

<https://doi.org/10.17073/2072-1633-2025-3-1463>

Цифровые двойники как ключевой элемент энергетики будущего: связь с теорией длинных волн Кондратьева

С.Е. Гвоздяный^{1,2}✉, А.В. Мясков¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Российская Федерация

² АО «Выксунский металлургический завод», 607060, Нижегородская обл., Выкса, ул. бр. Баташевых, д. 45, Российская Федерация

✉ gvozduc@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрена роль технологии цифровых двойников как ключевого инструмента цифровой трансформации энергетики. В экономической науке широкое признание получила теория длинных волн Н.Д. Кондратьева, согласно которой развитие мировой экономики носит циклический характер с чередованием длительных периодов подъема и спада (~50–60 лет). В работе проведен системный анализ научной литературы и практических кейсов применения цифровых двойников в энергетике, сопоставленных с фазами длинных экономических циклов. Особое внимание сфокусировано на том, каким образом цифровые двойники могут обеспечить интеграцию возобновляемых источников энергии, повысить надежность энергосистем и ускорить энергетический переход. Новизна исследования состоит не только в рассмотрении цифровых двойников как средства оптимизации отдельных процессов, но и как одного из базовых инноваций формирующегося шестого технологического уклада, ориентированного на устойчивое развитие. Обоснован тезис, согласно которому цифровые двойники выступают связующим звеном между цифровой и «зеленой» трансформациями, формируя новую энергетическую парадигму. Сделан вывод о высоком потенциале технологии в контексте грядущей шестой длинной волны Кондратьева.

Ключевые слова: цифровые двойники, энергетический переход, возобновляемые источники энергии, смарт-сети, кибер-физические системы, теория длинных волн Кондратьева, технологические уклады, цифровая трансформация, устойчивое развитие

Для цитирования: Гвоздяный С.Е., Мясков А.В. Цифровые двойники как ключевой элемент энергетики будущего: связь с теорией длинных волн Кондратьева. *Экономика промышленности*. 2025;18(3):346–357. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2025-3-1463>

Digital twins as a key element of the energy of the future: the connection with Kondratiev's theory of long waves

S.E. Gvozdyanyy^{1,2}✉, A.V. Myaskov¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS”, 4-1 Leninskiy Ave., Moscow 119049, Russian Federation

² JSC “Vyksa Metallurgical Plant”, 45 Brat'yev Batashevych Str., Vyksa, Nizhny Novgorod Region 607060, Russian Federation

✉ gvozduc@yandex.ru

Abstract. The article examines the role of digital twin technology as a key instrument of the digital transformation of the energy sector. In economic science, N.D. Kondratiev's long wave theory, which postulates that the development of the world economy follows cyclical patterns of prolonged periods of growth and decline (~50–60 years), has gained wide recognition. The study applies a systematic analysis of scientific literature and practical cases of digital twin implementation in the energy sector, correlating these findings with the phases of long economic cycles. Special attention is given to the ways in which digital twins can support

the integration of renewable energy sources, enhance the reliability of power systems, and accelerate the energy transition. The novelty of the research lies in considering digital twins not only as a tool for optimizing individual processes but also as one of the basic innovations of the emerging sixth technological paradigm focused on sustainable development. The article argues that digital twins act as a bridge between digital and “green” transformations, contributing to the formation of a new energy paradigm. It concludes that this technology has significant potential in the context of the forthcoming sixth Kondratiev long wave.

Keywords: digital twins, energy transition, renewable energy sources, smart grids, cyber-physical systems, Kondratiev long waves theory, technological paradigms, digital transformation, sustainable development

For citation: Gvozdyanyy S.E., Myaskov A.V. Digital twins as a key element of the energy of the future: the connection with Kondratiev’s theory of long waves. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2025;18(3):346–357. <https://doi.org/10.17073.2072-1633-2025-3-1463>

数字孪生是未来能源领域的关键要素：与康德拉季耶夫长波理论的联系

S.E. 格沃兹佳尼^{1,2}✉, A.V. 米亚斯科夫¹

¹俄罗斯国立研究型技术大学MISIS, 119049, 俄罗斯联邦莫斯科列宁斯基大街4号1栋

²俄罗斯联邦维克萨冶金厂股份公司, 607060, 下诺夫哥罗德州维克萨巴塔舍夫兄弟大街45号

✉ gvozduc@yandex.ru

摘要：本文探讨了数字孪生技术作为能源行业数字化转型关键工具的作用。在经济学领域，N.D. 康德拉季耶夫的长波理论得到了广泛的认可。该理论认为，世界经济发展具有周期性，长期的繁荣和衰退周期（约50–60年）交替出现。本文系统分析了数字孪生技术在能源领域应用的科学文献和实践案例，并与长经济周期的各个阶段进行了比较。特别关注了数字孪生技术如何确保可再生能源的整合、提高能源系统的可靠性以及加速能源转型。本研究的创新之处在于，它不仅将数字孪生技术视为优化单个流程的手段，还将其视为以可持续发展为重点的新兴第六技术范式的基础创新之一。有理由认为，数字孪生技术作为数字化转型与“绿色”转型之间的纽带，正在形成一种新的能源范式。最后，本文得出结论，在即将到来的第六次康德拉季耶夫长波背景下，该技术具有巨大的潜力。

