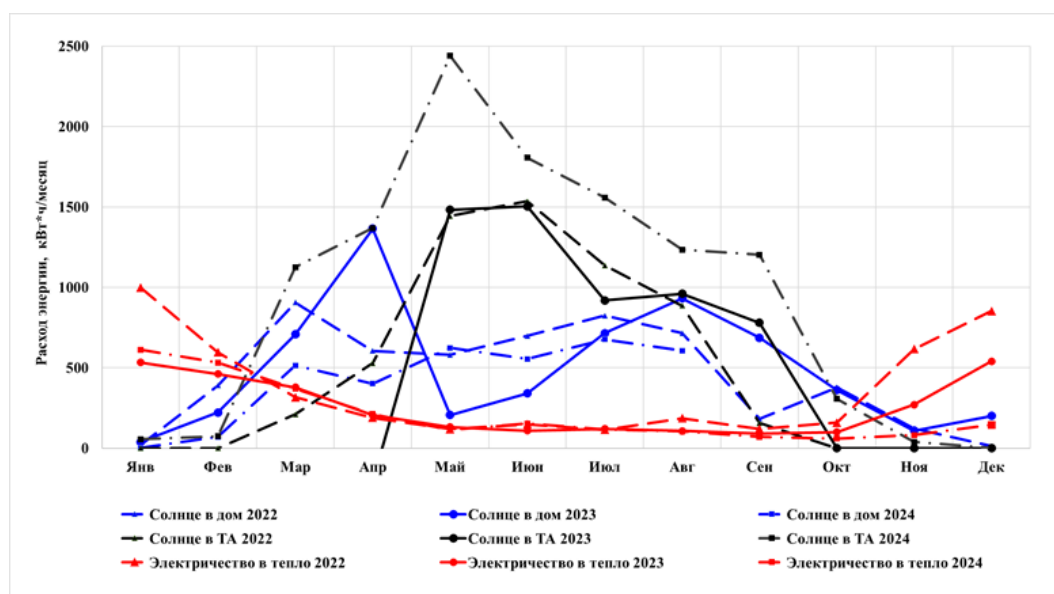


Рис. 7. Потребление электроэнергии на отопление и использование солнечной энергии для сезонного подземного теплового аккумулятора и жилого дома

Fig. 7. Electricity consumption for heating and solar energy use for the UTES and building

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

В результате установки дополнительных шести солнечных коллекторов в мае 2024 года накопленная в ТА солнечная энергия достигла 2440 кВт, что больше на 1000 кВт по сравнению с 2022 и 2023 годами.

В 2023 году дом получил 4477 кВт·ч солнечного тепла, что меньше значения 2022 года (5436 кВт·ч). Снижение объясняется тем, что в начале 2022 года солнечная энергия подавалась напрямую на отопление, тогда как в 2023 году – преимущественно на сушку теплоаккумулятора. В 2024 году объём солнечного тепла, поступающего в дом, ещё больше уменьшился из-за перераспределения тепловых потоков в пользу подземного аккумулятора. При этом накопленная солнечная энергия использовалась для отопления дома в октябре-ноябре 2022 года и в октябре–декабре 2023 и 2024 годов. Как видно из рисунка 7 и таблицы 2, использование электрической энергии для системы отопления дома в осенний период снизилось на 31% с 4420 кВт·ч в 2022 году до 3050 кВт·ч в 2023

году, и еще на 42% до 2568 кВт·ч в 2024 году.

Это связано с более эффективным использованием СК совместно с ТА и большей запасенной энергией. Потребление электроэнергии на ТН, электрический нагреватель и насосную группу, обслуживающую ТА, снизилось до 3050 кВт·ч в 2023 году с 5840 кВт·ч в 2021 году, что представляет собой сокращение на 48%. В осенний отопительный период 2024 года было потрачено всего 357 кВт·ч электрической энергии, что на 64% меньше, чем 1005 кВт·ч в 2023 году. Такое сокращение связано с тем, что подземный ТА повышает эффективность системы в осенне-зимний период.

В величину общего потребления электроэнергии входят расход электроэнергии на инженерные системы и бытовые нужды [21]. Инженерные системы включают в себя тепловые насосы, подогреватели, оборудование тепловых аккумуляторов, устройства для зарядки электромобилей. Двухнаправленный счётчик измеряет как потребление электроэнергии из сети, так и передачу лишней электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрическими панелями, обратно в сеть.

Таблица 2

Table 2

Потребление электроэнергии на отопление и солнечной энергии в ТА и в доме, кВт·ч

Electricity consumption for heating and solar energy to TES and to Home

Месяц	Солнце в дом			Солнце в ТА			Электроэнергия на отопление		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024
Янв	18	10	2	0	22	56	999	533	611
Фев	389	78	70	0	67	74	596	461	531
Мар	906	266	514	211	310	1126	317	378	369
Апр	605	572	401	529	587	1369	189	206	211
Май	581	206	623	1444	1483	2440	119	131	113
Июн	699	341	555	1536	1504	1807	149	109	153
Июл	824	716	677	1137	920	1559	115	120	117
Авг	716	932	607	887	960	1234	186	108	105
Сен	184	687	542	156	780	1203	120	92	70
Окт	378	361	283	0	0	306	160	101	60
Ноя	122	108	359	0	0	39	617	270	82
Дек	14	201	323	0	0	2	853	540	145
Год	5436	4477	4955	5900	6633	11215	4420	3050	2568

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

В 2021 году, до внедрения ТА, расход электроэнергии на ТН составил 4200 кВт·ч, а на электрический бойлер – 850 кВт·ч. При исключении из расчётов теплоступлений от солнечных коллекторов на крыше, составляющих в среднем 2370 кВт·ч, аналогичный объём тепловой энергии может быть выработан тепловым насосом с коэффициентом трансформации 3. В этом случае тепловой насос дополнительно потребит 790 кВт·ч электрической энергии. Таким образом, при невозможности применения возобновляемых источников энергии для целей отопления потребуется приобрести 5840 кВт·ч электроэнергии (4200 + 850 + 790). Следовательно, затраты на электроэнергию возрастут на 3272 кВт·ч по сравнению с вариантом использования солнечных коллекторов и теплоаккумулятора.

Установка и эксплуатация сезонного подземного теплоаккумулятора (ТА) объёмом 37 м³ совместно с 12 наземными солнечными коллекторами (СК) рассматриваются как один из этапов на пути к достижению углеродной нейтральности здания. В рамках реализации концепции нулевого углеродного следа дополнительно на крыше были установлены 4 плоских солнечных коллектора и 30 фотоэлектрических панелей общей электрической мощностью 11,9 кВт (рис. 8), включая 10 модулей Delta BST-360, 10 модулей Delta BST-380 и 10 модулей Delta BST-450. Кроме того, был смонтирован навес с 32 фотоэлектрическими панелями Delta BST-320 электрической мощностью 10,24 кВт, оснащённый зарядной станцией для электромобиля Volkswagen ID.4. На его зарядку, при пробеге 6,0 тыс. км в период с июня по декабрь 2023 года, было израсходовано 1,3 МВт·ч солнечной электроэнергии [22].

Согласно данным системы мониторинга «ПолиТЭР», в 2023 году потребление электроэнергии домом составило 8,7 МВт·ч, при этом генерация солнечной

электростанции достигла 17,4 МВт·ч. Из внешней сети было получено 7,9 МВт·ч, тогда как в сеть было передано 15,0 МВт·ч. В результате проведенного в 2023 году эксперимента установлено, что объём сэкономленной электроэнергии по сравнению с типовым домом, возведённым в соответствии с действующими нормативными требованиями к теплозащите, составил 35 МВт·ч. Таким образом, суммарное сокращение выбросов парниковых газов для данного дома оценивается примерно в 14,9 тонн CO₂ в год.

Полученные результаты подтверждают, что солнечная энергия может рассматриваться как основной источник теплового и электрического энергоснабжения жилого дома и электромобиля, обеспечивая комфортное проживание и удовлетворение транспортных потребностей населения при одновременном достижении нулевого углеродного следа в условиях холодного климата на протяжении большей части года [21, 22].



Рис. 8. Сезонный подземный тепловой аккумулятор с солнечными коллекторами (справа), солнечными панелями на навесе для электромобилей (слева) и на крыше (в центре)

Fig. 8. TES with solar collectors (right), PV solar panels on the EV carport (left) and on the roof (center)

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

Заключение (Conclusion)

В данном исследовании рассмотрены режимы работы сезонного подземного теплового аккумулятора для обеспечения отопления и ГВС в доме в период 2022-2024 годов. В 2024 году температура воды в ТА достигла максимального значения 75,6°C. Запасенная энергия использовалась для работы системы отопления до 20-ого декабря. Эксперимент подтвердил результаты моделирования. Значения, полученные в ходе эксперимента, свидетельствуют о высокой эффективности сезонного ТА и плоских солнечных коллекторов. На основании проведенных исследований, в мае 2024 года было установлено шесть дополнительных наземных солнечных коллекторов, что повысило эффективность работы системы и позволило увеличить период зимней эксплуатации оборудования без использования теплового насоса.

С помощью модуля Steady State Thermal программного обеспечения ANSYS было определено, что максимальная температура воды грунтового теплового аккумулятора не должна превышать 83,7°C, чтобы не разрушить теплоизоляционный материал полистирол XPS.

Потребление электрической энергии на отопление и горячее водоснабжение дома за счет использования теплового насоса и солнечных коллекторов снизилось с 4420 кВт·ч в 2022 году до 3050 кВт·ч в 2023 году, то есть на 31%, а в 2024 году снизилось до 2568 кВт·ч, то есть на 42% по сравнению с 2022 годом.

Расчеты в программе TRNSYS показали, что прогнозируемая температура воды в ТА составит 22°C к 20 декабря. Это позволит осуществлять отопление дома с использованием подземного ТА без необходимости включения теплового насоса до указанной даты. Полученные экспериментальные данные позволят уточнить математические модели, построенные в программе TRNSYS. Использование сезонного подземного ТА и наземных СК для отопления дома и ГВС вместе с солнечными панелями, электромобилем и электрической зарядкой позволило достичь нулевого углеродного следа.

Литература

1. Sultanguzin I.A., Kalyakin I.D., Govorin A.V., Khristenko B.A., Yavorovsky Y.V., “Optimization of the energy efficient active house”, in Digests of Conference 3. INGENIUERTAG 2016. Der Fakultat Maschinenbau, Electro- und Energiesysteme Gus- und Osteuropatag. neseff-netzwerktreffen 2016. pp. 8-12 November 2016.
2. Hill B., “Passive house development in Russia”, in the III World Summit Smart Energy Russia, March 2019, Moscow. 95 p.
3. Clarke J., Colclough S., Griffiths P., McLeskey Jr.J.T., A passive house with seasonal solar energy store: in situ data and numerical modelling // International Journal of Ambient Energy. 2014. Vol. 35. Pp. 37-50.
4. Carbonell D., Philippen D., Haller M.Y., Frank E. “Development and validation of mathematical model for ice storages with heat exchangers that can be de-iced”, ISES Solar World Congress. 2013. Pp. 2342 – 2352.
5. Султангузин И.А., Христенко Б.А., Чайкин В.Ю., Яцок Т.В., Кругликов Д.А., Яворовский Ю.В., Нечаев А.Н., Скоробатюк А.В. Сезонный аккумулятор теплоты и холода для системы энергоснабжения здания // Журнал СОК, № 3, 2021. С. 44 – 50.
6. Sultanguzin I., Alimgazin A., Chaikin V., Yatsyuk T., Nechaev A. and Skorobatyuk A., “Research and Development of Seasonal Heat and Ice Storage for Energy Supply System of Building”, AIP Conference Proceedings 2650, 030027 (2022); 22 November 2022.
7. Dolgun G. K., Keçebaş A., Ertürk M., and Daşdemir A. “Optimal insulation of underground spherical tanks for seasonal thermal energy storage applications”, Journal of Energy Storage, vol. 69, 1 October 2023, 107865.
8. Hua W., Xin Lv., Zhang X., Ji Zh., and Zhu J. “Research progress of seasonal thermal energy storage technology based on supercooled phase change materials”, Journal of Energy Storage, vol. 67, 1 September 2023, 107378.
9. Dahash A., Ochs F., Janetti M. B., and Streicher W. “Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems”, Applied Energy, vol. 239, 1, pp. 296-315, April 2019.
10. Mahon H., O'Connor D., Friedrich D., and Hughes B. “A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops”, Energy, vol. 239, Part C, 15 January 2022, 122207.
11. Luo Y., Cui D., Hu L., Ochs F., Tosatto A., Xu G., Tian Zh., Dahash A., Yu J., Yuan G., Chen Y., Wang D., Liu Y., and Fan J. “Semi-analytical modeling of large-scale water tank for seasonal thermal storage applications”, Energy and Buildings, vol. 278, 1 January 2023, 112620.
12. Xu G., Hu L., Luo Y., Tian Zh., Deng J., Yuan G., and Fan J. “Numerical modeling and parametric analysis of thermal performance for the large-scale seasonal thermal energy storage”, Energy and Buildings, vol. 275, 15 November 2022, 112459.
13. Beausoleil-Morrison I., Kemery B., Wills A. D., and Meister C. “Design and simulated performance of a solar-thermal system employing seasonal storage for providing the majority of space heating and domestic hot water heating needs to a single-family house in a cold climate”, Solar Energy, Volume 191, October 2019, pp. 57-69.
14. Xu B., Zhang T., Wang S., and Chen Zh. “Dynamic characteristics and energy efficiency evaluation of a novel solar seasonal thermal storage - heating system”, Appl. Therm. Eng., vol. 234, 5 November 2023, 121223.
15. Ma Z., Bao H., Roskilly A.P., “Feasibility study of seasonal solar thermal energy storage in domestic dwellings in the UK. Solar Energy”, vol. 162, 489–499. 2018.
16. C Meister C., and Beausoleil-Morrison I. “Experimental and modelled performance of a building-scale solar thermal system with seasonal storage water tank”, Solar Energy, vol. 222, pp. 145-159, 1 July 2021.
17. Чайкин В.Ю., Шайхеева А.Р., Султангузин И.А., Яворовский Ю.В., Скоробатюк А.В., Нечаев А.Н. Тепловая изоляция коммуникаций подземного аккумулятора теплоты // Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием «Энерго-сбережение - теория и практика». Москва, НИУ «МЭИ», 10 – 14 октября 2022 г., М.: ООО Центр полиграфических услуг «Радуга», 2022. – С. 52-56.
18. Chaikin V.Y., Tsetsgee Ts., Dakkah B. Bo., Sultanguzin I.A., Yavorovsky Yu.V., Nechaev A.N.. “Annual cycle of a seasonal heat accumulator of thermal energy of an energy-efficient house”, Pro-ceedings of the 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022, Moscow, March 16-18, 2023. 5 p.
19. Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J. “A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems”, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 109, pp. 71 – 84, 2019.

20. Pintanel M.T., Martínez-Gracia A., Uche J., del Amo A., Bayod-Rújula Á.A., Usón S., and Arauzo I. “Energy and environmental benefits of an integrated solar photovoltaic and thermal hybrid, seasonal storage and heat pump system for social housing”, Appl. Therm. Eng., vol. 213, August 2022, 118662.

21. Султангузин И.А., Говорин А.В., Яцюк Т.В., Калякин И.Д., Яворовский Ю.В., Чайкин В.Ю., Бу Дакка Б., Цэцгээ Ц. Достижение нулевого углеродного следа в единой системе «энергоэффективный дом – электромобиль». Часть 1. // Энергосбережение. - 2024. - № 5. –С. 16-22.

22. Султангузин И.А., Говорин А.В., Яцюк Т.В., Калякин И.Д., Яворовский Ю.В., Чайкин В.Ю., Бу Дакка Б., Цэцгээ Ц. Достижение нулевого углеродного следа в единой системе «энергоэффективный дом – электромобиль». Часть 2. // Энергосбережение. - 2024. - № 6. –С. 54-58.

23. Султангузин И. А., Чайкин В. Ю., Яворовский Ю. В., Цэрэндорж Ц., Калякин И. Д., Говорин А. В., Скоробатюк А. В. Система солнечного электроснабжения дома с нулевым углеродным следом // Энергосбережение. – 2025. – № 2. – С. 12-29.

Авторы публикации

Султангузин Ильдар Айдарович – д-р техн. наук, профессор кафедры Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-6324-5214>. SultanguzinIA@mpei.ru

Чайкин Владислав Юрьевич – ассистент и аспирант кафедры Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1320-124>. vlad@imarh.ru

Цэрэндорж Цэцгээ – ассистент и аспирант кафедры Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0009-4827-7221>. tserendorzhT@mpei.ru

Яворовский Юрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5741-8385>. yavorovskyyv@yandex.ru

Говорин Александр Владимирович – советник генерального директора АО «САГА электроникс», г. Москва, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0001-0328-9466>. a.govorin@mail.ru

References

1. Sultanguzin I.A., Kalyakin I.D., Govorin A.V., Khristenko B.A., Yavorovsky Y.V., “Optimization of the energy efficient active house”, in Digests of Conference 3. INGENIUERTAG 2016. Der Fakultat Maschinenbau, Electro- und Energiesysteme Gus- und Osteuropatag. neseff-netzwerktreffen 2016. pp. 8-12, November 2016.

2. Hill B., “Passive house development in Russia”, in the III World Summit Smart Energy Russia, March 2019, Moscow. 95 p.

3. Clarke J., Colclough S., Griffiths P., McLeskey Jr.J.T., A passive house with seasonal solar energy store: in situ data and numerical modelling // International Journal of Ambient Energy. 2014. Vol. 35. Pp. 37-50.

4. Carbonell D., Philippen D., Haller M.Y., Frank E. “Development and validation of mathematical model for ice storages with heat exchangers that can be de-iced”, ISES Solar World Congress. 2013. Pp. 2342 – 2352.

5. Sultanguzin I.A., Khristenko B.A., Chaikin V.Yu., Yatsyuk T.V., Kruglikov D.A., Yavorovsky Yu.V., Nechaev A.N., Skorobatiuk A.V. Seasonal heat and cold accumulator for the energy supply system of a building // SOK Magazine, No. 3, 2021. pp. 44 – 50. (In Russ)

6. Sultanguzin I., Alimgazin A., Chaikin V., Yatsyuk T., Nechaev A. and Skorobatyuk A., “Research and Development of Seasonal Heat and Ice Storage for Energy Supply System of Building”, AIP Conference Proceedings 2650, 030027 (2022); 22 November 2022.

7. Dolgun G. K., Keçebaş A., Ertürk M., and Daşdemir A. “Optimal insulation of underground spherical tanks for seasonal thermal energy storage applications”, Journal of Energy Storage, vol. 69, 1 October 2023, 107865.

8. Hua W., Xin Lv., Zhang X., Ji Zh., and Zhu J. “Research progress of seasonal thermal energy storage technology based on supercooled phase change materials”, Journal of Energy Storage, vol. 67, 1 September 2023, 107378.

9. Dahash A., Ochs F., Janetti M. B., and Streicher W. “Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems”, *Applied Energy*, vol. 239, 1, pp. 296-315, April 2019.
10. Mahon H., O'Connor D., Friedrich D., and Hughes B. “A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops”, *Energy*, vol. 239, Part C, 15 January 2022, 122207.
11. Luo Y., Cui D., Hu L., Ochs F., Tosatto A., Xu G., Tian Zh., Dahash A., Yu J., Yuan G., Chen Y., Wang D., Liu Y., and Fan J. “Semi-analytical modeling of large-scale water tank for seasonal thermal storage applications”, *Energy and Buildings*, vol. 278, 1 January 2023, 112620.
12. Xu G., Hu L., Luo Y., Tian Zh., Deng J., Yuan G., and Fan J. “Numerical modeling and parametric analysis of thermal performance for the large-scale seasonal thermal energy storage”, *Energy and Buildings*, vol. 275, 15 November 2022, 112459.
13. Beausoleil-Morrison I., Kemery B., Wills A. D., and Meister C. “Design and simulated performance of a solar-thermal system employing seasonal storage for providing the majority of space heating and domestic hot water heating needs to a single-family house in a cold climate”, *Solar Energy*, Volume 191, October 2019, pp. 57-69.
14. Xu B., Zhang T., Wang S., and Chen Zh. “Dynamic characteristics and energy efficiency evaluation of a novel solar seasonal thermal storage - heating system”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 234, 5 November 2023, 121223.
15. Ma Z., Bao H., Roskilly A.P., “Feasibility study of seasonal solar thermal energy storage in domestic dwellings in the UK. *Solar Energy*”, vol. 162, 489–499. 2018.
16. Meister C., and Beausoleil-Morrison I. “Experimental and modelled performance of a building-scale solar thermal system with seasonal storage water tank”, *Solar Energy*, vol. 222, pp. 145-159, 1 July 2021.
17. Chaikin V.Yu., Shaikheeva A.R., Sultanguzin I.A., Yavorovsky Yu.V., Skorobatiuk A.V., Nechaev A.N. Thermal insulation of communications of an underground heat accumulator // Proceedings of the Eleventh All-Russian Conference with International Participation “Energy Saving - Theory and Practice”. Moscow, National Research University "MPEI", October 10 - 14, 2022, M.: LLC Center for Printing Services "Raduga", 2022. - P. 52-56. (In Russ)
18. Chaikin V.Y., Tssetsgee Ts., Dakkah B. Bo, Sultanguzin I.A., Yavorovsky Yu.V., Nechaev A.N. “Annual cycle of a seasonal heat accumulator of thermal energy of an energy-efficient house”, Pro-ceedings of the 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022, Moscow, March 16-18, 2023. 5 p.
19. Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J. “A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 109, pp. 71 – 84, 2019.
20. Pintanel M.T., Martínez-Gracia A., Uche J., del Amo A., Bayod-Rújula Á.A., Usón S., and Arauzo I. “Energy and environmental benefits of an integrated solar photovoltaic and thermal hybrid, seasonal storage and heat pump system for social housing”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 213, August 2022, 118662.
21. Sultanguzin I.A., Govorin A.V., Yatsyuk T.V., Kalyakin I.D., Yavorovsky Yu.V., Chaikin V.Yu., Bu Dakka B., Tssetsgee Ts. Achieving a net-zero carbon in a single system “energy efficient house – electric vehicle”. Part 1. // Energy saving. - 2024. - No. 5. – P. 16-22. (In Russ)
22. Sultanguzin I.A., Govorin A.V., Yatsyuk T.V., Kalyakin I.D., Yavorovsky Yu.V., Chaikin V.Yu., Bu Dakka B., Tssetsgee Ts. Achieving a net-zero carbon in a single system “energy efficient house – electric vehicle”. Part 2. // Energy saving. - 2024. - No. 6. – P. 54-58. (In Russ)
23. Sultanguzin I. A., Chaikin V. Yu., Yavorovsky Yu. V., Tserendorj Ts., Kalyakin I. D., Govorin A. V., Skorobatyuk A. V. Solar power supply system for a house with net-zero carbon // Energy Saving. - 2025. - No. 2. - 12-29 P. (In Russ)

Authors of the publication

Ildar A. Sultanguzin – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-6324-5214>. SultanguzinIA@mpei.ru

Vladislav Y. Chaikin – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-1320-124>. vlad@imarh.ru

Tssetsgee Tserendorj – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0009-4827-7221>. tserendorzhT@mpei.ru

Yury V. Yavorovsky – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,

© Султангузин И.А., Чайкин В.Ю., Цэрэндорж Ц., Яворовский Ю.В., Говорин А.В.

Moscow, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5741-8385>. yavorovskyyv@yandex.ru

Aleksandr V. Govorin – SAGA Electronics JSC, Moscow, Russia. ORCID*:
<https://orcid.org/0009-0001-0328-9466>. a.govorin@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **01.12.2025 г.**

Отредактировано **24.12.2025 г.**

Принято **12.01.2026 г.**



ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХОРДАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ С ВИХРЕВЫМ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

Шайхутдинов Я.О., Павлов Г.И., Халиулин Р.Р., Теляшов Д.А., Тихонов О.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н. Туполева–КАИ, г. Казань, Россия
jara2105@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Основным элементом блочных горелок является сопловой блок, от которого зависит эффективность и надежность работы горелочного устройства. Большая часть серийно выпускаемых сопловых блоков имеет в своей конструкции диск с закручивающими лопатками для турбулизации потока, однако такие диски создают значительное газодинамическое сопротивление. *ЦЕЛЬ.* Исследование влияния углов подачи горючего газа (угол к оси β и угол хорды α) на распределение газа по сечениям цилиндра, степень закрутки потока и степень разрежения с принудительной подачей воздуха осевым вентилятором без использования закручивающих дисков. *МЕТОДЫ.* Исследования проводились численным методом для изотермических струй и потока в программном комплексе ANSYS Fluent с использованием модели турбулентности SST $k-\omega$. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Установлено, что минимальный коэффициент вариации для всех рассмотренных конфигураций обеспечивается при вихревом числе порядка $S=0,4-0,5$. Степень разрежения зависит от комбинации углов β и α , максимальное разрежение было достигнуто при $\beta = 90^\circ/\alpha = 15^\circ$. Скорость крутки зависит как от вихревого числа S , так и от комбинации углов β и α , причем для каждого угла β существует собственный диапазон изменения S для поддержания максимальной скорости крутки. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Найдена конфигурация ($\beta = 90^\circ/\alpha = 26^\circ$) для достижения компромисса между высокой степенью крутки ($S=0,58-0,48$), протяженной зоной разрежения (с пиковой точкой -433 Па) и равномерным распределением газа в сечениях соплового блока: коэффициент вариации изменялся в пределах от 41% (1 калибр от точки ввода) до 13% (выходное сечение) Результаты работы имеют практическую ценность для проектирования горелочных устройств и проведения дальнейших расчетов с использованием модели горения.

Ключевые слова: CFD-моделирование; хордальные струи; сопловой блок; осевой вентилятор.

Для цитирования: Шайхутдинов Я.О., Павлов Г.И., Халиулин Р.Р., Теляшов Д.А., Тихонов О.А. Исследование газодинамических процессов взаимодействия хордальных газовых струй с вихревым воздушным потоком // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 156-167. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-156-167.

STUDY OF GAS-DYNAMIC PROCESSES OF INTERACTION OF CHORDAL GAS JETS WITH A VORTEX AIR FLOW

Shaikhutdinov Y.O., Pavlov G.I., Khaliulin R.R., Telyashov D.A., Tikhonov O.A.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan,
Russia
jara2105@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The nozzle block is the important element of block burners, determining the efficiency and reliability of the burners. Most commercially available nozzle blocks incorporate a disk with swirl vanes to generate flow turbulence; however, such disks create significant gas-dynamic drag. *THE PURPOSE.* To study the influence of combustible gas feed angles (angle to the axis β and chord angle α) on gas distribution across the cylinder

cross-sections, the degree of flow swirl, and the degree of vacuum using forced air supply by an axial fan without the use of swirl disks. METHODS. The study was performed numerically for isothermal jets and flow in the ANSYS Fluent software package using the SST $k-\omega$ turbulence model. RESULTS. The minimum variation coefficient for all considered configurations was found to be achieved at a swirl number of about $S=0.4-0.5$. Vacuum pressure depends on the combination of angles β and α , the maximum was achieved at $\beta = 90^\circ/\alpha = 15^\circ$. The swirl rate depends on both the swirl number S and the combination of angles β and α , with each angle β having its own range of S variation to maintain the maximum swirl rate. CONCLUSION. A configuration ($\beta = 90^\circ/\alpha = 26^\circ$) was found to achieve a compromise between a high swirl ($S=0.58-0.48$), an extended low-pressure zone (with a peak point of -433 Pa) and uniform gas distribution in the sections of the nozzle block: variation coefficient varied within the range from 41% (1 caliber from the inlet section) to 13% (outlet section). The results of the work are of practical value for the design of burner devices and further calculations using the combustion model.

Keywords: CFD modeling; chordal jets; nozzle block; axial fan.

For citation: Shaikhutdinov Y.O., Pavlov G.I., Khaliulin R.R., Telyashov D.A., Tikhonov O.A. Study of gas-dynamic processes of interaction of chordal gas jets with a vortex air flow. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (1): 156-167. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-156-167.

Введение (Introduction)

Вихревые методы сжигания топлива привлекают внимание благодаря способности обеспечивать стабильное горение с низкими выбросами [1]. Закрутка потока (подача воздушного потока с тангенциальной составляющей скорости) создает в камере сгорания центральную рециркуляционную зону, которая стабилизирует пламя. Это повышает полноту сгорания топлива и устойчивость пламени, позволяя эффективно сжигать даже низкокалорийные и бедные газозвоздушные смеси. В камерах сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) применение вихревых стабилизаторов уже давно стало стандартом для предварительного перемешивания топлива с воздухом и стабилизации диффузионного пламени. Евдокимов О.А. в своей работе [2] отмечает, что формирование вихревой структуры течения (например, противоточной вихревой зоны) ведёт к высокой устойчивости горения, экологичности и топливной гибкости системы. Таким образом, вихревое сжигание рассматривается как перспективная технология для камер сгорания и горелочных устройств, отвечающая современным требованиям по снижению оксидов азота (NO_x) и углерода (CO) при одновременном расширении диапазона устойчивой работы.

Вихревое число S (безразмерный параметр, характеризующий отношение тангенциального вращения к осевому потоку) является определяющим для структуры вихревого течения. При достижении критического значения S в потоке образуется центральная рециркуляционная зона (ЦРЗ). Экспериментально и численно показано, что порог возникновения обратного течения зависит не только от величины S , но и от распределения осевой скорости и числа Рейнольдса: более высокие осевые скорости могут задерживать появление вихревого распада при том же S . Большинству горелочных устройств достаточно средней интенсивности закрутки, чтобы сформировалась устойчивая приосевая рециркуляционная зона. Так, при $S = 0,6-0,7$ наблюдается завершающая стадия распада вихря с образованием единой ЦРЗ [3].

Центральная рециркуляционная зона действует как ядро стабилизации пламени, возвращая горячие газы обратно для поддержания горения. Помимо нее, в вихревых течениях могут возникать и внешние (пристенные) рециркуляционные области: например, в промышленных горелках с вихревым дутьем формируется одна центральная и две кольцевых зоны рециркуляции у головки горелки. За счет этого вихревые горелки обеспечивают быстрый розжиг, устойчивое горение и высокую степень выгорания топлива. Увеличение закрутки потока обычно интенсифицирует турбулентность и улучшает перемешивание топлива с окислителем, однако чрезмерно большое вихревое число может приводить к негативным явлениям. Так, при крайне сильной закрутке возможно прилипание потока к стенкам камеры и появление нескольких коаксиальных зон обратного течения вместо одной [4]. Кроме того, отмечены случаи, когда чрезмерное увеличение S вызывает эффект, при котором пламя начинает двигаться против потока в

сторону форсунки [5]. На практике, в лабораторных горелках малой мощности обычно применяют лопаточные завихрители, создающие $S \sim 0,5-1,0$, что дает короткое ярко выраженное ядро горения и минимизирует выбросы NO_x за счет интенсивной внутренней рециркуляции.

В вихревых потоках качественное перемешивание достигается благодаря интенсивным турбулентным пульсациям и вторичным вихрям. Так, в исследовании [6] с помощью метода крупных вихрей [7] анализировались показатели перемешивания метано-водородной смеси при различных числах закрутки. Установлено, что увеличение S (от 0,3 до 0,7) в нереагирующем закрученном потоке приводит к росту степени перемешанности – уменьшается объем области стехиометрической смеси и снижается интенсивность сегрегации топлива и окислителя. Другими словами, более сильная закрутка дробит крупномасштабные структуры потока, способствуя лучшей однородности смеси.

Зарубежными авторами проводится большое количество исследований, связанных с изучением влияния вихревого числа, геометрических параметров горелок и других характеристик потока на интенсивность тепло- и массообмена в различных экспериментальных установках. Еще одной значимой работой является исследование, в котором проводились эксперименты с различными значениями вихревого числа в миниатюрной горелке. Установлено, что при больших значениях S (порядка 0,6-0,7) устойчивость пламени ухудшается по сравнению с $S=0,5$ [8].

Исследование в работе [9] направлено преимущественно на изучение влияния геометрических параметров горелки и подбор оптимального угла установки вихревых пластин для уменьшения выбросов NO_x . Похожее исследование проводились авторами [10], которые моделировали работу промышленной горелки с обратным диффузионным пламенем. В рамках данной работы было определено оптимальное количество форсунок и их угол наклона относительно оси для улучшения условий горения и снижения выбросов NO_x .

Одним из важных направлений совершенствования вихревых горелок является подбор углов ввода топлива в закрученный воздушный поток для достижения необходимых параметров. Традиционно применяются две схемы: аксиальный впрыск (топливо подается вдоль оси потока) и тангенциальный (по касательной к окружности). Хордальная подача представляет собой промежуточный вариант: газовые струи вводятся под углом к оси и под углом к радиусу, то есть по хордам окружности соплового блока. Геометрически такая подача характеризуется двумя углами – углом к оси β и углом хорды α (угол между радиусом и направлением сопла) [11]. Изменение этих углов существенно влияет на характер течения: струи одновременно должны проникать к центру вихря, но при этом способствовать закрутке. При различных комбинациях β и α можно добиться значительной закрутки потока, получить эффект эжекции и обеспечить равномерное распределение газа в сопловом блоке.

Результаты исследования [11] также свидетельствуют о том, что использование хордальной подачи газовых струй способствует надежному воспламенению горюче-воздушной смеси и высокой стабилизации факела пламени при работе горелки. При этом такая подача позволяет снизить гидравлическое сопротивление при сохранении турбулентных характеристик потока. Вследствие этого, появляется возможность замены центробежного вентилятора на осевой, который отличается существенно меньшим энергопотреблением.

Однако на данный момент в открытом доступе крайне мало информации, касающейся исследования взаимодействия хордальных струй с закрученным воздушным потоком.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для исследования газодинамических процессов взаимодействия хордальных газовых струй с вихревым воздушным потоком была создана математическая модель камеры смешения с четырьмя соплами. Изменяемыми параметрами являлись углы наклона осей струй к оси камеры β и углы хорд α . Вихревой воздушный поток создавался центробежным осевым вентилятором *SHUFT CFs 160S*.

Численное моделирование проводилось в программном комплексе *ANSYS Fluent* [12]. Предварительная 3D-модель вентилятора и соплового блока была смоделирована в системе автоматизированного проектирования «КОМПАС-3D». Длина соплового блока принята в размере 5 калибров, подвод газа осуществлялся на расстоянии 1 калибра от выходного сечения корпуса вентилятора. Полученная модель представлена на рисунке 1.

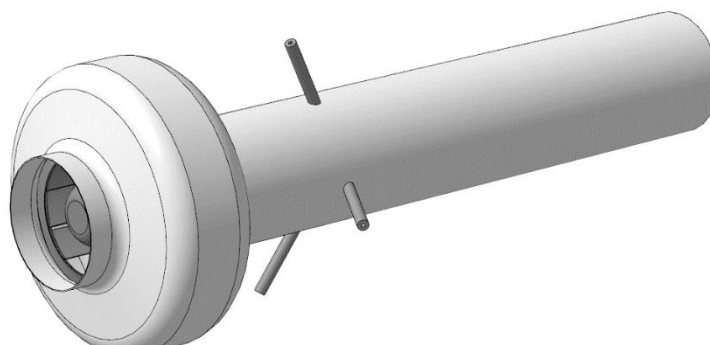


Рис. 1. 3D-модель соплового блока с осевым вентилятором *Fig. 1. 3D model of a nozzle block with an axial fan*

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

Для моделирования использовалась гексаэдрическая сетка со ступенчатым изменением размера ячеек, минимальный размер в 0,5 мм принят на патрубках ввода газа. В результате моделирования сетки общее количество элементов составило порядка 1,9-2 млн. В общей сложности расчет проходил в 8000-9000 итераций для каждого варианта до момента достижения устойчивого состояния системы, при котором изменение тангенциальной скорости в сечениях отличалось менее чем на 1-3% каждые 100 итераций в течение последних 500 итераций. Для расчетов была выбрана модель $k-\omega$ SST. Эта модель сочетает точность $k-\omega$ у стенки и устойчивость $k-\epsilon$ во внешнем потоке, что делает её оптимальной для задач с развитой рециркуляцией [13].

В качестве граничных условий на входе вентилятора (*inlet1*) приняты его паспортные характеристики: массовый расход воздуха (*Mass-Flow inlet*) 0,281 кг/с (при 300 К). Вокруг лопастей вентилятора сформирована зона *Multiple Reference Frame (MRF)*, скорость вращения лопастей – 2500 об/мин. Массовый расход газа (пропана) через сопла (*inlet2*) принят в размере 0,017 кг/с (*Mass-Flow inlet*), который соответствовал стехиометрическому соотношению. Подавался газ среднего давления порядка 17 кПа (изб.). В выходном сечении (*outlet*) задано атмосферное давление (*pressure-outlet*). Для каждой комбинации углов β и α были приняты идентичные условия расчета.

Достоверность используемой модели была доказана путем сравнения полученных результатов с замераами на экспериментальном стенде. В работе [14] представлено подробное описание стенда и результаты сравнения.

Расчеты проводились с разными углами подачи газа как к оси соплового блока, так и к радиусу – углами между радиусом (проведённым из центра в точку касания – точку присоединения патрубков газа) и хордами (так называемой угол хорды). Таким образом были сформированы следующие варианты задач:

- угол к оси соплового блока составлял: 60, 75, 90°;
- для каждого из приведенных углов задавался угол хорды: 0, 15, 26, 30, 45°.

Предельные значения углов наклона 60° (к оси соплового блока) и 45° (к радиусу камеры смещения) задавались на основе априорной информации, полученной в ходе предварительных исследований. Замечено, что при углах, отличных от указанных значений ($\beta < 60^\circ$ и $\alpha > 45^\circ$), газ при истечении в вихревой воздушный поток «прижимается» к внутренней стенке и практически не проникает в центр.

Схема расположения газовых сопел в камере смещения приведена на рисунках 2-3.

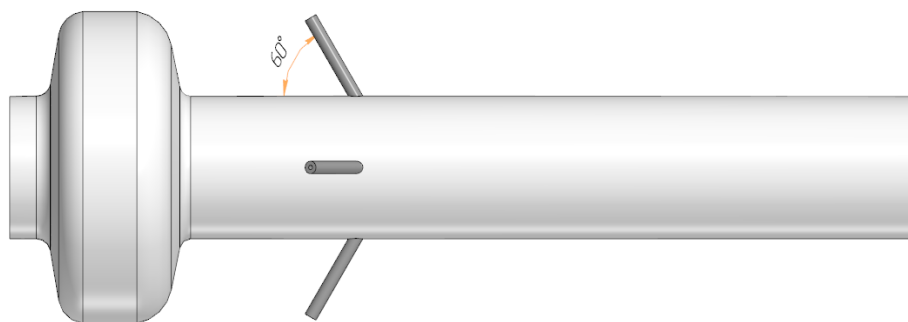


Рис. 2. Угол к оси

Fig. 2. Angle to the axis

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

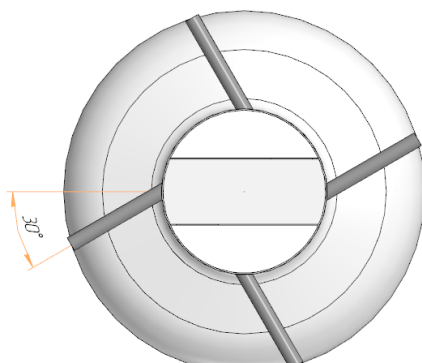


Рис. 3. Угол хорды

Fig. 3. Chord angle

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

По результатам расчета анализировались следующие параметры:

1) Равномерность распределения газа в сопловом блоке на расстоянии 1-4 калибров от точки ввода, где расстояние в 4 калибра – выходное сечение. Для оценки данного параметра использовался коэффициент вариации, измеряемый чаще всего в процентных долях и зависящий от стандартного отклонения и среднего значения массовой доли пропана в каждом рассматриваемом сечении:

$$CV = \frac{\sigma}{M_{cp}} \cdot 100\%,$$

где σ – стандартное отклонение массовой доли пропана в каждом сечении;

M_{cp} – средняя массово-взвешенная доля пропана в каждом сечении.

Чем ближе CV к нулевому значению, тем равномернее распределен газ по сечению. Данный показатель являлся приоритетным в рамках текущего исследования.

2) Интенсивность закрутки газозвдушного потока оценивалась по безразмерному вихревому числу:

$$S = \frac{\int_0^R wu r dr}{R \int_0^R uu r dr},$$

где w, u – тангенциальная и осевая скорость, соответственно, м/с;

r – расстояние от оси, м;

R – радиус канала, м.

3) Разрежение в камере смешения оценивалось по величине статического давления в приосевой зоне камеры в районе 0,5-1 калибра от точки ввода газа.