关键词：数字孪生, 能源转型, 可再生能源, 智能电网, 信息物理系统, 康德拉季耶夫长波理论, 技术架构, 数字化转型, 可持续发展

Введение

Энергетический сектор переживает стремительную цифровую трансформацию – фактически, «цифровую революцию». Новейшие технологии, такие как Интернет вещей (*Internet of Things*, IoT) и его энергетический вариант IoE (*Internet of Energy*), искусственный интеллект (AI) и виртуальная/дополненная реальность, все активнее внедряются в энергетику, формируя основы «умных» энергосистем будущего [1]. В указанных условиях особое место занимает концепция цифрового двойника. Цифровой двойник (*digital twin*) – это виртуальный аналог реального объекта или процесса, связанный с ним непрерывным обменом данными. Цифровые двойники появились в промышленности в начале 2000-х гг. в контексте управления жизненным циклом изделий и рассматриваются сегодня как один из передовых инструментов индустрии 4.0. Их суть – бесшовная интеграция

физического и виртуального мира, позволяющая в реальном времени анализировать состояние объектов и оптимизировать их работу [2]. A. Fuller et al. указывают, что цифровой двойник опирается на технологии больших данных и AI, позволяя объединять сенсорную информацию в режиме реального времени [2]. D. Jones et al. систематизировали определения цифрового двойника и выделили его характерные свойства, включая синхронность и прогнозное моделирование [3]. Q. Qi и F. Tao рассматривают цифровые двойники в контексте Индустрии 4.0, подчеркивая их роль в интеграции физического и виртуального миров [4].

Актуальность работы обусловлена тем, что для энергетики значение цифровых двойников выходит за рамки локальных улучшений – они могут стать ключевым элементом перехода к новому технологическому укладу. Анализ этого процесса важен для понимания макроэкономи-

ческих тенденций и прогнозирования развития энергетической отрасли.

Не менее важным является и теоретический аспект понимания нынешних технологических сдвигов. В экономической науке широкое признание получила теория длинных волн Н.Д. Кондратьева, согласно которой развитие мировой экономики носит циклический характер с чередованием длительных периодов подъема и спада (~50–60 лет) [3]. Движущей силой таких кондратьевских волн выступают кластеры базисных инноваций – радикальных технологических изменений, фундаментально преобразующих производство и всю экономику. История развития промышленности показывает, что каждая длинная волна соотносилась с определенными технологическими укладами и источниками энергии: от паровых машин и железных дорог в XIX в. до электроники и информационных технологий в конце XX в. В этой связи представляет интерес вопрос: как технология цифровых двойников соотносится с текущей фазой экономического развития и какую роль она играет в формировании энергетики будущего в контексте теории длинных волн?

Цель данной работы – показать, каким образом внедрение цифровых двойников трансформирует энергетический сектор и как рассматриваемые изменения соотносятся с фазами длинных экономических волн по Кондратьеву.

Настоящее исследование имеет следующие задачи:

1. Охарактеризовать концепцию цифровых двойников и особенности ее применения в энергетике.
2. Рассмотреть основные положения теории длинных волн Кондратьева и их связь с технологическими переходами.
3. Проанализировать влияние цифровых двойников на энергетические процессы, такие как повышение надежности, эффективности и интеграция возобновляемых источников энергии.
4. Определить, на каком этапе экономического цикла находится современная энергетика и какую роль цифровые двойники играют в формировании следующего технологического уклада.
5. Сформулировать прогнозы и перспективы долгосрочного развития цифровых двойников.

Методология исследования

Методологическая основа работы включает в себя анализ широкого круга научных источников. В рамках исследования проведен детальный анализ теоретических основ использования цифровых двойников в энергетическом секторе.

Рассмотрены фундаментальные труды по концепции цифровых двойников, включающие определения и современные подходы к их внедрению в промышленности и энергетике. Особое внимание уделено анализу научных публикаций, посвященных техническим аспектам функционирования цифровых двойников, их архитектуре, возможностям прогнозирования и оптимизации объектов энергетики.

Параллельно исследуются экономические теории, объясняющие долгосрочное развитие технологий, включая концепцию длинных волн Кондратьева. Анализируются ключевые источники, раскрывающие механизмы смены технологических укладов и роль базисных инноваций в формировании новых циклов экономического роста. Это позволяет определить, каким образом цифровые двойники могут вписываться в существующую макроэкономическую модель технологических переходов.

Для обеспечения актуальности работы проводится изучение современных научных статей, опубликованных в ведущих международных журналах (IEEE Transactions on Industrial Informatics, Journal of Manufacturing Science and Technology), а также аналитических докладов исследовательских центров США и Европы (например, National Renewable Energy Laboratory (NREL)). В исследовании используются только рецензируемые источники, что позволяет обеспечить высокое качество и научную обоснованность выводов.

Исследование основано на применении метода системного анализа, позволяющего выявить закономерности внедрения цифровых двойников в энергетику и их влияние на технологические уклады. Анализируются основные тенденции цифровой трансформации энергосектора, рассматриваются текущие примеры использования цифровых двойников в реальных энергетических системах и оцениваются их перспективы.

Для прогнозирования дальнейшего развития рассматриваемых технологий применяется методологический аппарат технико-экономического прогнозирования. В частности, используется трендовый анализ, позволяющий оценить динамику распространения цифровых двойников и возможные сценарии их эволюции.

Применяются методы сравнительного анализа: изучаются параллели между цифровыми двойниками и ключевыми технологиями, определявшими предыдущие длинные волны развития.

Проводится сравнительный анализ внедрения цифровых технологий в разные фазы длинных экономических циклов. Выявляются закономерности появления и распространения базисных

инноваций, способствующих переходу к новому технологическому укладу. В частности, проводится сопоставление динамики развития цифровых двойников с процессами внедрения ключевых технологий предыдущих волн Кондратьева (паровые машины, электричество, нефть и газ, информационные технологии). Этот подход позволяет определить, является ли технология цифровых двойников частью эволюционного перехода к новому энергетическому укладу или же ее влияние ограничено локальными улучшениями.