4) Глубина проникновения хордальных газовых струй в воздушный поток оценивалась по массовой доле газа на оси соплового блока в каждом сечении.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

В качестве примера рассмотрим подробно результаты расчета, полученные для угла $\beta=60^\circ$. Дисбаланс массового расхода на входе/выходе в камеру смешения варьировался от $4,1 \cdot 10^{-5}$ до $9,7 \cdot 10^{-5}$ кг/с, что соответствует 0,014-0,032% от суммарного массового расхода на входе (0,298 кг/с).

Таблица 1

Table 1

Значение тангенциальной скорости при угле наклона оси хордальной струи к оси камеры смешения 60°

The value of the tangential velocity at an angle of inclination of the chordal jet axis to the mixing chamber axis of 60°

Угол хорды	Тангенциальная скорость, м/с, калибров от точки ввода газа				Увеличение скорости в выходном сечении, %
	1	2	3	4	
0°	7,56	7,09	6,34	5,81	–
15°	9,42	8,65	8,06	7,32	25,97
26°	10,67	9,79	9,23	8,23	12,47
30°	11,10	10,42	9,67	8,60	4,53
45°	11,31	10,61	10,01	8,85	2,89

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

Таблица 2

Table 2

Значение вихревого числа при угле наклона оси хордальной струи к оси камеры смешения 60°
 The value of the swirl number at an angle of inclination of the chordal jet axis to the mixing chamber axis of 60°

Угол хорды	Вихревое число, калибров от точки ввода газа			
	1	2	3	4
0°	0,34	0,35	0,33	0,32
15°	0,48	0,45	0,43	0,41
26°	0,60	0,54	0,51	0,47
30°	0,62	0,58	0,53	0,49
45°	0,67	0,61	0,56	0,51

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

Таблица 3

Table 3

Значение коэффициента вариации и давления разрежения в зоне подвода газа при угле наклона оси хордальной струи к оси камеры смешения 60°

The value of the coefficient of variation and the vacuum pressure in the gas supply zone at an angle of inclination of the chordal jet axis to the mixing chamber axis of 60°

Угол хорды	Коэффициент вариации CV, %, калибров от точки ввода газа				Статическое давление в зоне подвода газа, Па
	1	2	3	4	
0°	57,51	25,98	17,04	12,17	-118,11
15°	44,54	25,59	16,58	11,60	-157,09
26°	63,61	40,69	27,08	20,07	-171,69
30°	67,00	44,14	30,01	22,83	-126,18
45°	81,05	58,46	41,58	30,79	-96,92

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

Изменение вихревого числа S вдоль оси соплового блока в графическом виде и показано на рисунке 4.

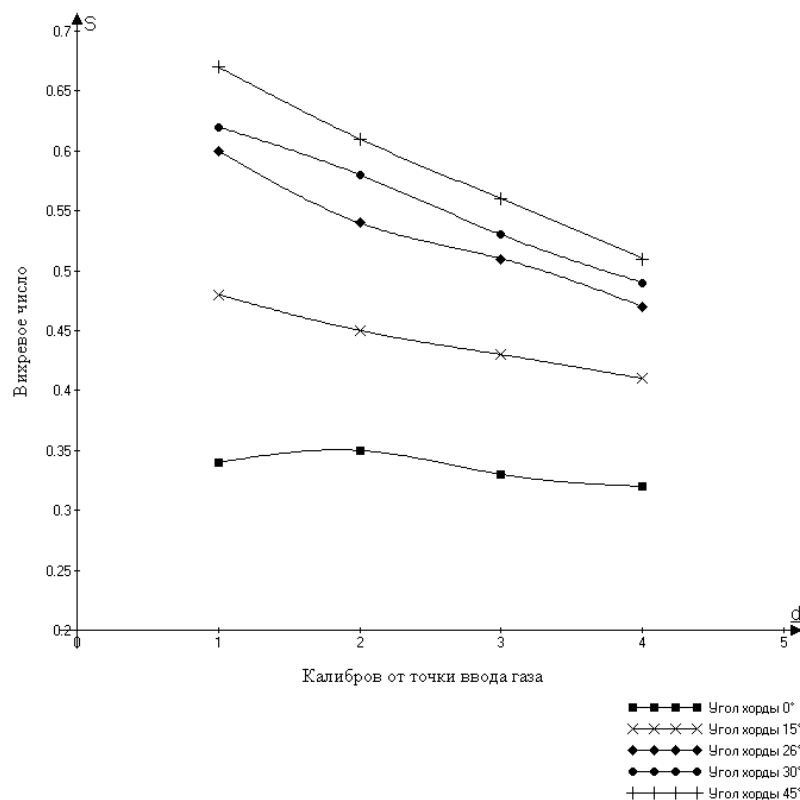


Рис. 4. Вихревое число при разных углах хорды Fig. 4. Swirl number at different chord angles

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

Таблица 4
Table 4Массовая доля газа на оси сопла
Mass fraction of gas at the nozzle axis

Угол хорды	Массовая доля газа в точке на оси сопла, расстояние от плоскости расположения сопла до рассматриваемого сечения в калибрах			
	1	2	3	4
0°	0,0625	0,0506	0,0527	0,0564
15°	0,0106	0,0373	0,0467	0,0498
26°	0,0025	0,0227	0,0323	0,0370
30°	0,0012	0,0122	0,0281	0,0386
45°	0,0000	0,0048	0,0154	0,0255

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

Как видно из таблиц 1 и 2, увеличение угла хорды способствует увеличению тангенциальной скорости, что также приводит к росту вихревого числа. Это характерно для каждого рассмотренного сечения. Наибольший рост тангенциальной скорости наблюдается при углах наклона осей газовых струй к радиусу 15 и 30°. Увеличение угла хорды выше 45° значительного влияния на тангенциальную скорость не оказывает. Такая тенденция наблюдалась также при углах наклона осей газовых струй к оси камеры смешения, составлявших 75° и 90°.

При увеличении угла хорды тангенциальная компонента скорости газоздушного потока в камере возрастает, однако его осевая составляющая уменьшается. Вследствие этого горючие газы на начальном участке канала концентрируются у периферии и формируют закрутку преимущественно вблизи стенок. Это хорошо видно из данных таблицы 4, согласно которым по мере увеличения угла хорды массовая доля пропана на оси соплового блока снижается, то есть глубина проникновения струи падает. Наиболее отчетливо это проявляется при заданном угле хорды 45° – горючий газ в центре камеры появляется лишь на удалении более 1 калибра от места ввода газовых струй.

Наибольшее давление разрежения, как видно из таблицы 3, наблюдается также на углах хорды 15° и 30°. При угле хорды 45° разрежение минимально и не имеет выраженной пиковой зоны – газ преимущественно распределен по периферии соплового блока. Наиболее равномерно зона разрежения распределена при угле хорды 30°. Целостную информативную картину распределения давления разрежения дают диаграммы распределения статического давления в сопловом блоке, которые для различных углов хорды приведены на рисунках 5-9. На них также видно, что зона разрежения с наибольшими значениями давления создается при углах наклона осей газовых сопел к радиусу 15° и 30°.

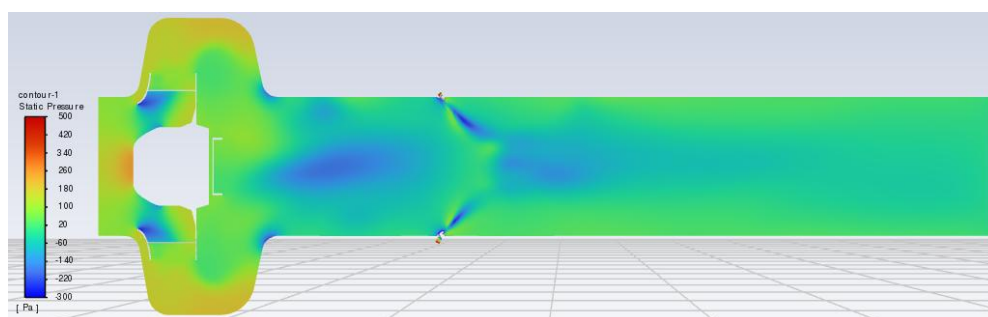


Рис. 5. Диаграмма распределения статического давления в сопловом блоке при угле хорды 0° Fig. 5. Static pressure distribution diagram in the nozzle block at a chord angle of 0°

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

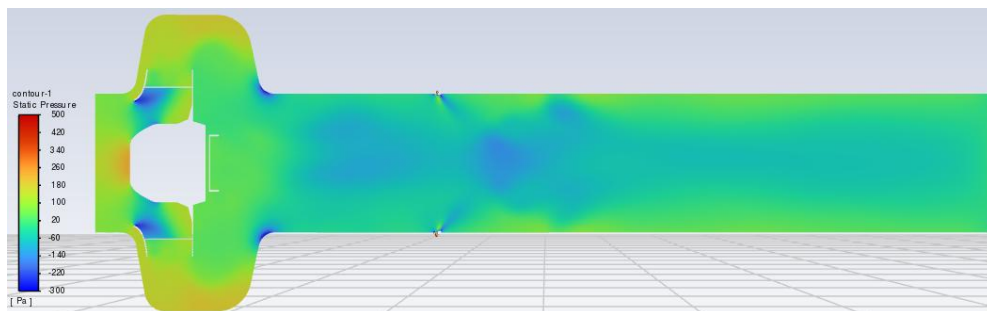


Рис. 6. Диаграмма распределения статического давления в сопловом блоке при угле хорды 15° Fig. 6. Static pressure distribution diagram in the nozzle block at a chord angle of 15°
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

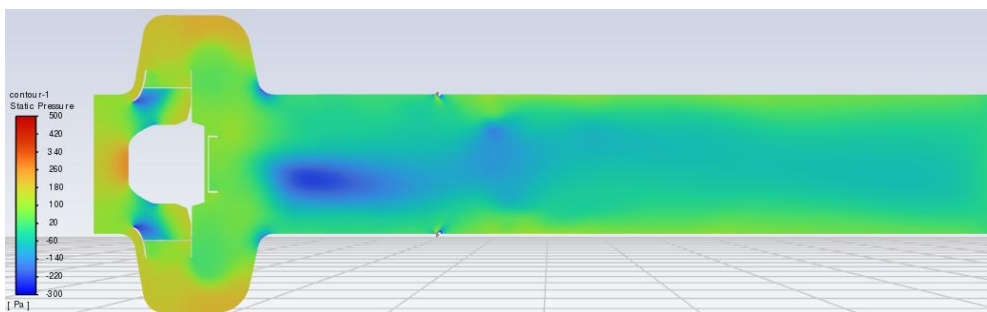


Рис. 7. Диаграмма распределения статического давления в сопловом блоке при угле хорды 26° Fig. 7. Static pressure distribution diagram in the nozzle block at a chord angle of 26°
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

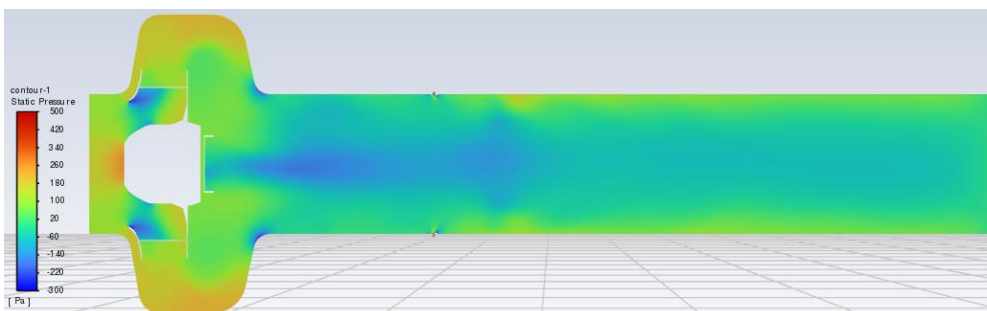


Рис. 8. Диаграмма распределения статического давления в сопловом блоке при угле хорды 30° Fig. 8. Static pressure distribution diagram in the nozzle block at a chord angle of 30°
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

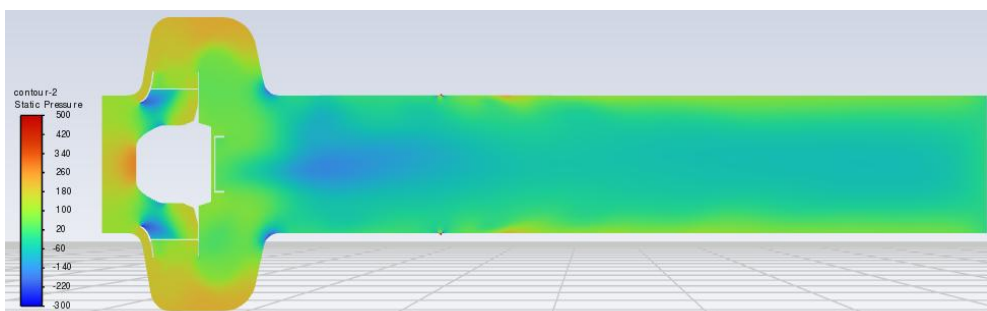


Рис. 9. Диаграмма распределения статического давления в сопловом блоке при угле хорды 45° Fig. 9. Static pressure distribution diagram in the nozzle block at a chord angle of 45°
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Особое внимание следует уделить коэффициенту вариации CV. Как видно из таблицы 3, наилучшее распределение массовой доли пропана во всех рассмотренных сечениях достигается при угле хорды 15° .

Аналогичные результаты были получены и для других вариантов задач. После анализа результатов расчета всех рассмотренных комбинаций углов было выявлено, что при использовании осевого центробежного вентилятора при заданном максимальном

расходе воздуха 0,281 кг/с:

1) Наиболее равномерное распределение горючего газа в вихревом воздушном потоке достигается при угле хорды $\alpha=15^\circ$ независимо от углов наклона осей струй к оси камеры смешения β . Для инжекционных смесителей, работающих без вентилятора, этот угол α составляет $22\div 25^\circ$ [15].

2) Наименьший коэффициент вариации достигается при поддержании вихревого числа вдоль соплового блока на уровне $S=0,5-0,4$.

3) Каждому углу β соответствует свой диапазон изменения вихревого числа, при котором наблюдается максимальная скорость крутки: для угла $\beta=60^\circ$ $S=0,67-0,51$; для угла $\beta=75^\circ$ $S=0,57-0,48$; для угла $\beta=90^\circ$ $S=0,56-0,5$. Изменение угла в пределах $75-90^\circ$ существенно не влияет на вихревое число и тангенциальную скорость газозвдушного потока.

4) На параметры разрежения в полости соплового блока существенное влияние оказывает угол наклона газовой струи к оси камеры смешения. Это отчётливо заметно на графике зависимости минимального статического давления от угла подачи газовой струи (рис. 10).

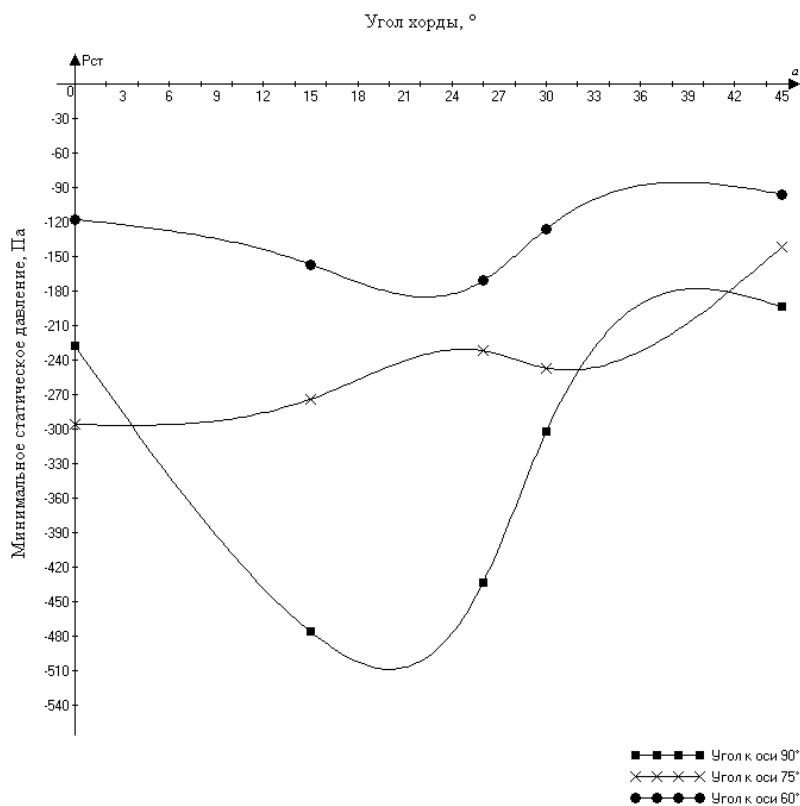


Рис. 10. Зависимость минимального статического давления от угла подачи газа

Fig. 10. Dependence of the minimum static pressure on the gas supply angle

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

Заключение или Выводы (Conclusions)

Проведено численное исследование газодинамических процессов взаимодействия хордальных газовых струй среднего давления с вихревым воздушным потоком при подаче воздуха осевым вентилятором. Определены зависимости равномерности распределения газа, степени крутки и разрежения от углов подачи β и α . Полученные результаты подтверждают возможность эффективного формирования закрученного потока без использования диска с закручивающими лопатками, что позволяет существенно снизить энергозатраты благодаря использованию осевых вентиляторов.

В рамках данной работы приоритетным является достижение наиболее равномерного распределения газа по каждому из сечений соплового блока. Однако следует также учесть компромисс между другими параметрами. При таких условиях наиболее подходящей является конфигурация углов $\beta=90^\circ/\alpha=26^\circ$. В этом случае достигается достаточно низкий коэффициент вариации (13,02%), высокая степень разрежения (-433,02 Па), распределенная на большей площади по сравнению с углом

хорды 15° , а также высокая тангенциальная скорость в выходном сечении (8,54 м/с).

Выбор угла подачи хордальных струй может варьироваться в зависимости от приоритетных задач. Так, для достижения наибольшего разрежения в небольшой зоне вблизи оси соплового блока в может быть использована конфигурация углов $\beta=90^\circ/\alpha=15^\circ$, для достижения наибольшей тангенциальной скорости – $\beta=90^\circ/\alpha=30^\circ$. При необходимости достижения протяженной зоны разрежения подходит конфигурация $\beta=75^\circ/\alpha=15^\circ$.

При подаче газа под углом $\beta=60^\circ$ низкий коэффициент вариации обеспечивается только при углах хорды $0^\circ \div 15^\circ$, однако в этом случае минимальны величины разрежения (-118,1 ÷ -157,1 Па) и тангенциальной скорости в выходном сечении (5,81 ÷ 7,32 м/с).

Литература

1. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Сунгатуллин Р.Г., др. Образование и способы снижения оксидов азота в котлах тг-104 с прямоточно-вихревыми горелками и периферийной подачей газа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016. №9-10. С. 83-90.
2. Евдокимов О.А. Научные основы организации горения в массивах противоточных и комбинированных закрученных струй: Дис. ... д-ра. техн. наук. Рыбинск; 2022. Доступно по: <https://www.dissercat.com/content/nauchnye-osnovy-organizatsii-goreniya-v-massivakh-protivotochnykh-i-kombinirovannykh-zakruch>. Ссылка активна на 11 октября 2025.
3. Леонтьев А.И., Кузма-Кичта Ю. А., Веретенников С. В., др. Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках // Теплофизика высоких температур. 2021. №5(59). С. 774-789.
4. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Электроприводы переменного тока. М.: Мир, 1987. 588 с.
5. Danyang W., Dongxin H., Jianguo X., et al. Influences of Dual Air-Swirl Angles on Swirling Injection and Combustion of Kerosene-Air at a Supercritical Pressure // Aerospace Research Communications. 2025. Vol. 3.
6. Bekhradinasab A., Vakilipour S., Al-Zaili J. Influence of swirl number and air preheating on turbulent mixing in hydrogen-methane blends within a swirl-stabilized burner // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2025. Vol. 239.
7. Меламед Л.Э., Филиппов Г.А. Моделирование турбулентности как «вихревой засыпки» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. №9-10(19). С. 122-132.
8. Soroush S. Properties of turbulent non-premixed methane/air flames in a miniature-scale swirl burner under different coaxial airflow swirl numbers // Future Energy. 2022. Vol. 2. pp. 27-37.
9. Xiangyun L., Zhu L., Liangde L., et al. Combustion characteristics of dual swirl low nitrogen burners in small gas boilers // Thermal Science. 2025. p. 152.
10. Sun M., Yali S., Yu G., et al. Numerical Investigation of Flow and Flame Structures in an Industrial Swirling Inverse Diffusion Methane/Air Burner // Fire. 2024. Vol. 7. p. 237.
11. Павлов Г.И., Теляшов Д.А., Шайхутдинов Я.О. Сопловой блок блочной горелки с хордальными газовыми струями // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: Сб. тезисов докладов XII Всерос. конф. с междунар. участием; 11-14 ноября 2024 г., Новосибирск: ИТ СО РАН, 2024. С. 76.
12. Вафин Д.Б. Тепловые и аэродинамические параметры камеры радиации печи пиролиза углеводородов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. №3(24). С. 198-210.
13. John G., Ephraim S., John A., et al. Evaluation of the efficacy of turbulence models for swirling flows and the effect of turbulence intensity on heat transfer // Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals. 2016. Vol. 70. №6. pp. 485–502.
14. Шайхутдинов Я.О., Павлов Г.И., Накоряков П.В., и др. Исследование хордальных струй в реагирующих смесях численным методом // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики сплошной среды — 2025»; 29 сентября — 3 октября 2025 г., Казань: Казанский ун-т, 2025. С. 635-640.
15. Павлов Г.И. Инжекционный смеситель горелки. Патент РФ на полезную модель №192541. 23.09.2019. Бюл. №27. Доступно по: <https://patents.google.com/patent/RU192541U1>. Ссылка активна на 11 октября 2025.