Исследование не включает количественное моделирование влияния цифровых двойников на экономические циклы из-за сложности факторного анализа макроэкономических процессов. Вместо этого акцент сделан на качественном анализе закономерностей технологической трансформации энергетики и ее соотношения с теорией длинных волн.

Таким образом, исследование опирается на комплексный методологический подход, включающий анализ научных источников, системный и сравнительный анализы, методы прогнозирования и верификацию выводов. Это позволяет всесторонне рассмотреть роль цифровых двойников в энергетическом секторе и их влияние на смену технологических укладов в рамках теории длинных волн Кондратьева.

Литературный обзор

Определение и ключевые характеристики цифровых двойников. Понятие цифрового двойника закрепилось в научной литературе в последние десятилетия, хотя его истоки восходят к работам М. Гривза и коллег из NASA (2000-е годы) [3]. Классическое определение опи-

сывает цифровой двойник как виртуальное представление физического объекта, содержащее всю релевантную информацию о нем [3]. Критической особенностью является наличие двунаправленной связи между физической и цифровой сущностью: непрерывный поток данных от реального объекта в модель и управляющих воздействий или информации – от модели обратно к объекту [3]. Таким образом, цифровой двойник объединяет три компонента – физическую систему, ее виртуальный аналог и канал обмена данными между ними [4]. Благодаря этому достигается эффект «зеркального отображения»: виртуальная модель в режиме реального времени отражает поведение физического прототипа и может влиять на него путем оптимизационных расчетов и управляющих сигналов (**рис. 1**) [3].

На рис. 1 отображается взаимодействие между цифровым двойником и физическим объектом: данные передаются от реального объекта в цифровую модель, которая затем может производить виртуальные измерения и действия, возвращая обратно команды или оптимизации через интерфейс управления.

Цифровые двойники развивались параллельно с распространением таких технологий, как IoT, большие данные (Big Data) и AI. Появление двойников связано с определенной промышленной потребностью: преодолеть разрыв между физическими операциями и цифровым управлением сложными объектами. Как отмечается в исследовании, цифровые двойники находятся на передовой четвертой промышленной революции, обеспечивая беспрецедентную интеграцию данных от множества сенсоров и моделей для анализа и принятия решений [2].

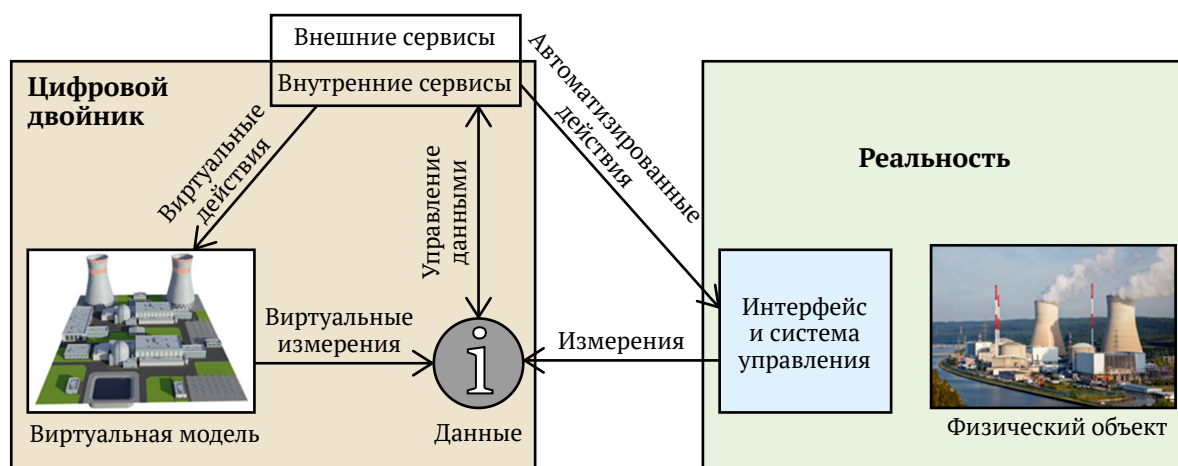


Рис. 1. Взаимодействие цифрового двойника и физического объекта [2]

Fig. 1. Interaction between a digital twin and a physical object [2]

В промышленности цифровой двойник уже стал ключевым инструментом для перехода к кибер-физическим системам: фактически, «цифровой двойник прокладывает путь к интеграции физического и виртуального миров», устраняя одно из «узких» мест на пути к «умному» производству [4]. В литературе выделяется ряд характерных свойств цифрового двойника: синхронность (обновление модели в реальном времени), точность от макро- до микроуровня объекта, способность к прогнозируемому моделированию, а также высокая частота обмена данными между физической и цифровой частями [2–4].

Концепция цифровых двойников впервые получила успешное практическое применение в таких отраслях, как аэрокосмическая промышленность и машиностроение [12]. В качестве примера можно привести цифровые модели двигателей, позволяющие отслеживать степень износа в режиме реального времени. Далее технология цифровых двойников распространилась и на другие сферы – от производства медицинского оборудования до реализации инфраструктурных объектов.

Теория длинных волн Кондратьева. Теория длинных экономических циклов, предложенная Николаем Кондратьевым в 1920-х гг., утверждает, что в развитии мировой экономики прослеживаются периодические длинные волны (также известные как кондратьевские циклы или суперциклы) длительностью порядка полувека [6]. Каждая такая волна начинается с фазы подъема, сопровождающегося ускоренным экономическим ростом, и завершается фазой спада и рецессии; затем цикл делает новый виток. По Кондратьеву, основной причиной возникновения длинной волны является значительный всплеск базисных инноваций – технологических нововведений, которые дают толчок целому комплексу взаимосвязанных изменений в производстве, транспорте, коммуникациях и образе жизни.

Принято выделять по крайней мере пять завершившихся длинных волн. В работе [5] называются циклы и движущие их ключевые технологии:

Первая волна (конец XVIII – первая половина XIX в.) – промышленная революция на базе механизации, водяной энергии и паровых машин; развитие текстильной промышленности и железных дорог.

Вторая волна (середина – конец XIX в.) – бурный рост железнодорожного транспорта, сталелитейной индустрии и парового судоходства.

Третья волна (конец XIX – середина XX в.) – эпоха электричества, тяжелого машиностроения,

химии и двигателя внутреннего сгорания; широкая электрификация и начало нефтяной эры.

Четвертая волна (1940–1970 гг.) – массовое автомобилестроение, нефтехимия, электроника, авиация, космос; господство нефти как основного энергоносителя экономики.

Пятая волна (1970–2010 гг.) – цифровая революция на основе микроэлектроники, персональных компьютеров, интернет-технологий и мобильной связи.

Пятый цикл также называют эпохой информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) [6]. В энергетике данный характеризуется внедрением атомной генерации и газовых турбин, однако кардинального перехода к новым видам энергии не произошло – углеводороды (нефть и газ) сохранили статус ключевых источников [6].

В настоящее время ряд экономистов указывает на начало шестой длинной волны развития (рис. 2), хотя существуют разные оценки ее содержания [6; 7].

Ожидается, что новым ядром технологического уклада станут сочетания NBIC (нано-, био-, информационные, когнитивные) технологий, а также развитие AI, робототехники и новых материалов. Принципиально важно, что шестой цикл во многом связывают с задачами устойчивого развития и «зеленой» экономики [7]. Высказывается мнение, что шестая волна может быть «движима устойчивостью», т.е. ориентирована на экологические и энергосберегающие инновации [7]. Это соответствует логике борьбы с такими вызовами, как глобальное изменение климата и истощение ископаемых энергетических ресурсов. Предполагается увеличение доли энергии, получаемой из возобновляемых источников, а также создание интеллектуальных энергосистем нового поколения.

Однако, по мнению Н.Д. Кондратьева, данный переход осуществляется с задержкой [6]. В частности, в исследовании [6] отмечено, что в ходе пятой волны не произошла замена углеводородного базиса экономики, а такая инновация, как «сланцевая революция» лишь улучшила старую парадигму использования нефти и газа, но не изменила ее сущность. Таким образом, энергетика предыдущей (пятой) длинной волны осталась прежней, и полноценная смена энергетического уклада сместилась на более поздний срок. Отсюда следует, что, если шестая волна действительно будет связана с «зелеными» технологиями, ей предшествует период интенсивного поиска и внедрения новых энергетических решений.

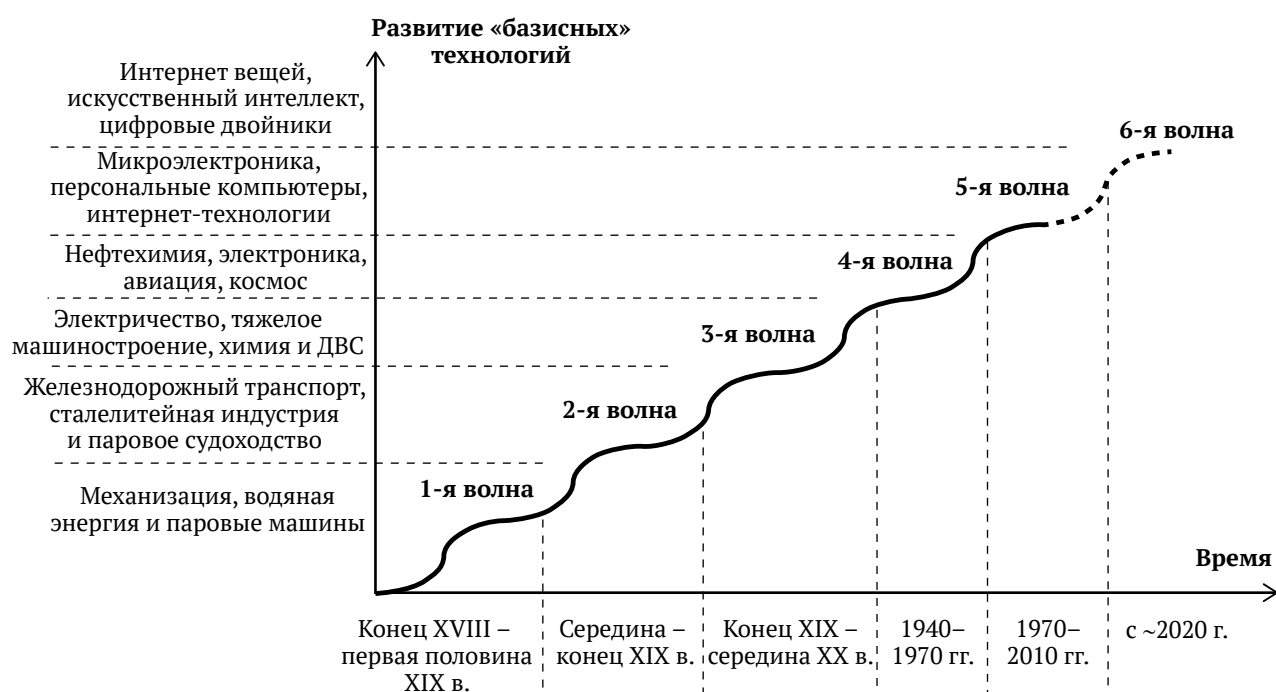


Рис. 2. Шесть длинных волн Кондратьева и их «базисные» технологии [6]

Fig. 2. Six long Kondratiev waves and their “basic” technologies. The impact of digital twins on energy [6]

Влияние цифровых двойников на энергетику

Энергетика – одна из ключевых отраслей, где потенциал цифровых двойников проявляется особенно ярко. Современная электроэнергетическая система становится все более распределенной, растет число источников возобновляемой энергии, активных потребителей и систем накопления. В этих условиях цифровой двойник выступает ценнейшим инструментом для мониторинга, анализа и управления сложной энергетической инфраструктурой. Фактически он призван обеспечить работу «виртуального диспетчерского центра», где в режиме реального времени отражается состояние каждого узла сети, генерируется прогноз работы и проверяются различные сценарии без риска для реального оборудования [8].