Авторы публикации

Шайхутдинов Ярослав Олегович – аспирант кафедры «Специальных технологий в образовании» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, Россия. jara2105@mail.ru

Павлов Григорий Иванович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Специальных

технологий в образовании» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-0825-0875>

Халиулин Руслан Рафаэлевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Реактивных двигателей и энергетических установок» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-2285-988X>

Теляшов Дмитрий Александрович – учебный мастер кафедры «Специальных технологий в образовании» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, Россия.

Тихонов Олег Александрович – ст. преподаватель кафедры «Реактивных двигателей и энергетических установок» ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, Россия.

References

1. Taumarov MA, Akhmetova RV, Sungatullin RG, et al. Education and ways of reducing nitrogen oxides in the boiler tg-104 with a direct-flow-vortex burners and the peripheral gas supply. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016; (9-10):83-90. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-9-10-83-90>.
2. Evdokimov OA. *Nauchnye osnovy organizatsii goreniya v massivakh protivotochnykh i kombinirovannykh zakruchennykh strui* [dissertation]. Rybinsk; 2022. Available at: <https://www.dissercat.com/content/nauchnye-osnovy-organizatsii-goreniya-v-massivakh-protivotochnykh-i-kombinirovannykh-zakruch>. Accessed: 11 Oct. 2025. (In Russ).
3. Leont'ev AI, Kuzma-Kichta YA, Veretennikov SV, et al. Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2021; 59(5):774-789. (In Russ).
4. Gupta A, Lilli D, Saired N. *Elektroprivody peremennogo toka*. Moscow: Mir; 1987. (In Russ).
5. Danyang W, Dongxin H, Jianguo X, et al. Influences of Dual Air-Swirl Angles on Swirling Injection and Combustion of Kerosene-Air at a Supercritical Pressure. *Aerospace Research Communications*. 2025; 3. doi: 10.3389/arc.2025.14110.
6. Bekhradinasab A, Vakiliipour S, Al-Zaili J. Influence of swirl number and air preheating on turbulent mixing in hydrogen–methane blends within a swirl-stabilized burner. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2025; 239. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126475.
7. Melamed LE, Filippov GA. Simulation of turbulence as a «vortex backfill». *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017; 19(9-10):122-132. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-122-132>.
8. Soroush S. Properties of turbulent non-premixed methane/air flames in a miniature-scale swirl burner under different coaxial airflow swirl numbers. *Future Energy*. 2022; 2: 27-37. doi: 10.55670/fpl.fuen.2.1.5.
9. Xiangyun L, Zhu L, Liangde L, et al. Combustion characteristics of dual swirl low nitrogen burners in small gas boilers. *Thermal Science*. 2025; 0: 152. doi: 10.2298/TSCI250326152L.
10. Sun M, Yali S, Yu G, et al. Numerical Investigation of Flow and Flame Structures in an Industrial Swirling Inverse Diffusion Methane/Air Burner. *Fire*. 2024; 7: 237. doi: 10.3390/fire7070237.
11. Pavlov GI, Telyashov DA, Shaikhutdinov YO. Soplovoi blok blochnoi gorelki s khordal'nymi gazovymi struyami. In: Pavlov GI, Telyashov DA, Shaikhutdinov YO. *Gorenie topliva: teoriya, eksperiment, prilozheniya: Sb. tezisev dokladov XII Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem; 11-14 Nov 2024; Novosibirsk, Russia*. Novosibirsk: IT SO RAN Publ., 2024. p. 76. (In Russ).
12. Vafin DB. Thermal and aerodynamic parameters radiation chambers of the hydrocarbon pyrolysis furnace. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(3):198-210. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-198-210>.
13. John G, Ephraim S, John A, et al. Evaluation of the efficacy of turbulence models for swirling flows and the effect of turbulence intensity on heat transfer. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*. 2016; 70(6): 485–502. doi: 10.1080/10407790.2016.1244390.
14. Shaikhutdinov YO, Pavlov GI. Issledovanie khordal'nykh strui v reagiruyushchikh smesyakh chislennym metodom. In: Nakoryakov PV, Telyashov DA, et al. *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual'nye problemy mekhaniki sploshnoi sredy — 2025»*; 29 Sept — 3 Oct 2025; Kazan, Russia. Kazan: Kazanskii un-t Publ., 2025. pp. 635-640. (In Russ).
15. Pavlov GI. *Inzhektionsionnyi smesitel' gorelki*. Patent RUS №192541. 23.09.2019. Byul. №27. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU192541U1>. Accessed: 11 Oct 2025. (In Russ).

Authors of the publication

Yaroslav O. Shaikhutdinov – Kazan National Research Technical University named after

A.N. Tupolev, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0005-4296-5235>.
jara2105@mail.ru

Gregory I. Pavlov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-0825-0875>

Ruslan R. Khaliulin – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-2285-988X>

Dmitry A. Telyashov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia.

Oleg A. Tikhonov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **31.10.2025 г.**

Отредактировано **21.01.2026 г.**

Принято **02.02.2026 г.**



ТЕРМОРАСШИРЕНИЕ И УСАДКА ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ ПРИ ВТОРИЧНОМ НАГРЕВЕ

Андрианова К.А., Аэрайгули Куомалибиекэ., Бубнов Д.А., Амирова Л.М.

Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия
KAAndrianova@kai.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Эпоксидные пены, полученные путем терморасширения полимерных микросфер, перспективны в качестве заполнителей сэндвич-панелей. При вторичном нагреве эпоксидных пеноматериалов могут происходить процессы значительной усадки или терморасширения в зависимости от состава пен. Исследование и прогнозирование данных процессов необходимо для проектирования сэндвич-изделий с эпоксидным пенозаполнителем. ЦЕЛЬ. Исследование процессов термического расширения и усадки эпоксидных пенопластов при вторичном нагреве. Оценка давления, создаваемого в замкнутом пространстве оснастки за счет расширения. МЕТОДЫ. Для оценки температуры стеклования эпоксидных пенопластов использовался метод динамического механического анализа. Процесс вспенивания микросфер изучался методом термомеханического анализа. Оценка термического расширения и усадки производилась путем измерения линейных размеров и объема пенопласта до и после термической обработки. Оценка давления в процессе терморасширения пенопластов производилась с помощью датчиков давления и регистрировалась с помощью диэлектрической системы мониторинга процесса формования композитов DiatomPlus (INASCO). РЕЗУЛЬТАТЫ. Показано, что при вторичном нагреве эпоксидных пенопластов может происходить усадка или расширение материала в зависимости от содержания микросфер. Давление терморасширения увеличивается с повышением плотности пенопласта. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Подобраны температурные условия вторичной термообработки и проведены исследования терморасширения эпоксидных пенопластов с различным содержанием микросфер и с различной начальной плотностью. Показано, что начальная минимальная плотность пенопласта снижается, а плотность после термообработки увеличивается с повышением концентрации микросфер. С повышением начальной плотности пенопласта при постоянной концентрации микросфер плотность пенопласта после термообработки снижается. Для пенопластов с большой начальной плотностью и большим содержанием микросфер наблюдается анизотропия расширения и сжатия после термообработки.

Ключевые слова: тепловое расширение; эпоксидный пенопласт; терморасширяющиеся микросферы; усадка; плотность.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ. (Соглашение №15/2025-ПД-КАИ от 22.12.2025).

Для цитирования: Андрианова К.А., Аэрайгули Куомалибиекэ, Бубнов Д.А., Амирова Л.М. Терморасширение и усадка эпоксидных пенопластов при вторичном нагреве // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 168-178. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-168-178.

THERMAL EXPANSION AND SHRINKAGE OF EPOXY FOAMS DURING SECONDARY HEATING

Andrianova K.A., Aerajguli Kuomalibieke., Bubnov D.A., Amirova L.M.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,
Kazan, Russia
KAAndrianova@kai.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Epoxy foams produced by thermal expansion of polymer microspheres show promise as sandwich panel cores. During secondary heating of epoxy foams, significant shrinkage or thermal expansion may occur, depending on the foam composition. Research and prediction of these processes is necessary for the design of sandwich products with epoxy foam cores. *THE PURPOSE.* To study the thermal expansion and shrinkage of epoxy foams during secondary heating. To estimate the pressure created in a confined tooling space due to expansion. *METHODS.* Dynamic mechanical analysis was used to estimate the glass transition temperature of epoxy foams. The foaming process of microspheres was studied using thermomechanical analysis. Thermal expansion and shrinkage were assessed by measuring the linear dimensions and volume of the foam before and after heat treatment. The pressure during the thermal expansion of foam plastics was assessed using pressure sensors and recorded using the DiamonPlus dielectric composite molding process monitoring system (INASCO). *RESULTS.* It was shown that secondary heating of epoxy foam plastics can cause shrinkage or expansion of the material depending on the microsphere content. Thermal expansion pressure increases with increasing foam plastic density. *CONCLUSIONS.* The temperature conditions for secondary heat treatment were selected, and thermal expansion studies were conducted for epoxy foam plastics with different microsphere contents and initial densities. It was shown that the initial minimum foam density decreases, while the density after heat treatment increases with increasing microsphere concentration. With an increase in the initial foam plastic density at a constant microsphere concentration, the foam plastic density after heat treatment decreases. For foam plastics with a high initial density and a high microsphere content, anisotropy of expansion and contraction after heat treatment is observed.

Keywords: thermal expansion; epoxy foam; thermally expanding microspheres; shrinkage; density.

Acknowledgments: This work was funded by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan provided to higher education institutions, scientific and other organizations to support human resource development plans in terms of encouraging their research and academic staff to defend doctoral dissertations and conduct research activities." (Agreement No. 15/2025-PD-KAI dated December 22, 2025).

For citation: Andrianova K.A., Aerajguli Kuomalibieke, Bubnov D.A., Amirova L.M. Thermal expansion and shrinkage of epoxy foams during secondary heating. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 168-178. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-168-178.

Введение (Introduction)

Полимерные пены широко применяются практически во всех областях промышленности: авиации, машиностроении, строительстве, энергетике, благодаря своим высоким шумо- и теплоизоляционным характеристикам, энергопоглощению и другим ценным свойствам [1-6].

Полимерные пенопласты удовлетворяют жестким требованиям теплоизоляции криогенных материалов, что имеет большое значение для охлаждения различных электронных устройств [7]. Однако при этом необходимо учитывать тепловое расширение пенопластов, которое зависит не только от плотности пены [8], но и от направления вспенивания [9]. Уменьшение и компенсация теплового расширения пенопластов требует разработки различных технологических приемов, что является одной из актуальных задач в области получения полимерных пен [10]. С другой стороны, тепловое расширение пенопластов является необходимым условием при формировании сэндвич-панелей с пенопластовым наполнителем с помощью технологии формирования с термическим расширением сердечника [11]. Технология основана на возможности расширения пенопластового сердечника при повышенной температуре и создании давления на слои препрега внутри замкнутой формообразующей оснастки. Таким образом, исследование процесса теплового расширения полимерных пен и управление данным процессом является актуальной задачей во многих областях техники.

Существует большое количество типов полимерных пен и способов вспенивания полимеров [12]. Среди них эпоксидные пены занимают особое место благодаря высоким механическим характеристикам и адгезионной прочности [13]. На основе эпоксидных полимеров можно получать высокотемпературные пены и сэндвич изделия [14], они

перспективны и для получения покрытий, в том числе наносимых методом электростатического напыления [15]. Эпоксидные пены, особенно полученные методом физического вспенивания за счет терморасширения полимерных микросфер перспективны в качестве сердечников для сэндвич-конструкций сложной формы [16]. Они характеризуются хорошей адгезией к обшивке, прочностью на сжатие и ударостойкостью.

Ранее нами были разработаны и запатентованы составы эпоксидных композиций с терморасширяющимися микросферами и способ получения эпоксидного пенопласта на их основе [17]. Предложена технология ихготовления сэндвич изделия с эпоксидным пенопластовым сердечником [18, 19] и рассмотрены области их применения [20]. Было показано, что формование сэндвич изделий с помощью технологии формования с термическим расширением пенопластового сердечника – это экономически эффективная технология изготовления композитных конструкций, позволяющая создавать изделия сложной формы. Однако остаются не до конца решенными вопросы, связанные с влиянием состава и температуры на процесс теплового расширения эпоксидных пен, полученных на основе композиций с терморасширяющимися микросферами [21].

В данной работе была поставлена задача исследовать процесс термического расширения и усадки разработанных ранее эпоксидных пенопластов, а также оценить давление, создаваемое в замкнутом пространстве оснастки за счет этого расширения.

Материалы и методы (Materials and methods)

Эпоксидные пенопласты получали на основе смесей твердых и жидких эпоксидных смол. В качестве твердой эпоксидной смолы использовали смолу марки D.E.R.671 (эпоксидное число ЭЧ = 8-9%, температура размягчения 75-85°C). В качестве жидкой эпоксидной смолы с отвердителем использовали двухкомпонентное эпоксидное связующее фирмы ИТЕКМА марки Т20-60 (г. Москва). В качестве физического вспенивающего агента были использованы полимерные терморасширяющиеся микросферы Expancel DU120. Измельчение твердой эпоксидной смолы проводили в центробежной мельнице Retsch ZM 200 до получения однородного порошка. Смешение сухих и жидких компонентов проводилось в планетарном смесителе Bosch Mum Serie 2 MUMS2ER01 со скоростью смещения 200-500 об/мин в течение 10-15 минут.

Процесс вспенивания полимерных микросфер изучали с помощью термомеханического анализатора ТМА 402 F1 Hyperion (Netzsch) при скорости нагрева 1°C/мин.

Оценка теплостойкости эпоксидных пен проводилась на динамическом механическом анализаторе DMA Q800 (TA Instruments). Образцы эпоксидных пен в виде дисков толщиной до 8 мм подвергались деформации на сжатие между двумя параллельными пластинами. Скорость нагрева составляла 5°C/мин, частота – 1 Гц, амплитуда деформации – 0,1%. Температура стеклования отвержденных полимеров определялась из температурной зависимости модуля упругости по ГОСТ Р 57739-2017.

Для вспенивания эпоксидных композиций были изготовлены специальные оснастки для получения образцов прямоугольной и цилиндрической формы. Давление, создаваемое при нагреве пенопласта в закрытой форме, определяли с помощью датчиков давления марки ХРС10-М-20BS-/L4М. Измерение давления проводили с помощью диэлектрической системы мониторинга процесса формования композитов DiamonPlus (INASCO).



Рис. 1. Металлические оснастки для вспенивания: *Fig. 1. Metal mold tool for foaming: a – rectangular mold tool; b – cylindrical mold tool with a pressure sensor*

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

Для исследования теплового расширения были изготовлены образцы пенопластов в виде пластин размером 17×12 мм (рис. 2а) и в виде цилиндров диаметром 50 мм и высотой 50 мм (рис. 2б). Так как после термообработки образцы в виде пластин подвергались сильному короблению, в некоторых случаях приводящему к разрушению пенопласта, для изучения влияния термообработки на изменение геометрических размеров использовали образцы только цилиндрической формы.

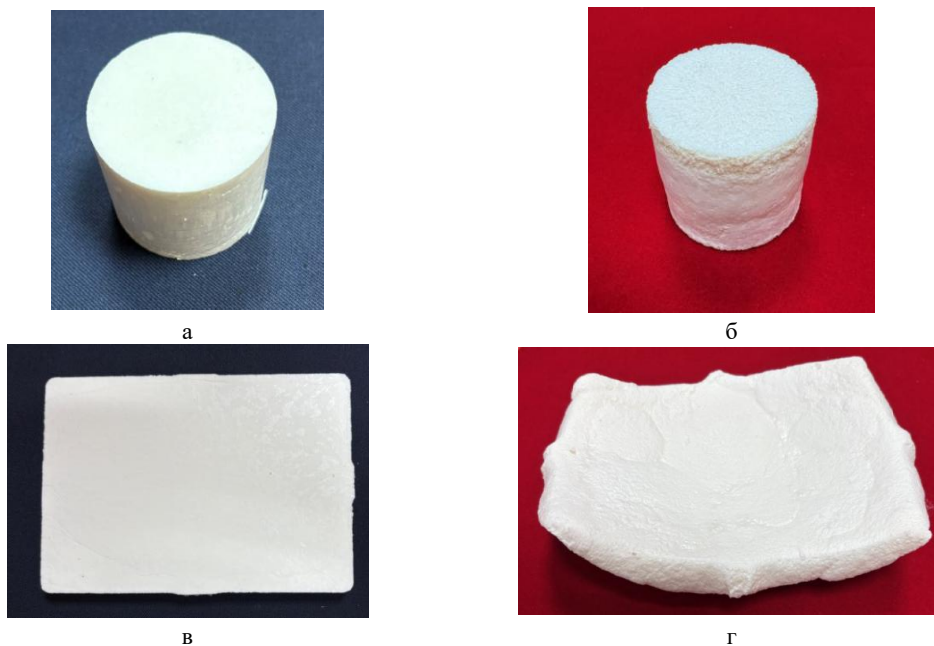


Рис. 2. Внешний вид образцов эпоксидных пен до (а, в) и после (б, г) термообработки

Fig. 2. Appearance of epoxy foam samples before (a, c) and after (b, d) heat treatment

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

Плотность пенопластов (ρ) до и после термообработки определяли по массе и геометрическим параметрам образца.

Тепловое расширение эпоксидных пен определяли по изменению линейных размеров цилиндрических образцов при нагревании.

Результаты (Results)

Для выбора температуры вторичного нагрева (термообработки) необходимо было определить температуру стеклования эпоксидного пенопласта. На рисунке 3 приведены зависимости модуля упругости и тангенса угла механических потерь эпоксидного пенопласта с микросферами DU120 от температуры, полученные на динамическом механическом анализаторе. Плотность пенопласта составляет 31 кг/м³, концентрация микросфер 45%. Из рисунка 3 видно, что при температуре 120°C пенопласт полностью расстекловывается, поэтому термообработку проводили при данной температуре. Кроме того, для микросфер марки DU120, используемых в составе пенопласта, максимум вспенивания наблюдается также при T=120°C, как это видно из термомеханической кривой, показанной на рисунке 4.