Одним из примеров являются цифровые двойники энергосетей (электрических сетей и энергосистем). Исследование Национальной лаборатории возобновляемой энергии (NREL, США) показывает, что применение цифрового двойника для диспетчерского управления сетью позволяет операторам эффективно отслеживать параметры системы, выявлять отклонения и упреждающе принимать меры [8]. В цифровой модели сети интегрируются потоки данных с тысяч датчиков, например, смарт-датчиков в под-

станциях и счетчиков потребителей, что дает целостную картину в реальном времени. С помощью такой модели диспетчеры могут проводить виртуальные эксперименты: например, отрабатывать сценарии аварий или хакерских атак на энергосеть, проверять меры по восстановлению системы [9]. Помимо повышенной надежности, это дает экономический эффект, так как оптимизация загрузки линий и режимов генерации с помощью технологии цифрового двойника позволяет снизить потери и повысить эффективность распределения энергии.

Цифровые двойники находят применение и в сфере генерации энергии. Крупные энергокомпании внедряют цифровые модели электростанций, турбин, солнечных и ветровых ферм. Например, для ветряных электростанций разработаны цифровые двойники, позволяющие в режиме реального времени оценивать нагрузку на каждую турбину, прогнозировать износ компонентов и планировать техобслуживание до того, как произойдет отказ оборудования [2]. Такая проактивная модель обслуживания уменьшает простои и издержки, одновременно продлевая срок службы оборудования. В сфере солнечной энергетики цифровой двойник помогает оптимизировать работу инверторов и отслеживать эффективность панелей, учитывая погодные ус-

ловия и деградацию материалов [2]. В традиционной энергетике (например, тепловые электростанции, нефтепереработка) цифровые двойники используются для контроля за технологическими процессами: виртуальная модель котла или реактора непрерывно сравнивается с датчиками реального объекта, позволяя ранжировать отклонения и регулировать режим для поддержания оптимальной эффективности и безопасности.

Одно из ключевых преимуществ цифровых двойников в энергетике – существенное повышение надежности и безопасности энергоснабжения. Цифровой двойник действует как система раннего предупреждения: анализируя потоки данных, он может выявлять зарождающиеся проблемы – перегрузку линии, вибрацию турбины, перегрев трансформатора – еще до того, как сработает традиционная аварийная защита. В результате операторы получают возможность принять упреждающие меры (переключить потоки, вывести узел в резерв, заменить компонент) и предотвратить аварийные отключения. По сути, цифровой двойник превращает классическую энергосистему с ее инерционными процессами в площадку для испытаний: любые перенастройки системы, новые алгоритмы управления или чрезвычайные ситуации можно сначала проиграть на виртуальной копии, не подвергая риску реальную инфраструктуру [9]. Широкое применение цифровых двойников в энергетических сетях способствует улучшению «безопасности, защищенности и надежности энергетических сетей с двунаправленным потоком энергии и информации» [1].

Кроме того, цифровые двойники способствуют повышению кибербезопасности. Энергетическая инфраструктура все чаще становится мишенью кибератак; имитационная модель энергосистемы дает возможность проводить учения и тестировать защитные, так называемые, сценарии «красной команды/синей команды» (red team/blue team) без воздействия на реальный сектор [9]. Таким образом, цифровой двойник выступает и как тренажер для операторов (обучение действиям в нештатных ситуациях), и как инструмент отладки систем защиты. Путем создания цифрового двойника энергетических систем специалисты в области кибербезопасности получают возможность моделировать их поведение и осуществлять непрерывный мониторинг для выявления аномалий в режиме реального времени. Применение технологий дополненной реальности позволяет осуществлять визуализацию полученных данных непосредственно в контексте физического пространства, обеспечивая наглядное отображение состояния

системы. Данный подход способствует повышению эффективности выявления потенциальных угроз и оперативности реагирования [10].

В промышленности и коммунальном хозяйстве цифровые двойники позволяют реализовать концепцию «энергетического интернета», когда данные о потреблении и выработке энергии собираются и анализируются на единой цифровой платформе. Например, на уровне «умных» городов модели зданий и энергосетей интегрируются, что дает возможность оптимально распределять нагрузку, сглаживать пики спроса и более эффективно задействовать возобновляемые источники [1]. «Умные» заводы, «умные» дома, электростанции и сельскохозяйственные объекты в пределах города могут быть объединены в единую сеть, что позволит собирать данные о перепадах в энергопотреблении объектов в разное время суток. Например, если будет установлено, что жилые районы потребляют наибольшее количество энергии в вечернее время, система может автоматически перераспределять ресурсы, минимизируя подачу энергии в другие сектора, такие как промышленные объекты. Такой подход обеспечивает балансировку всей системы с минимальными затратами и снижением риска перегрузки или отключения электроэнергии [11]. В результате повышается не только энергоэффективность, но и экологичность, поскольку сокращаются выбросы за счет оптимального режима работы оборудования.

Важно подчеркнуть, что эффект от использования цифровых двойников проявляется на разных временных масштабах: от секундных интервалов (автоматическое регулирование параметров в реальном времени) до долгосрочного планирования. Операторы электросетей с помощью цифровых моделей могут разрабатывать стратегические планы развития инфраструктуры, проверяя, как сеть справится с ростом нагрузок через 5–10 лет, с подключением новых электростанций или массового ввода электромобилей [9]. Следовательно, цифровой двойник становится ключевым инструментом среднесрочного планирования инвестиций и энергетической политики.

Подводя итог рассмотренным примерам, стоит отметить, что цифровые двойники уже сегодня преобразуют подход к эксплуатации и развитию энергосистем. Они обеспечивают более глубокое понимание протекающих процессов, повышают прозрачность и управляемость системы, снижают риски аварий.

Далее рассмотрим, как это соотносится с долгосрочными экономическими циклами и какой вклад технология цифровых двойников может внести в новую длинную волну развития.

Связь цифровых двойников с циклами Кондратьева

С точки зрения теории длинных волн, распространение цифровых двойников в энергетике – явление не случайное, а вписывающееся в более широкий исторический контекст технологических смен. Если каждая кондратьевская волна определяется своим набором ведущих инноваций, то очевидно, что цифровые технологии (IoT, Big Data, AI и цифровые двойники) – это те самые инновации, которые характеризуют новый технологический уклад. Пятая волна (конец XX – начало XXI в.) стала эпохой информационных технологий, но, как упоминалось, она не привела к революции в энергетике – мировое хозяйство по-прежнему опиралось на нефть, газ и традиционную энергетику [6]. В результате к концу 2010-х гг. назрел своеобразный разрыв: цифровая инфраструктура активно развивалась, а энергетическая основа экономики оставалась во многом прежней. Шестая длинная волна, вероятно, устранил этот разрыв, объединив достижения цифровизации с переходом на новые энергетические технологии.

Можно предположить, что цифровые двойники станут одним из «базисных» элементов шестой волны, выступая связующим звеном между цифровой революцией и энергетическим переходом. В научной литературе подчеркивается, что они позволяют интегрировать возобновляемые и распределенные источники энергии в энергосистему, решая тем самым задачу, актуальную для «зеленой» экономики – управление сложной многоагентной энергосетью [8; 9]. Также цифровые двойники создают предпосылки для нового витка производительности в энергетике: за счет них можно достичь такого уровня оптимизации и экономии, который в предшествующие периоды был недостижим. В логике Кондратьева это означает появление качественно нового технологического уклада, повышающего на порядок эффективность использования ключевого ресурса (в данном случае энергии). Подобно тому, как электрические сети и двигатели внутреннего сгорания обеспечили рывок производительности в третьей и четвертой волнах, киберфизические системы с цифровыми двойниками могут стать катализатором рывка в шестой волне.

Стоит отметить интересную особенность: технология цифровых двойников зародилась еще на восходящей фазе пятой волны: 2000-е гг. ознаменовали собой резкий сдвиг в направлении переноса информации в виртуальное пространство. Разработка трехмерных моделей на компьютере стала настоящим прорывом, позволив полностью оцифровать геометрическую инфор-

мацию. 3D-модели не только обеспечили визуализацию изделия с любого ракурса, но и открыли возможность интеграции множества компонентов в единую цифровую структуру [12]. Однако массовое распространение цифровых двойников в промышленности происходит именно сейчас, в период предполагаемого перехода к шестой волне. Такая динамика согласуется с теориями инноваций, согласно которым радикальные инновации часто возникают на излете старого цикла, однако их полная отдача реализуется уже в новом цикле, когда формируются необходимые условия и окружающая инфраструктура [5]. В случае с цифровыми двойниками требовалось широкое распространение IoT, удешевление датчиков, рост вычислительных мощностей и накопление больших данных – все это принесла пятая волна. Сетевое подключение также имеет ключевое значение, поскольку оно обеспечивает передачу данных от физического объекта его виртуальному двойнику для последующей обработки [13]. К началу 2020-х гг. эта база в значительной мере создана (миллиарды подключенных устройств, облачные вычисления, развитые алгоритмы машинного обучения). Следовательно, цифровые двойники входят в новую волну «во всеоружии» и для них сразу находятся многочисленные варианты применения.

Важнейший вопрос – как использование цифровых двойников соотносится с энергетическим укладом шестой волны? Если принять тезис, что новая длинная волна будет опираться на переход к чистой энергии и устойчивым технологиям [7], то цифровые двойники можно рассматривать как технологию, которая делает переход к шестой волне возможным. По сути, цифровые двойники обеспечивают синергию между цифровым и «зеленым» секторами экономики. Их внедрение позволяет экосистеме возобновляемой энергетики функционировать с той же степенью надежности, что и традиционные системы, устраняя одно из главных препятствий для отказа от ископаемого топлива. Кроме того, цифровые модели дают возможность разрабатывать и быстро испытывать новые технологии генерации и хранения энергии, тем самым ускоряя цикл инноваций в энергетике.

С теоретической точки зрения можно предположить, что цифровые двойники – это одна из тех «связующих» инноваций, которая объединяет разрозненные достижения в единую новую технологическую систему. Кондратьевские циклы часто характеризуются не просто одной технологией, а целым рядом взаимосвязанных изобретений. В начале XXI в. человечество располагает

множеством прорывных технологий: от биотехнологий до AI. Однако именно в сфере энергетики концентрируются наиболее острые проблемы и потенциальные прорывы – энергетика традиционно служит «локомотивом» экономических циклов. В предыдущие эпохи переход на новые виды топлива (уголь, затем нефть) заметно усилил волну инноваций. Сейчас же энергопереход пробуксовывает без цифровой поддержки. Цифровые двойники в этом контексте могут рассматриваться как недостающее звено, которое позволит полноценно запустить цифровую революцию в энергетике и посредством этого придать шестой волне ожидаемый масштаб.