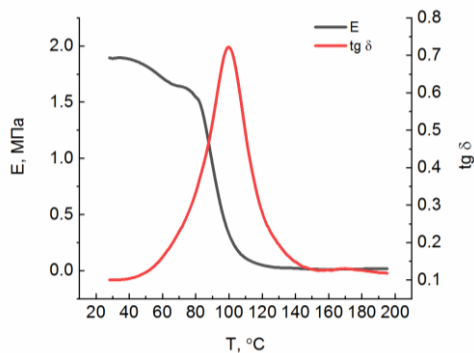


Рис. 3. Зависимость модуля упругости и тангенса угла механических потерь эпоксидного пенопласта от температуры

Fig. 3. Temperature dependence of the elasticity modulus and $\text{tg } \delta$ of the epoxy foam

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

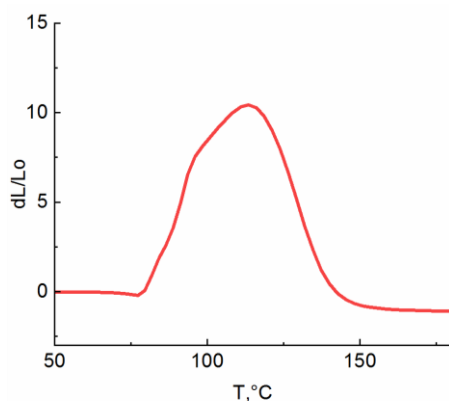


Рис. 4. Термомеханическая кривая Fig. 4. Thermomechanical curve of DU120 терморасширения микросфер марки DU120 microspheres thermal expansion

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

Для изучения процесса терморасширения при вторичной термообработке получали эпоксидные пенопласты с различной плотностью и с различным содержанием микросфер марки DU120 по технологии, подробно описанной в работе [20]. Необходимо отметить, что минимальное значение плотности зависит от содержания микросфер. На рисунке 5 (черная кривая) представлены данные по минимальной плотности эпоксидных пенопластов при различных содержаниях микросфер DU120. Из рисунка видно, что с повышением содержания микросфер плотность эпоксидного пенопласта экспоненциально снижается, в пределах от плотности эпоксидного полимера (1.2 кг/м^3) до плотности микросфер (15 кг/м^3).

Для выявления закономерностей влияния вторичного нагрева на плотность пенопластов полученные пенопласты были термообработаны при температуре 120°C и после охлаждения определены их плотности. На рисунке 5 (красная кривая) приведены значения плотностей термообработанных образцов. Из рисунка видно, что плотность термообработанных пенопластов с повышением содержания микросфер вначале немного снижается, затем, в области концентраций 30-40% снова повышается и практически выходит на предел.

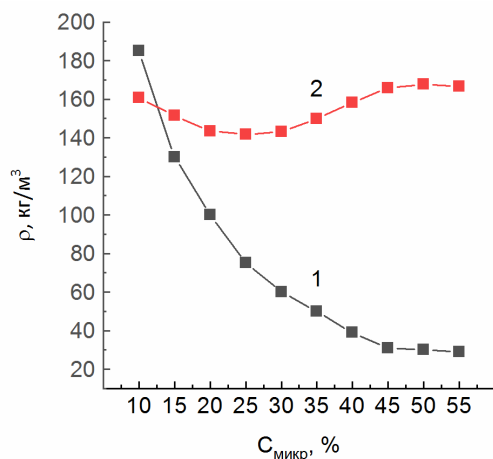


Рис. 5. Зависимость минимальной плотности (1) и Fig. 5. Dependence of the minimum density (1) и плотности после термообработки (2) эпоксидного density after heat treatment (2) of epoxy foam based пенопласта на основе состава T20-60/D.E.R.671/DU120 on the concentration of microspheres

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

С учетом того, что плотность эпоксидного полимера в пенопластах при термообработке практически не меняется (1.2 кг/м^3), были рассчитаны плотности микросфер в составе эпоксидных пенопластов до и после термической обработки (рис. 6). Из рисунка 6 видно, что плотность микросфер в пенопластах с максимальным расширением уменьшается до предельного значения 15 кг/м^3 с повышением концентрации микросфер, однако после термической обработки плотность микросфер увеличивается с повышением концентрации микросфер. Это видимо связано с тем, что с повышением концентрации

микрофер уменьшается толщина эпоксидной перегородки между микроферами, это приводит к тому, что при вспенивании пенопласта эпоксидный полимер оказывает меньшее сопротивление как вспениванию микрофер, так и улетучиванию газа-вспенивателя. При вторичной термообработке микроферы с меньшим количеством оставшегося газа начинают сжиматься, а уменьшение толщины перегородки из эпоксидного полимера оказывает меньшее сопротивление усадке полимера. Пенопласты с микроферами с большим количеством газа могут, наоборот, расширяться.

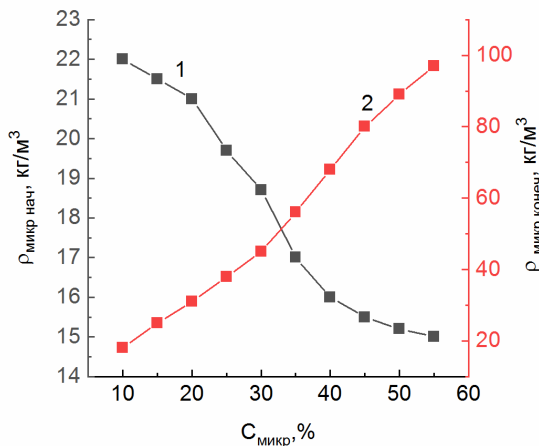


Рис. 6. Плотность микрофер в предельно вспененных пенопластах с различным содержанием микрофер до (1) и после (2) термической обработки

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

На основе эпоксидных композиций с содержанием микрофер в интервале 10-55% были получены пенопласты с плотностями выше минимальных и исследовано их поведение при термообработке. Для пенопластов с содержанием микрофер более 40% были отмечены некоторые особенности изменения геометрических размеров пен при термической обработке. В таблице 1 в качестве примера приведены характеристики пенопластов, содержащих 45% микрофер, с различной начальной плотностью до и после термической обработки при 120°C. Из таблицы 1 видно, что пенопласты с начальной плотностью менее 100 кг/м³ сжимаются. Причем с уменьшением начальной плотности конечная плотность пенопласта увеличивается. Для пенопластов с начальной плотностью выше 100 кг/м³ при термообработке наблюдается расширение. Отмечается небольшая анизотропия в изменении линейных размеров: высота пенопластов при минимальных плотностях имеет больший процент сжатия по сравнению с диаметром (D), в то время как при больших плотностях диаметр имеет больший процент расширения по сравнению с высотой образца (H). В литературе также отмечается аналогичная анизотропия для ряда пенопластов [8-10].

Таблица 1
Table 1

Характеристики пенопластов с содержанием микрофер 45%
Characteristics of foam plastics with a microsphere content of 45%

Начальная плотность пенопласта, кг/м ³	Плотность пенопласта после т/о 120°C, кг/м ³	Начальная плотность микрофер, кг/м ³	Плотность микрофер после т/о 120°C, кг/м ³	Изменение D, %	Изменение H, %
31	170	15.5	83	-33	-38
56	151	25	80	-29	-33
78	117	33	54	-12	-15
106	95	49	48	2	-1
155	86	75	40	21	17
206	76	101	38	36	34

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

При термообработке пенопластов с плотностью 205-206 кг/м³ плотность получаемого пенопласта зависит от содержания микрофер (табл. 2). Из таблицы 2 видно, что с повышением концентрации микрофер плотность получаемого пенопласта уменьшается, что вполне логично. Однако при этом конечная плотность микрофер снижается с

уменьшением содержания микросфер. По-видимому, в пенопластах с уменьшением содержанием микросфер толщина оксидной полимерной стенки между микросферами увеличивается и, следовательно, затрудняется испарение газа-вспенивателя, который как раз обеспечивает вспенивание микросфер.

Таблица 2

Table 2

Характеристики пенопластов с начальной плотностью 205-206 кг/м³ с различным содержанием микросфер

Characteristics of foam plastics with an initial density of 205-206 kg/m³ with different microsphere content

Содержание микросфер, %	Плотность пенопласта после т/о 120°С, кг/м ³	Начальная плотность микросфер, кг/м ³	Плотность микросфер после т/о 120°С, кг/м ³	Изменение D, %	Изменение H, %
10	156	25	18	9.5	10
15	122	36	20	13	13
20	107	46	23	17	16
25	98	57	26	21	20
30	94	68	30	24	23
35	87	78	32	28	26
40	84	89	35	32	30
45	76	101	38	36	34

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

Таким образом, поведение оксидных пенопластов при термической обработке зависит как от их плотности, так и от содержания микросфер. Это необходимо учитывать при использовании подобных пенопластов в различных изделиях, в частности при изготовлении пенопластовых сердечников для сэндвич-изделий с композитной обшивкой. Одним из наиболее перспективных способов для получения сэндвич изделий сложной геометрии является формование под давлением терморасширения предварительно вспененного пенопластового сердечника [22, 23]. Для формования композитной обшивки сэндвич-изделия важно знать величину давления, создаваемого пенопластовым сердечником при заданной температуре.

В данной работе изучалось изменение давления, создаваемое пенопластом в закрытой форме, при температуре 120°С. Данная температура является приемлемой температурой отверждения промышленных препрегов на основе оксидных связующих и стекло- и углетканей. Поэтому изучение давления, создаваемого пенопластами для формования высокопрочных армированных композитных обшивок сэндвич изделий, представляет не только научный, но и практический интерес.

При термообработке пенопластов в закрытой форме за счет терморасширения создается давление, которое регистрировалось во времени при температуре 120°С. На рисунке 7 в качестве примера показана динамика изменения давления в закрытой форме с пенопластами различной начальной плотности. Содержание микросфер составляло 45%.

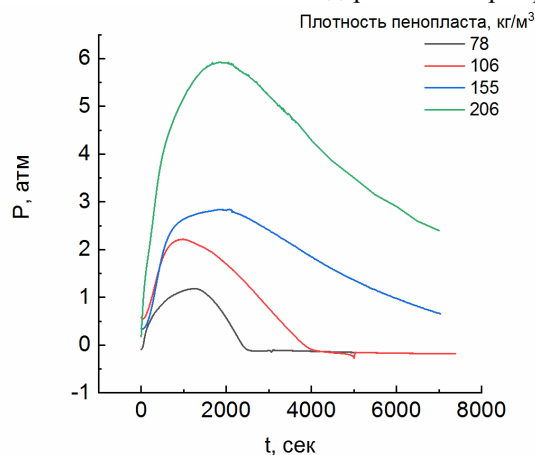


Рис. 7. Давление терморасширения для пенопластов с содержанием микросфер 45% при начальной плотности (кг/м³): 1 – 78, 2 – 106, 3 – 155, 4 – 206

Fig. 7. Thermal expansion pressure for foam plastics with a microsphere content of 45% at an initial density (kg/m³): 1 – 78, 2 – 106, 3 – 155, 4 – 206

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

Из рисунка 7 видно, что давление терморасширения увеличивается с повышением плотности пенопласта. Давление терморасширения после достижения максимума начинает снижаться, скорость снижения давления повышается с уменьшением плотности пенопласта.

Концентрация микросфер также влияет на давление терморасширения, на рисунке 8 приведены диаграммы изменения давления эпоксидных пен с разной концентрацией микросфер при равной плотности пенопласта (примерно 205-206 кг/м³).

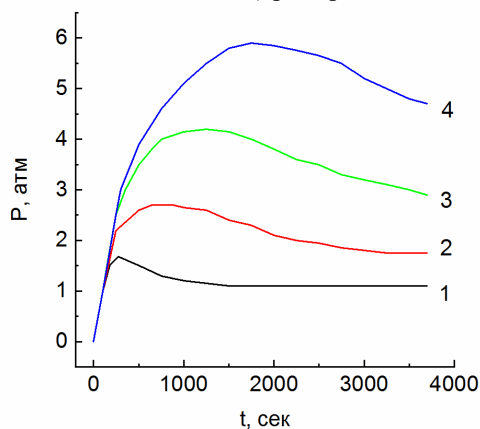


Рис. 8. Давление терморасширения для пенопластов с плотностью 205-205 кг/м³ с разной концентрацией микросфер: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 45%
 Fig. 8. Thermal expansion pressure for foams with a density of 205-205 kg/m³ with different concentrations of microspheres: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 45%

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

Из рисунка 8 видно, что с повышением концентрации микросфер давление, создаваемое пенопластом за счет терморасширения, растет, так как плотность пенопласта при терморасширении снижается сильнее с увеличением концентрации микросфер как показано в таблице 2. Таким образом, давление терморасширения можно регулировать, изменяя плотность эпоксидных пенопластов или концентрацию микросфер.

Выводы (Conclusions)

1. На основании данных динамического механического анализа и термомеханического анализа эпоксидных пенопластов и терморасширяющихся микросфер подобраны температурные условия вторичной термообработки и проведены исследования терморасширения эпоксидных пенопластов с различным содержанием микросфер и с различной начальной плотностью.

2. Для пенопластов с минимально возможной плотностью получены зависимости начальной плотности и плотности после термообработки от концентрации микросфер. Показано, что начальная минимальная плотность пенопласта снижается, а плотность после термообработки увеличивается с повышением концентрации микросфер.

3. С повышением начальной плотности пенопласта при постоянной концентрации микросфер плотность пенопласта после термообработки снижается. Для пенопластов с большой начальной плотностью и большим содержанием микросфер наблюдается анизотропия расширения и сжатия после термообработки.

4. Для пенопластов с одинаковой начальной плотностью плотность пенопласта после термообработки снижается с повышением концентрации микросфер. В то время как плотность микросфер после термической обработки снижается при уменьшении концентрации микросфер в пенопласте.

Литература

1. Taskin O. S. Polymeric Foams: Materials, Technology, and Applications // Polymeric Foams: Applications of Polymeric Foams (Volume 2). American Chemical Society, 2023. С. 51-63.
2. Wu G. et al. A review of thermoplastic polymer foams for functional applications // Journal of Materials Science. 2021. Т. 56. №. 20. С. 11579-11604.
3. Naderi G. et al. Polymer Foams for Energy Applications: Storage, Harvesting, Dissipation, and Conversion // Polymer Engineering & Science. 2025. Т.66. № 11. С. 7-42.
4. Pattarakunnan K. et al. Impact damage tolerance of energy storage composite structures containing lithium-ion polymer batteries // Composite Structures. 2021. Т. 267. С. 113845.
5. Pattarakunnan K. et al. Thermal Performance of Energy Storage Sandwich Composites Containing Lithium-Ion Polymer Batteries // Applied Composite Materials. 2025. С. 1-33.

6. Wang X. et al. Experimental study on post-impact loading of composite sandwich-structured batteries // Optics & Laser Technology. 2025. Т. 186. С. 112637
7. Soni P. et al. Progress in innovative technologies in thermal insulation for cryogenic applications // Energy. 2025. С. 138658.
8. Rodríguez-Pérez M. A. et al. Thermal expansion of crosslinked closed-cell polyethylene foams // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 1998. Т. 36. №. 14. С. 2587-2596
9. Andersons J. et al. Anisotropic thermal expansion of bio-based rigid low-density closed-cell polyurethane foams // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Т. 16. С. 1517-1525.
10. Rodríguez-Pérez M. A., González-Peña J. I., de Saja J. A. Anisotropic and heterogeneous thermal expansion of polyethylene foam blocks: Effect of thermal treatments // European polymer journal. 2007. Т. 43. №. 10. С. 4474-4485.
11. Qin Y. et al. Preparation of thermal expandable epoxy resin and properties of foam sandwich composites formed by thermal expansion molding process // Polymer Composites. 2024. Т. 45. №. 9. С. 8345-8359.
12. Krishnan V. G. et al. Characterizing the foaming process of polymers: Review of experimental methods // Advances in Colloid and Interface Science. 2025. С. 103579.
13. Kwon D. J. et al. Optimized epoxy foam interface of CFRP/Epoxy Foam/CFRP sandwich composites for improving compressive and impact properties // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Т. 11. С. 62-71.
14. Peng Z. et al. Preparation and evaluation of the high-temperature-resistant epoxy resin with thermal expansion properties enables Z-axis reinforcement // Composites Communications. 2025. Т. 56. С. 102372.
15. Воронцов С. А., Галимова Н. Я., Тукбаев Э. Р. Исследование тепловых процессов при нанесении полимерных порошковых покрытий электростатико-термогазодинамическим способом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. №. 3-4. С. 106-111.
16. Chen Y., Das R. A review on manufacture of polymeric foam cores for sandwich structures of complex shape in automotive applications // Journal of Sandwich Structures & Materials. 2022. Т. 24. №. 1. С. 789-819.
17. Пат. РФ 2845736. Эпоксидный пенопласт, способ получения эпоксидного пенопласта (варианты) и способ получения сэндвич-изделия из эпоксидного пенопласта (варианты). Куомалибиекэ А., Мигранов Т.И., Андрианова К.А., Амирова Л.М. Оpubл. 25.08.2025 Бюл. № 24.
18. Пат. РФ 2852337. Способ получения сэндвич-изделия Куомалибиекэ А., Мигранов Т.И., Андрианова К.А., Амирова Л.М. Оpubл. 08.12.2025 Бюл. № 34.
19. Пат. РФ 2852526. Способ получения сэндвич-изделия из эпоксидного пенопласта. А. Куомалибиекэ, Мигранов Т.И., Андрианова К.А., Амирова Л.М. Оpubл. 09.12.2025 Бюл. № 34.
20. Kuomalibieke A. et al. Epoxy Polymer Based Foam Fillers and Sandwich Structures with a Core Based on Them // Russian Aeronautics. 2025. Т. 68. №. 2. С. 463-470.
21. Peng Y. et al. Interfacial Delamination and Corresponding Mechanisms of Integrated Sandwich Composite Structure Fabricated Via Internal Thermal Expansion Technique // Applied Composite Materials. 2026. Т. 33. №. 1. С. 17.
22. Lee C. S. et al. Co-cure bonding method for foam core composite sandwich manufacturing // Composite structures. 2004. Т. 66. №. 1-4. С. 231-238.
23. Sun Z. et al. Effect of expansion rate on interfacial mechanical properties and failure mechanism of sandwich composites prepared via thermal expansion molding process // Engineering Failure Analysis. 2024. Т. 161. С. 108246.

Авторы публикации

Андрианова Кристина Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0001-9011-6856>. *KAAndrianova@kai.ru*

Аэрайгули Куомалибиекэ – аспирант кафедры производства летательных аппаратов Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. *arai0415@mail.ru*

Бубнов Денис Альбертович – аспирант кафедры производства летательных аппаратов Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. *DABubnov@kai.ru*

Амирова Лилия Миниахмедовна – д-р хим. наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. *ORCID**: <http://orcid.org/0009-0008-7605-2743/>. amirovaliliyam@mail.ru

References

1. Taskin O. S. Polymeric Foams: Materials, Technology, and Applications // Polymeric Foams: Applications of Polymeric Foams (Volume 2). American Chemical Society, 2023. C. 51-63.
2. Wu G. et al. A review of thermoplastic polymer foams for functional applications // Journal of Materials Science. 2021. T. 56. №. 20. C. 11579-11604.
3. Naderi G. et al. Polymer Foams for Energy Applications: Storage, Harvesting, Dissipation, and Conversion // Polymer Engineering & Science. 2025. T.66. № 11. C. 7-42.
4. Pattarakunna K. et al. Impact damage tolerance of energy storage composite structures containing lithium-ion polymer batteries // Composite Structures. 2021. T. 267. C. 113845.
5. Pattarakunna K. et al. Thermal Performance of Energy Storage Sandwich Composites Containing Lithium-Ion Polymer Batteries // Applied Composite Materials. 2025. C. 1-33.
6. Wang X. et al. Experimental study on post-impact loading of composite sandwich-structured batteries // Optics & Laser Technology. 2025. T. 186. C. 112637
7. Soni P. et al. Progress in innovative technologies in thermal insulation for cryogenic applications //Energy. 2025. C. 138658.
8. Rodríguez-Pérez M. A. et al. Thermal expansion of crosslinked closed-cell polyethylene foams // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 1998. T. 36. №. 14. C. 2587-2596
9. Andersons J. et al. Anisotropic thermal expansion of bio-based rigid low-density closed-cell polyurethane foams // Journal of Materials Research and Technology. 2022. T. 16. C. 1517-1525.
10. Rodríguez-Pérez M. A., González-Peña J. I., de Saja J. A. Anisotropic and heterogeneous thermal expansion of polyethylene foam blocks: Effect of thermal treatments // European polymer journal. 2007. T. 43. №. 10. C. 4474-4485.
11. Qin Y. et al. Preparation of thermal expandable epoxy resin and properties of foam sandwich composites formed by thermal expansion molding process //Polymer Composites. 2024. T. 45. №. 9. C. 8345-8359.
12. Krishnan V. G. et al. Characterizing the foaming process of polymers: Review of experimental methods // Advances in Colloid and Interface Science. 2025. C. 103579.
13. Kwon D. J. et al. Optimized epoxy foam interface of CFRP/Epoxy Foam/CFRP sandwich composites for improving compressive and impact properties // Journal of Materials Research and Technology. 2021. T. 11. C. 62-71.
14. Peng Z. et al. Preparation and evaluation of the high-temperature-resistant epoxy resin with thermal expansion properties enables Z-axis reinforcement // Composites Communications. 2025. T. 56. C. 102372.
15. Voroncov S. A., Galimova N. Ya., Tukbayev E. R. Issledovaniye teplovih processov pri nanesenii polimernih poroshkovih pokrytiy electrostatico-termogazodinamicheskim sposobom // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemi energetiki. 2011. №. 3-4. S. 106-111. (In Russ)
16. Chen Y., Das R. A review on manufacture of polymeric foam cores for sandwich structures of complex shape in automotive applications // Journal of Sandwich Structures & Materials. 2022. T. 24. №. 1. C. 789-819.
17. Pat. RF 2845736. Epoksidniy penoplast, sposob polucheniya epoksidnogo penoplasta (varianti) i sposob polucheniya sandvich-izdeliya iz epoksidnogo penoplasta (varianti). Kuomalibieke A., Migranov T.I., Andrianova K.A., Amirova L.M. Opubl. 25.08.2025 Bul. № 24. (In Russ)
18. Pat. RF 2852337. Sposob polucheniya sandvich-izdeliya. Kuomalibieke A., Migranov T.I., Andrianova K.A., Amirova L.M.. Opubl. 08.12.2025 Bul. № 34. (In Russ)
19. Pat. RF 2852526. Sposob polucheniya sandvich-izdeliya iz epoksidnogo penoplasta. Kuomalibieke A., Migranov T.I., Andrianova K.A., Amirova L.M. Opubl. 09.12.2025 Bul. № 34. (In Russ)
20. Kuomalibieke A. et al. Epoxy Polymer Based Foam Fillers and Sandwich Structures with a Core Based on Them // Russian Aeronautics. 2025. T. 68. №. 2. C. 463-470.
21. Peng Y. et al. Interfacial Delamination and Corresponding Mechanisms of Integrated Sandwich Composite Structure Fabricated Via Internal Thermal Expansion Technique // Applied Composite Materials. 2026. T. 33. №. 1. C. 17.
22. Lee C. S. et al. Co-cure bonding method for foam core composite sandwich manufacturing // Composite structures. 2004. T. 66. №. 1-4. C. 231-238.
23. Sun Z. et al. Effect of expansion rate on interfacial mechanical properties and failure mechanism of sandwich composites prepared via thermal expansion molding process // Engineering Failure Analysis. 2024. T. 161. C. 108246.