Следует упомянуть и о таком аспекте, как временные характеристики текущего цикла. Согласно ряду исследований, затянувшийся переход к новым энергетическим технологиям приводит к продлению фазы стагнации пятой волны [5]. Массовое внедрение цифровых двойников и сопряженных решений в 2020-х гг. может служить сигналом о начале нового подъемного тренда. Одной из основных проблем, которую необходимо преодолеть для полноценной реализации потенциала технологии цифровых двойников, являются высокие затраты, связанные с ее внедрением [14]. Ряд авторов полагает, что шестая волна уже началась; в этом случае в ближайшие годы вероятен ускоренный экономический рост на основе новых технологий [6; 7]. Некоторые тенденции, указывающие на данный процесс, уже проявляются: быстро растут инвестиции в чистую энергетику, распространение смарт-сетей и систем управления спросом. Цифровые двойники стали частью государственной повестки во многих странах в рамках программ цифровизации энергетики и инфраструктуры. Так, в стратегиях развития «умных» сетей электроснабжения, разработанных в ЕС, США и Китае, цифровые двойники упоминаются среди ключевых цифровых технологий, имеющих стратегическое значение для будущего энергетического уклада [8; 9].

Подводя итог рассмотрению связи цифровых двойников с циклами Кондратьева, можно констатировать: внедрение цифровых двойников в энергетике напрямую связано с текущим переходом к новой длинной волне экономического развития. Они являются продуктом предыдущей цифровой эпохи, но одновременно – одним из факторов, определяющих облик наступающей эпохи устойчивого развития. В следующем разделе рассмотрим, какие перспективы и прогнозы вытекают из этого для энергетики и экономики в целом.

Перспективы и прогнозы

Анализ влияния цифровых двойников на энергетику и их роли с точки зрения циклов Кондратьева позволяет сформулировать ряд прогнозов относительно будущего отрасли в ближайшие десятилетия.

В качестве первого прогноза стоит отметить ускорение энергетического перехода. Так, можно ожидать, что уже в 2030-е гг. возобновляемые источники энергии при поддержке цифровых моделей достигнут уровня надежности и стабильности, сопоставимого с традиционной генерацией. В глобальном масштабе ожидается, что производство энергии из возобновляемых источников более чем удвоится в период с 2010 по 2035 г. [15]. Шестая длинная волна, таким образом, получит материальное наполнение в виде глобального «энергоперехода» – от углеводородов к возобновляемым ресурсам, управляемым интеллектуальными сетями. К середине XXI в. мировая энергетика станет значительно более децентрализованной и управляемой, а цифровые двойники будут стандартным элементом инфраструктуры [15]. Цифровые копии появятся у всех электростанций, подстанций, заводов-потребителей и даже отдельных домов и устройств. Благодаря программам управления спросом и развитию интеллектуальной измерительной инфраструктуры потребители получат возможность активно участвовать в энергетическом рынке, что снизит пиковые нагрузки [16]. Следствием этого будет беспрецедентная прозрачность и оптимизация мирового энергопотребления.

Широкое внедрение цифровых двойников способно спровоцировать новый цикл экономического роста. По оценкам, к 2027 г. более 40 % крупных компаний по всему миру будут использовать технологию цифровых двойников в своих проектах, что сделает их более прибыльными [17]. Если цифровые двойники и сопряженные с ними технологии действительно станут ядром шестой волны, можно ожидать долгосрочный подъем мировой экономики на основе новой технологической парадигмы. Подобно тому, как железные дороги стимулировали бурный рост во второй половине XIX в., а интернет – в конце XX в., комплекс цифровых технологий может привести к многолетнему периоду относительно высокого роста инвестиций и расширения рынков. Некоторые эксперты уже называют этот грядущий период потенциальным «золотым веком устойчивого развития» [7]. В практическом плане это проявится в создании миллионов новых рабочих мест в секторах возобновляемой энергетики, «умной» инфраструктуры, аналитики данных

и AI для энергосистем. Участники рынка сходятся во мнении, что «озеленение» и цифровизация экономики приведут к росту числа рабочих мест в сфере производства энергии из возобновляемых источников [18].

Для реализации положительных сценариев потребуется преодолеть ряд вызовов. Один из них – стандартизация и совместимость цифровых двойников. Пока разные компании и отрасли разрабатывают свои платформы цифровых двойников, для глобальной энергосистемы необходимы общие стандарты данных и моделей, иначе эффект масштаба не будет достигнут. Отмечается, что в последние годы различные организации и компании разработали ряд стандартов и спецификаций для цифровых двойников, ориентированных на разные цели, области применения и формы представления [19]. В результате существующие стандарты оказываются несовместимыми между собой, поскольку отличаются по синтаксису, механизмам взаимодействия и семантике [19]. Вероятно, в ближайшие годы появятся международные протоколы обмена данными между цифровыми моделями разных уровней. Например, модель электромобиля сможет «общаться» с моделью городской сети и моделью электростанции на одном языке. Другой важный аспект – доверие к цифровым моделям. Чтобы операторы полностью полагались на рекомендации цифровых двойников, необходима высокая степень уверенности в их адекватности. Это требует тщательной верификации моделей, цифровой безопасности и прозрачности алгоритмов. Особенно это важно в тех случаях, в которых используются AI-советники). Ожидается развитие стандартов сертификации цифровых двойников для критической инфраструктуры.