Authors of the publication

Kristina A. Andrianova – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0001-9011-6856>. *KAAndrianova@kai.ru*

Aeraiguli Kuomalibieke – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. *arai0415@mail.ru*

Denis A. Bubnov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. *DABubnov@kai.ru*

Liliya M. Amirova – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. *ORCID**: <http://orcid.org/0009-0008-7605-2743/>. *amirovaliliyam@mail.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **14.01.2026 г.**

Отредактировано **26.01.2026 г.**

Принято **13.02.2026 г.**



РАСЧЕТ ЗМЕЕВИКОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РАДИУСОМ ИЗГИБА ВИНТОВОЙ СПИРАЛИ

Крутова И.А., Золотоносов Я.Д.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия

iraida_knyazeva@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке методики инженерного расчета современных змеевиковых теплообменных аппаратов на базе инновационных теплообменных элементов виде пружинно-витого канала. ЦЕЛЬ. Проведение расчетов змеевиковых теплообменных аппаратов типа «труба в трубе» с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали на базе пружинно-витых каналов и оценка энергетической эффективности таких аппаратов по сравнению с гладкостенными аналогами. МЕТОДЫ. В рамках работы скорректирован инженерный расчет конического змеевикового аппарата, основанный на теоретических исследованиях и решении сопряженной задачи теплообмена, и включает в себя уравнения модифицированного поправочного коэффициента Иешке, критериальные уравнения для расчета теплообмена с нагревающейся (горячей) и нагреваемой (холодной) водой, определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи через теплообменную поверхность. Предложенные коэффициенты критериального уравнения позволяют с высокой точностью проводить сравнительный анализ эффективности змеевиковых теплообменных аппаратов на базе пружинно-витых каналов, учитывая разнообразие их конфигураций. РЕЗУЛЬТАТЫ. В змеевиковом теплообменнике с пружинно-витыми трубами температура нагреваемого теплоносителя выше на 8,88°C (60,98°C против 52,1°C) по сравнению с гладкостенными трубами. Коэффициент теплопередачи у пружинно-витых труб (1543 Вт/(м²·К)) выше за счет турбулентности и вторичных потоков. Превосходство пружинно-витых каналов подтверждается более высоким значением критерия Кирпичева (17,83) по сравнению с гладкостенными аналогами (14,77), что характеризует их улучшенные энергетические показатели. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Были проведены расчеты змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе» с изменяющимся радиусом изгиба спирали на базе двух вариантов теплообменных элементов: пружинно-витого-канала и гладкой трубы. Полученные данные согласуются с результатами математического моделирования и подтверждают техническую и энергетическую целесообразность замены гладких трубок на пружинно-витые в конструкциях теплообменных аппаратов. Это позволяет повысить тепловую производительность системы и снизить эксплуатационные энергозатраты на перемещение теплоносителя, что приводит к значительному увеличению общей энергоэффективности системы.

Ключевые слова: теплообмен; гидродинамика; змеевиковый теплообменный аппарат; пружинно-витой канал; инженерный расчет.

Для цитирования: Крутова И.А., Золотоносов Я.Д. Расчет змеевиковых теплообменников с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 179-194. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-179-194.

CALCULATION OF COIL HEAT EXCHANGERS WITH VARIABLE BENDING RADIUS OF A HELICAL SPIRAL

Krutova I.A., Zolotonosov Ya.D.

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

iraida_knyazeva@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Due to the significant variety of configurations of heat exchange elements and designs of heat exchangers, coefficients of the criterion equation are proposed, which allows for a more accurate comparative evaluation of the efficiency of coil heat exchangers based on spring-twisted channels. *THE PURPOSE.* Carrying out calculations of coil heat exchangers of the "pipe in a pipe" type with a variable bending radius of a helical spiral based on spring-twisted channels and evaluating the energy efficiency of such devices in comparison with smooth-walled analogues. *OBJECT* of this study is a conical apparatus with coaxially mounted coil tubes. In this case, the inner tube is made in the form of a spring-twisted channel of circular cross-section, and the outer one is made of smooth pipe. *METHODS.* As part of the work, the engineering calculation of the conical coil apparatus has been adjusted, based on theoretical research and solving the related heat exchange problem, and includes the equations of the modified Ieshke correction factor, criterion equations for calculating heat exchange with heated (hot) and heated (cold) water, and the determination of heat transfer and heat transfer coefficients through the heat exchange surface. *RESULTS.* In a coil heat exchanger with spring-wound pipes, the temperature of the heated coolant is 8.88°C (60.98°C versus 52.1°C) higher than in smooth-walled pipes. The thermal efficiency of such structures is higher: the power is 25.6 kW at a drop of 20.7°C versus 23.5 kW and 20.4°C, respectively. Heat transfer coefficient of spring-twisted pipes (1543 W/(m²·K)) higher due to turbulence and secondary flows. Hydrodynamic analysis shows a reduction in the cost of pumping heat carriers based on spring-twisted channels to 1,438 Watts compared with 1,590 watts for smooth-walled structures. This is due to the shorter required length of the heat exchange element. The superiority of spring-twisted channels is confirmed by a higher value of the Kirpichev criterion (17,83) compared to smooth-walled analogues (14,77), which characterizes their improved energy performance. *CONCLUSION.* Calculations of coil heat exchangers of the "pipe in a pipe" type with a variable bending radius of the spiral were carried out on the basis of two variants of heat exchange elements: a spring-twisted channel and a smooth pipe, the data obtained are consistent with the results of mathematical modeling. The results of the calculation confirm the technical and energy feasibility of replacing smooth tubes with spring-twisted tubes in the designs of heat exchangers. This modification makes it possible to simultaneously increase the thermal performance of the system and reduce the operational energy consumption for moving the coolant, which leads to a significant increase in the overall energy efficiency of the system. Thus, the use of spring-wound elements in heat exchangers is an innovative solution that improves the efficiency and reliability of heat exchange technology.

Keywords: heat transfer; hydrodynamics; coil heat exchanger; spring-twisted channel; engineering calculation.

For citation: Krutova I.A., Zolotonosov Ya.D. Calculation of coil heat exchangers with variable bending radius of a helical spiral. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 179-194. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-179-194.

Введение (Introduction)

Теплообменное оборудование занимает значительную часть в структуре основных фондов предприятий химической, нефтехимической отраслей и жилищно-коммунального хозяйства, достигая в среднем 25-60%. За двадцатилетний период износ основных фондов в сфере жилищно-коммунального хозяйства составляет порядка 60%.

В этих условиях вопрос модернизации теплообменных аппаратов приобретает особую значимость. Центральное место в решении данной проблемы занимает поиск и внедрение способов интенсификации теплообмена, оптимальных с позиций технико-экономической эффективности. Представляется целесообразным рассматривать совершенствование теплообменной техники как комплексную задачу, требующую сбалансированного учёта эксплуатационных характеристик и экономической целесообразности применяемых решений.

Для решения поставленной задачи авторами был разработан целый класс теплообменных элементов на базе пружинно-витого канала различной конфигурации, описанные в работе [1]. Это и прямой пружинно-витой канал, и пружинно-итого канала типа «конфузор-диффузор». Также для интенсификации теплообмена авторами предложено установить между витками спиральный интенсификатор или модифицировать проточную часть пружинно-витой трубы путём формирования чередующихся выступов и лысок, расположенных с определённым шагом. Кроме того, предлагается выполнить проточную часть пружинно-витого теплообменного элемента на

конус.

Разработанные конфигурации теплообменных элементов могут быть применены как в существующих конструкциях кожухотрубчатых теплообменных аппаратах, так и быть центральным элементом инновационных теплообменных аппаратов.

Авторами в работе [1] предложены конструкции теплообменных аппаратов типа «труба в трубе» на базе пружинно-витых каналов: цилиндрической, конической и сферической формы.

Они отличаются небольшими массогабаритными размерами и высокой эффективностью процессов теплообмена.

Как показывают исследования [2, 3], конические ТА демонстрируют более высокую эффективность по сравнению с цилиндрическими аналогами.

В работах [4-6] были проведены исследования и представлены результаты решения сопряженной задачи теплообмена для конических теплообменных аппаратов.

Было установлено, что замена гладкой трубы на пружинно-витой канал является перспективным направлением. Разница температур нагреваемого теплоагента на выходе из теплообменных аппаратов на базе гладких труб требует дополнительного изучения влияния геометрических параметров змеевика на теплообменные процессы.

Также было установлено, что распределение скорости по сечению теплообменного элемента наиболее равномерно при применении пружинно-витого канала, что свидетельствует о наличии поперечной циркуляции в канале. Благодаря возникающей поперечной циркуляции фактическая скорость жидкости в изогнутой трубе значительно превышает среднюю скорость осевого потока. Это приводит к существенному росту обмена энергией между ядром потока и ламинарным подслоем и, как следствие, к увеличению интенсивности теплообмена.

Целью исследования данной работы является проведение расчетов змеевиковых теплообменных аппаратов типа «труба в трубе» с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали на базе пружинно-витых каналов и оценка энергетической эффективности таких аппаратов.

Научная значимость исследования состоит в том, что на основе теоретических исследований и решения сопряженной задачи теплообмена предложен алгоритм инженерного расчета змеевикового аппарата с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали с уравнениями модифицированного поправочного коэффициента Иешке, критериальные уравнения для нагревающейся (горячей) и нагреваемой (холодной) воды. Определены коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи через теплообменную поверхность. Отклонением теоретических значений от расчетных по критериальным уравнениям не превышает $\pm 12\%$.

Практическая значимость исследования заключается в том, что ввиду значительного разнообразия конфигураций теплообменных элементов и конструкций теплообменных аппаратов предложены коэффициенты критериального уравнения, что позволяет с большей точностью проводить оценочный сравнительный анализ эффективности работы змеевиковых теплообменных аппаратов на базе пружинно-витых каналов.

Литературный обзор (Literature Review)

В последние годы учёные активно используют численные методы для анализа процессов теплопередачи в различных теплообменных аппаратах, уделяя особое внимание змеевиковым теплообменникам, которые находят применение в различных отраслях промышленности.

В рамках этих исследований изучаются тепловые и гидравлические характеристики змеевиковых теплообменников. Особое внимание уделяется получению уравнений для определения числа Нуссельта, коэффициента трения и общего коэффициента теплопередачи. Эти уравнения играют ключевую роль в инженерных расчётах при проектировании таких теплообменников.

В работе [7] выполнено трёхмерное моделирование процессов теплопередачи и гидродинамики при турбулентном и ламинарном режимах течения воды в межтрубном пространстве конических теплообменников типа «труба в трубе».

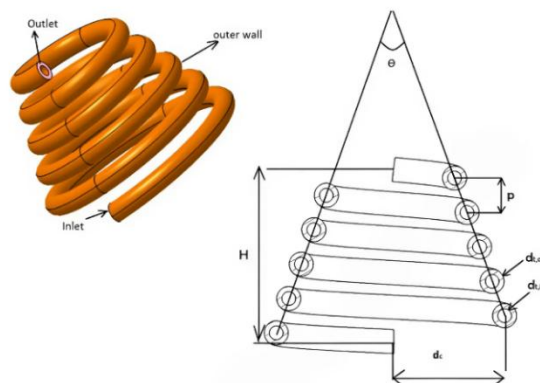


Рис. 1. Модель теплообменного аппарата с его геометрическими характеристиками

Fig. 1. The modeled heat exchanger with its geometrical characteristics

*Источник: [7] Source: [7].

Для исследования влияния турбулентных эффектов на процессы теплообмена была использована стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности. В результате анализа было установлено, что при увеличении угла конусности с 0° до 90° значения коэффициента гидравлического сопротивления и числа Нуссельта возрастают на 15,51% и 37,17% соответственно. Также было установлено, что при увеличении отношения диаметра внешней трубы к диаметру внутренней трубы на 50% происходит рост числа Нуссельта на 39,11% и снижение коэффициента гидравлического сопротивления на 23,29%. Соотношение диаметров внешней трубы и диаметра змеевика оказывает меньшее влияние на процессы теплообмена. При увеличении отношения диаметра внешней трубы к максимальному диаметру змеевика на 50% коэффициент трения и число Нуссельта увеличиваются на 4,47% и 8,38% соответственно. На основании полученных данных предложены новые зависимости для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления (f) и числа Нуссельта (Nu) в межтрубном пространстве теплообменника.

$$Nu = 0,0224 Re_t^{0,8113} Pr^{0,389} \left(\frac{d_{t,0}}{d_{c,max}} \right)^{0,1079} \left(\frac{d_{t,0}}{d_{t,i}} \right)^{2,15} (360 - \theta)^{-0,208},$$

$$f = 19,496 Re_t^{-0,262} \left(\frac{d_{t,0}}{d_{c,max}} \right)^{0,1985} \left(\frac{d_{t,0}}{d_{t,i}} \right)^{-0,654} \left(\frac{p}{d_{c,max}} \right)^{0,0625} (360 - \theta)^{-0,456},$$

где θ – угол при вершине конуса, $d_{t,0}$ – внешний диаметр межтрубного пространства, $d_{t,i}$ – внутренний диаметр межтрубного пространства, $d_{c,max}$ – наибольший диаметр основания конуса, p – шаг между витками.

Разработанные уравнения могут быть использованы для инженерных расчётов при проектировании подобных теплообменных аппаратов.

Кроме этого, в работе [8] были проведены экспериментальные исследования тепловых и гидродинамических характеристик конического спирального теплообменника типа «труба в трубе» (ТТССНЕ) с целью улучшения его тепловых характеристик. В рамках исследования были изучены эффекты различных конструктивных параметров: степень скручивания спирали (λ), углы наклона (α) теплообменного аппарата относительно горизонтальной оси, число Дина (Dn) и схемы движения жидкости как внутри трубы, так и в межтрубном пространстве.

Были спроектированы, изготовлены и испытаны три тестовых образца с различными значениями шага между витками. Также исследовались три различных угла наклона спирали (α): 0° , 45° и 90° .

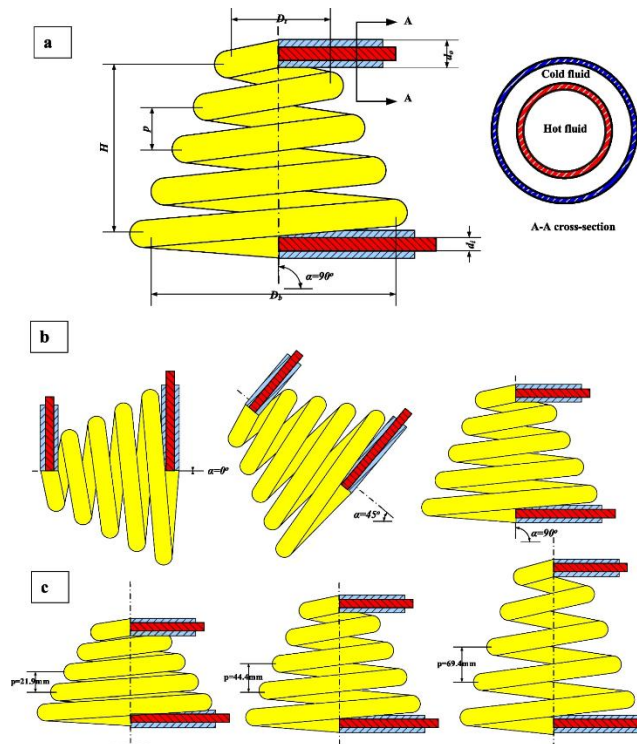


Рис. 2. Принципиальная схема ТТССНЕ: a) физические размеры, b) различные углы наклона α и c) различные значения степени скручивания спирали λ

*Источник: [8] Source: [8].

Экспериментальные работы проводились при значениях числа Рейнольдса (Re) для внутренней поверхности трубы $12300 \leq Re_i \leq 62600$ и для межтрубного пространства в диапазоне чисел $2500 \leq Re_o \leq 18500$.

Результаты исследования показали, что наименьший шаг между витками приводит к значительному увеличению числа Нуссельта как для трубного, так и для межтрубного пространства, на 40,9% и 32,2% соответственно. Угол наклона змеевика, равный 90° оказывает заметное влияние на увеличение числа Нуссельта для трубного и межтрубного пространства по сравнению с углом 45° , на 23,7% и 21,6% соответственно. При этих геометрических параметрах достигаются максимальные критерии термогидравлической эффективности.

Также в работе [8] были разработаны новые корреляционные зависимости для прогнозирования числа Нуссельта (Nu) и коэффициента гидравлического сопротивления (f) как для трубного, так и для межтрубного пространства.

Уравнения для трубного пространства имеют следующий вид:

$$Nu_i = 13,177 Dn_i^{0,569} Pr_i^{-2,575} \lambda^{-0,347}$$

$$f_i = 0,241 \cdot Dn_i^{-0,2668} \lambda^{-0,0754}$$

Данные уравнения справедливы для следующих диапазонов параметров $2000 \leq Dn_i \leq 10833$, $3,19 \leq Pr_i \leq 4,08$, $0,035 \leq \lambda \leq 0,111$ и $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

Уравнения для межтрубного пространства записаны как:

$$Nu_o = 4,093 Dn_o^{1,238} Pr_o^{-3,849} \lambda^{-0,225}$$

$$f_o = 0,121 Dn_o^{-0,1877} \lambda^{0,0979}$$

Приведенные уравнения справедливы для следующих диапазонов параметров $430 \leq Dn_o \leq 3200$, $4,8 \leq Pr_o \leq 6,3$, $0,035 \leq \lambda \leq 0,111$, $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

В рамках исследования [9] были изучены рабочие характеристики трёхконического трубчатого теплообменника (ТТССНЕ) с применением экспериментальных и численных методов. Новая конструкция теплообменника разработана на основе двухконического трубчатого теплообменника (ДСТНЕ) путем внедрения дополнительного канала для циркуляции жидкости, внешний вид ТТССНЕ представлен на рисунке 3. Основной целью исследования являлось определение тепловых характеристик ТТССНЕ при различных значениях ключевых параметров, включая число Рейнольдса для воды, изменение входной температуры воды, схемы потока, углы наклона и соотношение шагов змеевика.

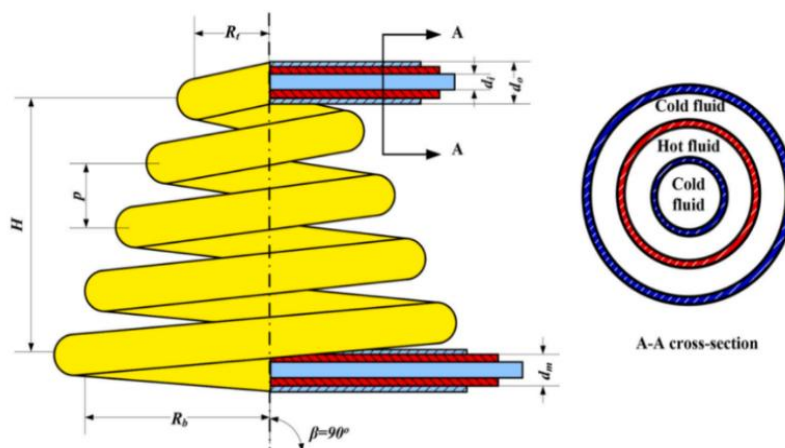


Рис. 3. Принципиальная схема ТТССНЕ: Fig. 3. Schematic diagram of a TCCHE: а) физические размеры, б) различные углы наклона α и в) различные значения степени скручивания спирали λ

*Источник: [8] Source: [8].

Экспериментальные исследования проводились в диапазоне числа Дина от 450 до 6200, что соответствует числам Рейнольдса от 2750 до 35 050.

В работе [9] были предложены следующие уравнения для числа Нуссельта (Nu), коэффициента трения (f) и эффективности (ϵ) теплообменника:

$$Nu_h = 1,303 Dn_h^{0,488} Pr_h^{0,762} \lambda^{0,0246}$$

$$f_h = 17,85 e^{-2} Dn_h^{-0,2055} Pr_h^{0,1607} \lambda^{0,00902}$$

$$\epsilon = 3,848 Dn_h^{-0,28} Pr_h^{0,2563} \lambda^{0,00716}$$

В [10] представлен комплексный обзор, посвященный пассивным методам интенсификации теплообмена в змеевиковых теплообменных аппаратах. В статье подробно анализируются такие методы интенсификации как: оребрение труб, установка внутренних вставок, модификация геометрии каналов и применение перегородок.

В результате обзора (более 150 источников) авторы проводят оценку существующих пассивных методов и выделяют следующие основные моменты:

- применение оребрения увеличивает площадь теплопередачи и турбулентность потока, что приводит к повышению коэффициента теплопередачи до 30%.

- при всех пассивных методах коэффициент теплопередачи возрастает с увеличением массового расхода и числа Рейнольдса.

- установка спирально-винтовой ленты, по сравнению с витой лентой, способствует увеличению скорости теплообмена за счёт более интенсивного завихрения потока и более длительного периода пребывания жидкости в зоне интенсивного теплообмена.

- существующие исследования сосредоточены на экспериментальных и численных методах улучшения теплопередачи в зонах интенсивного теплообмена. Однако, существует проблема негативного влияния роста перепада давления (ΔP) на прочностные характеристики стенки труб, необходимо проводить исследования в этом направлении.

- повышение эффективности теплопередачи в змеевиковых теплообменниках является перспективным направлением исследований, особенно в контексте стремления промышленных предприятий к созданию более эффективных систем терморегулирования.

- изучение влияния различных методов обработки поверхности (нанесение нанопокровов или создание микронеровностей) на скорость теплопередачи является важным направлением в области теплопередачи.

- использование технологий быстрого прототипирования позволяет создавать специально разработанные спиральные витки, которые улучшают теплопередачу благодаря лучшему перемешиванию жидкостей.

- геометрические изменения поверхностей труб в змеевиковых теплообменных аппаратах имеют важное значение для будущих применений. Например, установка различных турбулизаторов и перегородок, что изменяет траекторию потока от осевой до

вихревой. Были протестированы различные формы турбулизаторов потока, включая одиночные трапецевидные, прямоугольные, треугольные, конические, пилообразные и множественные турбулизаторы. Также проведено сравнение эффекта от ориентации дефлекторов, таких как трапецевидные и пилообразные, при турбулентном потоке. Результаты показали, что увеличение числа турбулизаторов приводит к повышению среднего значения числа Нуссельта со стороны межтрубного пространства при росте перепада давления.

– для оптимизации конструктивных параметров змеевиковых теплообменников, таких как диаметр змеевика и шаг, рекомендуется использовать передовые методы компьютерного моделирования.

– нанесение покрытий на трубы высокого давления является важным аспектом, который выбирается в зависимости от рабочей температуры и условий эксплуатации. Вопросы, связанные с методами нанесения покрытий (в полевых условиях или в мастерской), а также их отверждением (при нагревании или при комнатной температуре), требуют дальнейшего изучения. Обычно используются эпоксидно-фенольные, эпоксидно-новолачные смолы и бисфенол-А. В состав покрытий входят политетрафторэтилен (тефлон), пигменты на основе углерода, чистые фторполимеры и другие пигменты для улучшения антиадгезионных свойств.

В работе [11] также указывается, что применение интенсификаторов в змеевиковых ТА способствует ускорению потока. В случае с кольцевыми и «винтовыми» интенсификаторами увеличение скорости движения теплоагента наблюдается по всему сечению канала.

Применение рассмотренных в работе [11] турбулизаторов приводит к увеличению интенсивность теплообмена с ростом гидравлического сопротивления. Авторы отмечают необходимость определения оптимальных геометрических размеров интенсификаторов при разработке теплотехнических систем.

Материалы и методы (Materials and methods)

Внешний вид исследуемого ТА показан на рисунке 4 и представляет собой конический аппарат с коаксиально установленными змеевиковыми трубами. При этом внутренняя труба выполнена в виде пружинно-витого канала круглого сечения, а внешняя – из гладкой трубы.

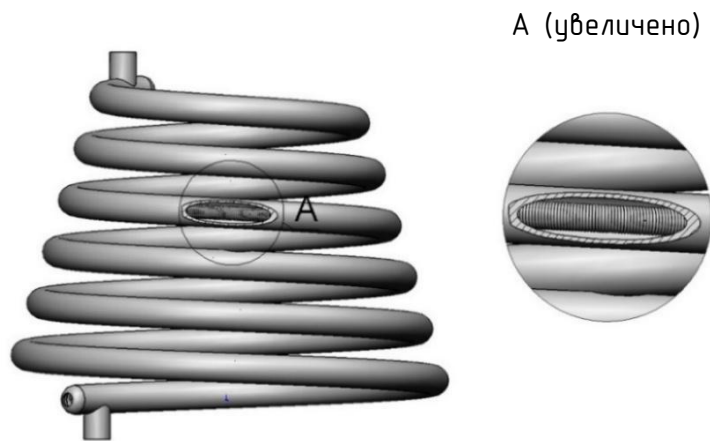


Рис. 4. Конический змеевиковый аппарат с теплообменным элементом в виде пружинно-витого канала

*Источник: [4] Source: [4].

Fig. 4. A coil apparatus of the "pipe in a pipe" type, made on a cone with a heat exchange element in the form of a spring-twisted channel

В работе [12] был проведен расчет и оценка эффективности змеевиковых аппаратов с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали для однострунных и секционных змеевиков с гладкой трубой, их сравнение с цилиндрическим змеевиковым теплообменником. Было установлено, что металлоемкость конических змеевиков снижается на 8-15% по сравнению с цилиндрическими.

На основании ранее проведенных исследований предлагается совершенствование теплообменного оборудования путем его модернизации и замены на теплообменные аппараты типа «труба в трубе» с теплообменным элементом на базе пружинно-витого канала, имеющего двухстороннее ребрение.

Тем не менее, чтобы предложить оборудование такого рода необходимо провести оценку эффективности его работы по сравнению с уже известными аналогами. С этой целью произведем инженерный расчет теплообменных аппаратов и определим их теплогидродинамические характеристики.

Тепловой расчет теплообменных аппаратов базируется на фундаментальных принципах теплового баланса и теплопередачи, однако их практическое применение сопряжено с определенными вычислительными сложностями. В аппаратах типа «жидкость-жидкость» расчет среднего температурного напора требует знания предельных температурных разностей, которые изначально неизвестны ввиду того, что температура одного из теплоносителей на выходе определяется из уравнения теплового баланса через значение температуры на выходе другого теплоносителя, которая заранее неизвестна. Данное обстоятельство обуславливает необходимость итерационного подхода при заданных площадях теплообменных поверхностей, существенно усложняя инженерные расчеты.

Специфика змеевиковых теплообменников с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали заключается в том, что коэффициенты теплоотдачи в трубах непостоянны по длине канала и зависят от значений радиуса изгиба. Вследствие этого распределение температуры теплоносителей вдоль труб отклоняется от классического профиля, характерного для случаев с условно постоянным средним коэффициентом теплопередачи.

Аналитическое решение задачи теплообмена при турбулентных течениях в змеевиковых теплообменниках типа «труба в трубе» позволяет получить данное распределение как частный случай. Разработанная математическая модель описывает температурный профиль теплоносителя посредством интегральных выражений, учитывающих продольную вариацию как коэффициента теплопередачи, так и геометрических параметров змеевиковых конструкций.

В результате возникновения вторичных потоков в поперечных сечениях змеевиковых труб увеличивается коэффициент теплоотдачи α_m от жидкости к стенке. Математически это явление можно записать в следующем виде:

$$\alpha_m = \varepsilon \cdot \alpha_{m0},$$

где α_{m0} – коэффициент теплоотдачи в прямолинейных трубах; ε – коэффициент Иешке, величина которого для змеевиков с постоянным радиусом определяла согласно формуле:

$$\varepsilon = 1 + 3,54 \frac{d_m}{2R}, \quad (1)$$

где d_m – внутренний диаметр труб, R – радиус изгиба змеевиковых труб.

При изменяющемся радиусе изгиба змеевиковых труб значение коэффициента Иешке также меняется вдоль этой кривой, и тогда вместо (1) следует использовать обобщенную формулу, предложенную авторами [13]:

$$\varepsilon(\tau) = 1 + 3,54 \frac{d_m}{2\rho(\tau)} \quad (2)$$

где τ – параметр параметрически заданной кривой; $\rho(\tau)$ – радиус кривизны центральной осевой линии этих труб.

Полный вывод уравнения для определения кривизны центральной осевой линии $\rho(\tau)$ в случае змеевикового конического теплообменного приведен в работе [13], окончательно оно принимает следующий вид:

$$\rho(\tau) = \frac{\left(\sqrt{\left(\frac{D_2 - D_1}{2t_{\max}} \right)^2 + \left(\frac{D_1 + D_2 - D_1}{2} \tau \right)^2} + b^2 \right)^3}{\sqrt{\left(\frac{D_1 + D_2 - D_1}{2} \tau \right)^2 + \left(\frac{D_2 - D_1}{2t_{\max}} \right)^2} b^2 + \left(\left(\frac{D_2 - D_1}{2t_{\max}} \right)^2 + \left(\frac{D_1 + D_2 - D_1}{2} \tau \right)^2 \right)^2}, \quad (3)$$

где D_1 – верхний диаметр змеевикового теплообменного аппарата, м; D_2 – нижний диаметр змеевикового теплообменного аппарата, м; t_{\max} – параметр винтовой линии, задаваемый количеством витков змеевика.

Для определения коэффициентов теплообмена при турбулентном движении жидкости в коническом змеевиковом теплообменном аппарате типа «труба в трубе» на базе пружинно-витого канала использовался метод наименьших квадратов.

Предполагая, что критериальное уравнение может быть записан в виде:

– для трубного пространства:

$$Nu = A Re^n Pr^m \varepsilon_{sh},$$

– для межтрубного пространства:

$$Nu = A Re^n Pr^m \left(\frac{D}{d_{экс}} \right)^p \varepsilon_{sh},$$

где ε_{sh} – поправочный коэффициент на искусственную шероховатость труб.

Были проанализированы результаты, полученные в ходе решения сопряженной задачи, подробно методика решения описана в работе [4].

Для нахождения поправочного коэффициента на искусственную шероховатость труб применяется следующая формула [14]:

$$\varepsilon_{sh} = 1,04 Pr^{0,04} \text{Exp} \left[0,85 \frac{s_{pr}}{13} \right],$$

где s_{pr} – относительный шаг искусственной шероховатости труб,

$$s_{pr} = \frac{d_{pr}}{h_{pr}},$$

d_{pr} – диаметр проволоки, м; h_{pr} – высота выступа искусственной шероховатости с учетом толщины стенки пружинно-витой трубы δ_{pr} , образованной сваркой проволоки.

$$h_{pr} = \frac{(d_{pr} - \delta_{pr})}{2}.$$

Результаты вычислений приведены в таблице 1, где греющая вода обозначена как ГВ, а нагреваемая вода НВ, далее в расчетах для греющей воды будет применяться индекс $i=h$, а для нагреваемой $i=c$.

Таблица 1
Table 1

Результаты математического моделирования
Results of mathematical modeling

	Наименования параметров и переменных	Расход воды G_i , кг/с	Температура воды на входе t_{in} , °C	Температура воды на выходе t_{out} , °C	Средняя температура воды t_f , °C	Температура стенки t_{ct} , °C	Средняя температура стенки, t_{ct} , °C
1	ГВ, гладкая круглая труба	0,22	70	43,20	59,5	49,75	46,81
	НВ, гладкая круглая труба	0,11	5	52,1	39,1	43,86	
2	ГВ, пружинно-витой канал	0,22	70	43,00	60,39	53,50	49,92
	НВ, пружинно-витой канал	0,11	5	60,98	39,70	46,34	

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

Для обработки результатов была использована программа обработки электронных таблиц Microsoft Excel. Авторами статьи были получены следующие критериальные уравнения:

– для трубного пространства пружинно-витого канала:

$$Nu = 0,019 Re^{0,78} Pr^{0,45} \left(\frac{Pr}{Pr_{ct}} \right)^{0,3} \varepsilon_{sh},$$

– для межтрубного пространства:

$$Nu = 0,017 Re^{0,79} Pr^{0,32} \left(\frac{D}{d_{экс}} \right)^{0,26} \varepsilon_{sh}.$$

Приведенные выше уравнения справедливы в диапазоне изменения числа Рейнольдса от 12000 до 26000.

Авторами ранее была предложена формула для определения эквивалентного диаметра пружинно-витого канала:

$$d_{\text{экв}} \approx \left(\frac{d}{2}\right) k \frac{-3\pi^5 k - 6\pi^3 k^3 + 6\pi k^4 - 3\pi k^5 + 6\pi^2 k^4 (2+k^2) + \pi^4 (6+4k^2)}{3\pi^3 (\pi^2 + k^2)^{1/2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left(1 + \left(\frac{k}{\pi}\right)^2 - k \cos v\right) \sqrt{1 + 2\left(\frac{k}{\pi}\right)^2 + k \cos(2v)} dv} \quad (4)$$

где v, k – геометрический параметр поверхности, $k = d / D$; $d/2$ – расстояние от центральной винтовой линии – оси проволоки до центра трубы.

Результаты (Results)

Проведем инженерный расчет конического теплообменного аппарата с учетом вышеприведенных формул и используя результаты математического моделирования:

Модель представляет собой теплообменный аппарат типа «труба в трубе», внешняя труба с внутренним диаметром $D_{in}=32$ мм и толщиной стенки $\delta=2$ мм, теплообменный элемент представляет собой пружинно-витой канал со средним диаметром $d_{cp}=17$ мм, выполненный из проволоки диаметром 2 мм, вторым рассматриваемым вариантом является гладкая труба с внешним диаметром $d_{ou}=19$ мм и внутренним диаметром $d_{in}=15$ мм. В трубное пространство со стороны нижнего основания подается холодный теплоноситель (вода) с начальной температурой $t_{cin}=5^\circ\text{C}$, расход нагреваемой воды составляет $G_c = 400$ кг/ч. Через штуцер, установленный на верхнем основании, в межтрубное пространство подается горячий теплоноситель (вода) с начальной температурой $t_{hin}=70^\circ\text{C}$, расход греющей воды составляет $G_h = 802$ кг/ч. Схема движения теплоносителей – противоточная (рис. 5).

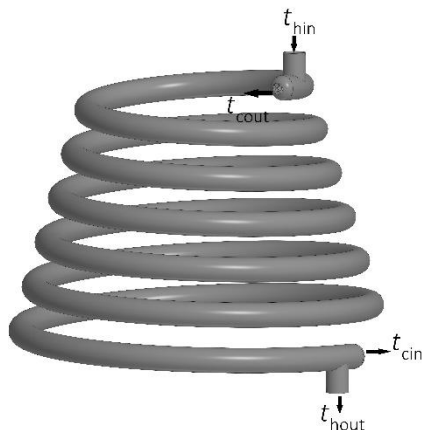


Рис. 5. Схема движения теплоносителей в коническом змеевиковом аппарате с теплообменным элементом в виде пружинно-витого канала

Fig. 5. Scheme of the movement of heat carriers in a conical coil apparatus with a heat exchanger element in the form of a spring-twisted channel

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

1. Находим разности температур теплоносителей на входе и выходе из аппарата:

а) при использовании гладких круглых труб

$$\Delta t_{\text{ex}} = \Delta t_{\text{max}} = t_{\text{hou}} - t_{\text{cin}} = 43,2 - 5 = 38,2^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{вых}} = \Delta t_{\text{min}} = t_{\text{hin}} - t_{\text{cou}} = 70 - 52,1 = 17,9^\circ\text{C}$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$\Delta t_{\text{ex}} = \Delta t_{\text{max}} = t_{\text{hou}} - t_{\text{cin}} = 43 - 5 = 38^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{вых}} = \Delta t_{\text{min}} = t_{\text{hin}} - t_{\text{cou}} = 70 - 60,98 = 9,02^\circ\text{C}$$

2. Находим общее количество тепла, переданного через теплообменную поверхность из уравнения теплового баланса

а) при использовании гладких круглых труб

$$Q_h = G_h c_p (t_{\text{hin}} - t_{\text{hou}}) = 0,223 \cdot 4190 \cdot (70,0 - 43,2) = 25004,1 \text{ Вт};$$

$$Q_c = G_c c_p (t_{\text{cou}} - t_{\text{cin}}) = 0,111 \cdot 4190 \cdot (52,1 - 5,0) = 21943,5 \text{ Вт};$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$Q_{hpr} = G_h \cdot c_p \cdot (t_{hin} - t_{houpr}) = 0,223 \cdot 4190 \cdot (70,0 - 43,0) = 25228,3 \text{ Вт};$$

$$Q_{cpr} = G_c \cdot c_p \cdot (t_{coupr} - t_{cin}) = 0,111 \cdot 4190 \cdot (60,98 - 5,0) = 26035,74 \text{ Вт};$$

3. Средние температуры теплоносителей были определены при проведении математического моделирования в программе Ansys Fluent и приведены в таблице 1.

Физические свойства воды при данных температурах приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Физические свойства воды в трубном и межтрубном пространстве
Physical properties of water in the tubular and intertubular space

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	Pr	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$
40	992	3,309	$0,66 \cdot 10^{-6}$	0,653
60	983	4,74	$0,46 \cdot 10^{-6}$	0,629

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

4. Находим скорости потоков, кинематическую вязкость и другие теплофизические характеристики по таблицам для теплоносителей и стенки при их средних температурах.

Скорость нагревающего теплоносителя

а) при использовании гладких круглых труб

$$w_h = \frac{4G_h}{\rho_h \pi (D_{in}^2 - d_{ou}^2)} = \frac{4 \cdot 0,223}{983 \cdot 3,14 \cdot (0,032^2 - 0,019^2)} = 0,436 \text{ м/с};$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$w_{hpr} = \frac{4G_h}{\rho_h \pi (D_{in}^2 - d_{ouзв}^2)} = \frac{4 \cdot 0,223}{983 \cdot 3,14 \cdot (0,032^2 - 0,0166^2)} = 0,386 \text{ м/с};$$

Скорость нагреваемого теплоносителя

а) при использовании гладких круглых труб

$$w_c = \frac{4G_c}{\rho_c \pi d_{in}^2} = \frac{4 \cdot 0,111}{992 \cdot 3,14 \cdot 0,015^2} = 0,634 \text{ м/с};$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$w_{cpr} = \frac{4G_c}{\rho_c \pi d_{inpr}^2} = \frac{4 \cdot 0,111}{992 \cdot 3,14 \cdot (0,0164)^2} = 0,531 \text{ м/с};$$

5. Находим числа Рейнольдса для теплоносителей.

– для нагревающего теплоносителя:

а) при использовании гладких круглых труб

$$Re_h = \frac{w_h (D_{in} - d_{out})}{\nu_h} = \frac{0,436 \cdot (0,032 - 0,019)}{0,469 \cdot 10^{-6}} = 12053,57;$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$Re_{hpr} = \frac{w_{hpr} (D_{in} - d_{outpr})}{\nu_{hpr}} = \frac{0,386 \cdot (0,032 - 0,0166)}{0,463 \cdot 10^{-6}} = 12827,612;$$

– для нагреваемого теплоносителя:

а) при использовании гладких круглых труб

$$Re_c = \frac{w_c d_{in}}{\nu_c} = \frac{0,634 \cdot 0,015}{0,669 \cdot 10^{-6}} = 14186,82;$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$Re_{cpr} = \frac{w_{cpr} d_{inpr}}{\nu_{cpr}} = \frac{0,531 \cdot 0,0164}{0,663 \cdot 10^{-6}} = 13141,89;$$

6. Находим числа Нуссельта для теплоносителей, режим течения греющей воды турбулентный, соответственно числа рассчитываются по следующим формулам:

– для нагревающего теплоносителя

а) при использовании гладких круглых труб

$$Nu_h = 0,017 Re_h^{0,82} Pr_h^{0,4} \left(\frac{Pr_h}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \left(\frac{D_{in}}{d_{ou}} \right)^{0,18},$$

$$Nu_h = 0,017 \cdot 12053,57^{0,82} 3,37^{0,4} \left(\frac{3,37}{4,25}\right)^{0,25} \left(\frac{0,032}{0,019}\right)^{0,18} = 52,69;$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$Nu_{hpr} = 0,017 \cdot Re_{hpr}^{0,79} Pr_{hpr}^{0,32} \left(\frac{D_{in}}{d_{ouЭКВ}}\right)^{0,26} \varepsilon_{sh},$$

$$\varepsilon_{sh} = 1,04 Pr^{0,04} Exp\left[0,85 \frac{S_{pr}}{13}\right] = 1,04 \cdot 3,309^{0,04} Exp\left[0,85 \frac{0,002}{0,0005 \cdot 13}\right] = 1,41,$$

$$Nu_{hpr} = 0,017 \cdot 12827,61^{0,79} 3,309^{0,32} \left(\frac{0,032}{0,0166}\right)^{0,26} 1,41 = 73,37;$$

– для нагреваемого теплоносителя

а) при использовании гладких круглых труб

$$Nu_c = 0,021 Re_c^{0,8} Pr_c^{0,43} \left(\frac{Pr_c}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} = 0,021 \cdot 12053,57^{0,8} 4,78^{0,43} \left(\frac{4,78}{4,25}\right)^{0,25} = 88,84;$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$Nu_{cpr} = 0,019 \cdot Re_{cpr}^{0,78} Pr_c^{0,45} \left(\frac{Pr_c}{Pr_{ст}}\right)^{0,3} \varepsilon_{sh},$$

$$\varepsilon_{sh} = 1,04 Pr^{0,04} Exp\left[0,85 \frac{S_{pr}}{13}\right] = 1,04 \cdot 4,75^{0,04} Exp\left[0,85 \frac{0,002}{0,0005 \cdot 13}\right] = 1,43,$$

$$Nu_{cpr} = 0,019 \cdot 13141,89^{0,78} 4,75^{0,45} \left(\frac{4,75}{4,04}\right)^{0,3} 1,43 = 93,76;$$

7. Находим коэффициенты теплоотдачи для теплоносителей

Коэффициент теплоотдачи равен:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d};$$

Так как движение теплоносителей происходит по сложной траектории и возникают вторичные потоки в поперечных сечениях змеевиковых труб, то коэффициент теплоотдачи рассчитывается с учетом поправочного коэффициента (Иешке) по формуле (2), с учетом значений, полученных с применением формулы (3).

– для нагревающего теплоносителя

а) при использовании гладких круглых труб

$$\alpha_h = \varepsilon(\tau) \cdot Nu_h \cdot \frac{\lambda}{(D_{in} - d_{ou})} = 1,112 \cdot 52,69 \cdot \frac{0,65}{(0,032 - 0,019)} = 2942 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$\alpha_{hpr} = \varepsilon(\tau)_{pr} \cdot Nu_{hpr} \cdot \frac{\lambda}{(D_{in} - d_{oupr})} = 1,12 \cdot 73,37 \cdot \frac{0,65}{(0,032 - 0,017)} = 3335 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

– для нагреваемого теплоносителя

а) при использовании гладких круглых труб

$$\alpha_c = \varepsilon(\tau) \cdot Nu_c \cdot \frac{\lambda}{d_{in}} = 1,112 \cdot 88,84 \cdot \frac{0,63}{0,015} = 4139 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$\alpha_{cpr} = \varepsilon(\tau)_{pr} \cdot Nu_{cpr} \cdot \frac{\lambda}{d_{inpr}} = 1,12 \cdot 93,76 \cdot \frac{0,63}{0,0164} = 4025 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

8. Находим коэффициент теплопередачи по формуле

а) при использовании гладких круглых труб

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_h} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_c}} = \frac{1}{\frac{1}{2942} + \frac{0,002}{15} + \frac{1}{4139}} = 1399 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$K_{pr} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{hpr}} + \frac{\delta_{cpr}}{\lambda_{cpr}} + \frac{1}{\alpha_{cpr}}} = \frac{1}{\frac{1}{3335} + \frac{0,0015}{15} + \frac{1}{4025}} = 1543 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

9. Находим требуемую величину поверхности теплообмена

Так как в рассматриваемых случаях:

а) при использовании гладких круглых труб

$$\frac{t_{hin} - t_{cou}}{t_{hou} - t_{cin}} = \frac{70-52,1}{43,2-5} = 0,46 < 1,5;$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$\frac{t_{hinpr} - t_{coupr}}{t_{houpr} - t_{cinpr}} = \frac{70-60,98}{43,0-5} = 0,24 < 1,5,$$

то с достаточной степенью точности можно вести расчет по среднеарифметической разности температур [15], в этом случае плотность теплового потока будет равна:

а) при использовании гладких круглых труб

$$q = K \cdot \Delta t_a = 1399 \cdot (59,5 - 39,1) = 28538,1 \text{ Вт/м}^2.$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$q_{pr} = K_{pr} \cdot \Delta t_{apr} = 1543 \cdot (60,39 - 39,7) = 31914,7 \text{ Вт/м}^2.$$

Площадь поверхности нагрева равна:

а) при использовании гладких круглых труб

$$F = \frac{Q}{q} = \frac{23492,46}{28538,1} = 0,82 \text{ м}^2;$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$F_{pr} = \frac{Q_{pr}}{q_{pr}} = \frac{25645,05}{31914,7} = 0,8 \text{ м}^2;$$

10. Находим требуемую длину змеевиковых труб

а) при использовании гладких круглых труб

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d_{in}} = \frac{0,82}{3,14 \cdot 0,015} = 17,47 \text{ м};$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$L_{pr} = \frac{F_{pr}}{\pi \cdot d_{inpr}} = \frac{0,8}{3,14 \cdot 0,0164} = 15,59 \text{ м},$$

11. Расчет гидравлических потерь

Перепад давления ΔP по длине теплообменных труб можно определить согласно соотношению

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_f w^2}{2} \frac{L}{d},$$

где для развитого турбулентного режима течения для вычисления среднего коэффициента сопротивления трению ξ используется формула Блазиуса для гидравлически гладких труб

$$\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}.$$

При значениях относительной шероховатости от $0,08 \cdot 10^{-3}$ м до $12,5 \cdot 10^{-3}$ м и числах Рейнольдса больше $4 \cdot 10^3$ коэффициенты сопротивления с достаточной точностью описываются приближенной формулой [16]:

$$\xi_{pr} = 0,1 \left(1,46 \frac{h_{pr}}{d_{pr}} + \frac{100}{Re_{pr}} \right)^{0,25}.$$

– для нагревающего теплоносителя

а) при использовании гладких круглых труб

$$\Delta P_h = \frac{0,3164 \rho_f w^2}{Re^{0,25}} \frac{L}{2 (D_{in} - d_{ou})} = \frac{0,3164}{12053,57^{0,25}} \frac{983,5 \cdot 0,435^2}{2} \frac{17,47}{(0,032 - 0,019)} = 3783,78 \text{ Па};$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$\xi_{hpr} = 0,1 \left(1,46 \frac{h_{pr}}{d_{pr}} + \frac{100}{Re_{hpr}} \right)^{0,25} = 0,1 \left(1,46 \frac{0,0005}{0,0016} + \frac{100}{12827,61} \right)^{0,25} = 0,048,$$

$$\Delta P_{hpr} = \xi_{hpr} \frac{\rho f w_{cpr}^2}{2} \frac{L_{pr}}{d_{oupr}} = 0,048 \frac{983 \cdot 0,385^2}{2} \frac{15,59}{0,0166} = 3282,06 \text{ Па.}$$

– для нагреваемого теплоносителя

а) при использовании гладких круглых труб

$$\Delta P_c = \frac{0,3164 \rho_f w^2}{Re^{0,25}} \frac{L}{2 d_{in}} = \frac{0,3164}{14186,82^{0,25}} \frac{993 \cdot 0,633^2}{2} \frac{17,47}{0,015} = 6724,07 \text{ Па;}$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$\xi_{cpr} = 0,1 \left(1,46 \frac{h_{pr}}{d_{pr}} + \frac{100}{Re_{cpr}} \right)^{0,25} = 0,1 \left(1,46 \frac{0,0005}{0,0016} + \frac{100}{13141,89} \right)^{0,25} = 0,048,$$

$$\Delta P_{cpr} = \xi_{cpr} \frac{\rho f w_{cpr}^2}{2} \frac{L_{pr}}{d_{inpr}} = 0,048 \frac{992 \cdot 0,531^2}{2} \frac{15,59}{0,0164} = 6357,15 \text{ Па.}$$

12. Мощность, затрачиваемая на прокачку жидкости в области гидравлически гладких труб

а) при использовании гладких круглых труб

$$N = \Delta P_h G_h + \Delta P_c G_c = 3783,78 \cdot 0,223 + 6724,07 \cdot 0,111 = 1590,91 \text{ Вт;}$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$N_{pr} = \Delta P_{hpr} G_{hpr} + \Delta P_{cpr} G_{cpr} = 3282,06 \cdot 0,223 + 6357,15 \cdot 0,111 = 1438,25 \text{ Вт.}$$

13. Определим энергетическую эффективность рассматриваемых теплообменных аппаратов по критерию Кирпичева

а) при использовании гладких круглых труб

$$E = \frac{Q}{N} = \frac{23492,46}{1590,91} = 14,77;$$

б) при использовании пружинно-витых труб

$$E_{pr} = \frac{Q_{pr}}{N_{pr}} = \frac{25645,05}{1438,26} = 17,83.$$

Обсуждение (Discussions)

Проведенное сравнительное исследование теплообменников с пружинно-витыми и гладкими трубками выявило существенное превосходство первых по ключевым эксплуатационным параметрам.

При использовании пружинно-витых теплообменных труб в рассматриваемом змеевиковом теплообменнике конечная температура нагреваемого теплоносителя превышает соответствующую при использовании гладких труб на величину $\Delta t_a = t_{coupr} - t_{cou} = 60,98 - 52,1 = 8,88^\circ\text{C}$.

Тепловая эффективность пружинно-витых конструкций характеризуется повышенной мощностью (25,6 кВт против 23,5 кВт) при сопоставимых температурных перепадах (20,7°C и 20,4°C соответственно). Определяющим фактором выступает увеличенный коэффициент теплопередачи пружинно-витых теплообменных элементов (1543 Вт/(м²·К)) относительно гладкостенных аналогов (1399 Вт/(м²·К)), обусловленный интенсификацией турбулентного режима и формированием вторичных потоков в межтрубном пространстве.

Гидродинамический анализ демонстрирует снижение затрат мощности на прокачку теплоносителя теплообменных аппаратах на базе пружинно-витых каналов до 1438 Вт по сравнению с 1590 Вт для гладкостенных конструкций, что обусловлено наименьшей требуемой длиной теплообменного элемента. Превосходство пружинно-витых каналов подтверждается более высоким значением критерия Кирпичева (17,83 против 14,77), характеризующим их улучшенные энергетические показатели.

Заключение (Conclusions)

Интенсификация теплообмена в теплообменниках с пружинно-витыми трубками достигается за счет развития вторичных течений и увеличения турбулентности потока, что подтверждается более высокими значениями критерия Нуссельта (Nu) и соответствующего коэффициента теплоотдачи (α).

Исходя из полученных результатов видно, что при одних и тех же исходных данных конический змеевиковый теплообменный аппарат на базе пружинно-витого канала требует меньшую длину змеевиковых труб по сравнению с таким же теплообменником, но с

гладкостенным теплообменным элементом. Снижение требуемой длины теплообменных элементов ведет к сокращению затрат на материалы, и соответственно, является предпосылкой к снижению стоимости теплообменного аппарата.

Результаты проведенного расчета подтверждают техническую и энергетическую целесообразность замены гладких трубок на пружинно-витые в конструкциях теплообменных аппаратов. Такая модификация позволяет одновременно повысить тепловую производительность системы и сократить эксплуатационные энергозатраты на перемещение теплоносителя. В результате возникает значительное увеличение общей энергоэффективности системы. Таким образом, использование пружинно-витых элементов в теплообменниках является инновационным решением, которое способствует повышению эффективности и надежности теплообменной техники.

Литература

1. Багоутдинова, А.Г., Золотоносов Я.Д. Змеевиковые теплообменники. Моделирование, расчет. / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов - Казань- КГАСУ, 2016.-245 с.
2. Sheeba, A., Akhil, R., Prakash, J.: Heat Transfer and Flow Characteristics of a Conical Coil Heat Exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 110, 268-276 (2020).
3. Khurana, Hitesh & Majumdar, Rudrodip & Saha, Sandip. (2021). Numerical investigation on the performance of the helical and conical coil heat exchanger configurations in the dynamic mode of heat extraction. 10.1063/5.0134122.
4. Крутова, И. А. Решение сопряженной задачи теплообмена для конических теплообменных аппаратов / И. А. Крутова, Я. Д. Золотоносов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 214-226. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-214-226. – EDN MIDCGA.
5. Крутова И. А., Золотоносов Я. Д. Компьютерное моделирование гидродинамики и теплообмена в конических змеевиковых теплообменниках типа «труба в трубе» // *Известия КГАСУ*. 2020. № 3 (53). С. 65–73.
6. Solution of conjugate problem in a conical coil heat exchanger Iraida Krutova and Yakov Zolotonosov IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 890 (2020) 012156 IOP Publishing
7. Ali, M., Rad, M. M., Nuhait, A., Almuzaiqer, R., Alimoradi, A., & Iskander, T. (2019). New equations for Nusselt number and friction factor of the annulus side of the conically coiled tubes in tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114545>
8. Abdelmagied, M. Investigation of a tube in tube conically coil heat exchanger thermal and fluid flow performance characteristics. *Int. J. Air-Cond. Ref.* 33, 7 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44189-025-00071-5>
9. Mahmoud Mohammed Abdelmagied, Investigation of the triple conically tube thermal performance characteristics, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 119, 2020, ISSN 0735-1933, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104981>.
10. Md Atiqur Rahman, Review on heat transfer augmentation in helically coiled tube heat exchanger, *International Journal of Thermofluids*, Volume 24 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100937>
11. Муравьев А.В., Кожухов Н.Н., Прутских Д.А., Ильин В.К. Исследование теплогидравлических характеристик криволинейного канала с кольцевыми турбулизаторами // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2024. Т. 16. № 1 (61). С. 102-116.
12. Крутова, И. А. Змеевиковые теплообменники типа "труба в трубе" на базе пружинно-витых каналов / И. А. Крутова, Я. Д. Золотоносов // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2019. – № 4(50). – С. 297-304. – EDN WOQIJW.
13. Золотоносов, Я. Д. Аналитическое Решение задачи теплообмена при течении вязких жидкостей в змеевиковых теплообменных аппаратах типа «труба в трубе» / Я. Д. Золотоносов, Е. К. Вачагина // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2023. – № 3(771). – С. 95-109. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-771-3-95-109. – EDN B10HEV.
14. П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. *Справочник по теплообменным аппаратам*. – М.: Машиностроение, 1989, 368 с. стр. 193
15. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. *Теплопередача*. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
16. Методика и зависимости для теоретического расчета теплообмена и гидравлического сопротивления теплообменного оборудования АЭС. РТМ 24.031.05-72. руководящий технический материал. Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения Москва. стр.67

Авторы публикации

Крутова Ираида Александровна – аспирант Казанского государственного архитектурно-строительного университета, г. Казань, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-9485-3116>. iraida_knyazeva@mail.ru

Золотосов Яков Давидович – д-р техн. наук, профессор Казанского государственного архитектурно-строительного университета, г. Казань, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-1773-8605>. zolotonosov@mail.ru

References

1. Bagoutdinova, A.G., Zolotonosov, Ya.D. Coil heat exchangers. Modeling, calculation. / A.G. Bagoutdinova, Ya.D. Zolotonosov - Kazan- KGASU, 2016.-245 p.
2. Sheeba, A., Akhil, R., Prakash, J.: Heat Transfer and Flow Characteristics of a Conical Coil Heat Exchanger. International Journal of Refrigeration, 110, pp.268-276 (2020).
3. Khurana, Hitesh & Majumdar, Rudrodip & Saha, Sandip. (2021). Numerical investigation on the performance of the helical and conical coil heat exchanger configurations in the dynamic mode of heat extraction. 10.1063/5.0134122.
4. Krutova, I. A. Solution of the conjugate problem of heat exchange for conical heat exchangers / I. A. Krutova, Ya. D. Zolotonosov // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2024. – Vol. 26, No. 6. – pp. 214-226. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-214-226. – EDN MIDCGA
5. Krutova I. A., Zolotonosov Ya. D. Computer modeling of hydrodynamics and heat transfer in conical coil heat exchangers of the "pipe in a pipe" type // Izvestiya KGASU. 2020. No. 3 (53). pp. 65-73.
6. Solution of conjugate problem in a conical coil heat exchanger Iraida Krutova and Yakov Zolotonosov IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 890 (2020) 012156 IOP Publishing
7. Ali, M., Rad, M. M., Nuhait, A., Almuzaiqer, R., Alimoradi, A., & Iskander, T. (2019). New equations for Nusselt number and friction factor of the annulus side of the conically coiled tubes in tube heat exchangers. Applied Thermal Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114545>
8. Abdelmagied, M. Investigation of a tube in tube conically coil heat exchanger thermal and fluid flow performance characteristics. Int. J. Air-Cond. Ref. 33, 7 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44189-025-00071-5>
9. Mahmoud Mohammed Abdelmagied, Investigation of the triple conically tube thermal performance characteristics, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 119, 2020, ISSN 0735-1933, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104981>.
10. Md Atiqur Rahman, Review on heat transfer augmentation in helically coiled tube heat exchanger, International Journal of Thermofluids, Volume 24 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100937>
11. Muravyov A.V., Kozhukhov N.N., Prutskikh D.A., Ilyin V.K. Investigation of the thermohydraulic characteristics of a curved channel with annular turbulators // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2024. Vol. 16. No. 1 (61). pp. 102-116.
12. Krutova, I. A. Serpentine heat exchangers of the "pipe in a pipe" type based on spring-twisted channels / I. A. Krutova, Ya. D. Zolotonosov // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2019. – № 4(50). – Pp. 297-304. – EDN WOQIJW.
13. Zolotonosov, Ya. D. Analytical solution of the problem of heat exchange during the flow of viscous liquids in pipe-in-pipe type coil heat exchangers / Ya. D. Zolotonosov, E. K. Vachagina // News of higher educational institutions. Construction. – 2023. – № 3(771). – Pp. 95-109. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-771-3-95-109. – EDN BIOHEV.
14. P.I. Bazhan, G.E. Kanevets, V.M. Seliverstov. Handbook of heat exchangers. – M.: Mashinostroenie, 1989, 368 p. p. 193
15. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. Moscow: Energoizdat, 1981. 416 p.
16. Methodology and dependencies for the theoretical calculation of heat transfer and hydraulic resistance of heat exchange equipment of nuclear power plants. RTM 24.031.05-72. technical guidance material. Ministry of Heavy, Energy and Transport Engineering Moscow. p.67

Authors of the publication

Iraida A. Krutova – Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-9485-3116>. iraida_knyazeva@mail.ru

© Крутова И.А., Золотонос Я.Д.

Yakov D. Zolotonosov – Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia.
ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1773-8605>. zolotonosov@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **30.11.2025 г.**

Отредактировано **28.01.2026 г.**

Принято **15.02.2026 г.**