Цифровые двойники не существуют в вакууме – они будут сочетаться с другими прорывными технологиями. В перспективе интеграция цифровых двойников с ИИ приведет к появлению самообучающихся энергосистем, способных автономно оптимизировать свою работу. Например, «энергосеть-двойник», снабженная продвинутой ИИ, сможет сама находить оптимальные конфигурации сети под текущий спрос и, в случае с возобновляемыми источниками энергии, погодные условия, минимизируя потери и издержки. Также вероятно слияние технологий двойников с дополненной реальностью. Основной задачей технологии дополненной реальности является контекстно-зависимая интеграция элементов реального мира и сгенерированных компьютером объектов в поле зрения пользователя [20; 21]. Операторы на местах будут иметь

наложенную цифровую информацию на реальное оборудование, что упростит обслуживание и устранение неполадок. Еще одна область – квантовые вычисления, которые в будущем могут использоваться для сверхточного моделирования сложных энергетических процессов (например, турбулентности ветра для ветряных парков или реакций в новых батареях) внутри цифровых двойников [13]. Все эти сочетания усилят общий эффект и расширят горизонты шестой волны.

В конечном счете широкое внедрение цифровых двойников в энергетике должно способствовать достижению глобальной устойчивости не только в экологическом, но и в социально-экономическом плане. Более эффективное и надежное энергоснабжение укрепляет энергетическую безопасность государств, снижает риск конфликтов из-за ресурсов. Кроме того, если шестая волна действительно будет «зеленой», то после периода роста она может перейти в фазу длительной стабилизации. Разумеется, это идеализированный сценарий – в реальности многое будет зависеть от согласованности действий государств и от успешности преодоления вызовов при внедрении технологий. Тем не менее тренд на цифровизацию энергетики представляется необратимым, и цифровые двойники – один из краеугольных камней этого процесса на годы вперед.

Подводя итог прогнозной части, можно уверенно утверждать: цифровые двойники имеют все шансы стать неотъемлемым атрибутом энергетики будущего. Их влияние выйдет за рамки сугубо технологической новинки – они станут фактором макроэкономического развития, интегрируются в новый уклад и обеспечат устойчивый рост. Разумеется, эти прогнозы требуют постоянной верификации по мере развития событий, однако обозначенное направление развития прослеживается уже сейчас.

Заключение

Таким образом, в данной работе рассмотрено явление цифровых двойников в энергетике сквозь призму теории длинных волн Кондратьева. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, цифровые двойники являются мощным драйвером инноваций в энергетике, меняя устоявшиеся подходы к эксплуатации и развитию энергообъектов. Их внедрение обеспечивает более высокий уровень наблюдаемости, управляемости и оптимизации энергетических процессов, что приводит к повышению надежности энергосистем, снижению издержек и способствует интеграции возобновляемых источников

энергии. Уже накопленный опыт демонстрирует значимые улучшения в безопасности и эффективности работы отрасли [1].

Во-вторых, развитие технологии цифровых двойников тесно связано с переходом мировой экономики к новой фазе роста, ориентированной на цифровизацию и устойчивое развитие. С позиций теории Кондратьева цифровые двойники можно рассматривать как одну из базовых инноваций шестого технологического уклада. Они возникли на фоне информационно-коммуникационной революции пятой волны, но их широкое распространение совпало по времени с началом ожидаемой шестой волны, которая, вероятно, будет характеризоваться синтезом цифровых и «зеленых» технологий [7]. Цифровые двойники соединяют эти две составляющие, позволяя максимизировать эффект от перехода на новые источники энергии за счет оптимизации управления.

В-третьих, использование цифровых двойников в энергетике следует рассматривать не изолированно, а в комплексе социально-экономических эффектов. Технология цифровых двойников в настоящее время формирует новую парадигму проектирования, разработки и эксплуатации продукции и услуг. Массовое внедрение данной технологии способно запустить мультиплика-

тивные процессы: рост инвестиций, появление новых рынков и профессий, более экологичное развитие городов и промышленности. Это соответствует начальной фазе длинной волны подъема, при которой новые технологии становятся локомотивом экономики.

Вместе с тем исследование показало, что для полной реализации потенциала цифровых двойников необходимы согласованные действия по стандартизации, обеспечению кибербезопасности, подготовке кадров и обмену лучшими практиками. Внимание к этим вопросам позволит минимизировать технические и организационные риски и усилить положительные эффекты.

Подводя итог, можно заключить, что цифровые двойники станут ключевым элементом энергетики будущего. Их роль в контексте теории длинных волн состоит в том, что они послужат одним из триггеров новой технологической парадигмы. Применяя достижения пятой волны Кондратьева для решения задач шестой, цифровые двойники объединяют преемственность и новизну. Дальнейшее изучение и практическое развитие этой концепции будут играть значительную роль в обеспечении энергетической безопасности и экономического развития в предстоящие десятилетия.

Список литературы / References

1. Strielkowski W., Rausser G., Kuzmin E. Digital revolution in the energy sector: Effects of using digital twin technology. In: Kumar V., Leng J., Akberdina V., Kuzmin E. (eds.). *Digital Transformation in Industry*. Springer; 2022:43–55. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94617-3_4
2. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*. 2020;8:108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
3. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020;29(A):36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
4. Qi Q., Tao F. Digital Twin and Big Data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*. 2018;6:3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
5. Thompson W.R. Energy, Kondratieff Waves, Lead Economies, and Their Evolutionary Implications. *Journal of Globalization Studies*. 2012;3(2):167–194.
6. Н.Д. Кондратьев: кризисы и прогнозы в свете теории длинных волн. Взгляд из современности. Под ред. Л.Е. Гринина, А.В. Коротаева, В.М. Бондаренко М.: Учитель; 2017. 384 с.
7. Reuter T. Transformations to sustainability: Why integrated social change requires a political process based on inclusive communication. *Cadmus*. 2021;4(5):184–190.
8. Choi S., Jain R., Zhang H. *Digital Twin + AI: Control room of the future*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2023. Available at: <https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/87050.pdf>
9. Palensky P., Cvetkovic M., Gusain D., Joseph A. Digital twins and their use in future power systems. *Digital Twin*. 2022;1:4. <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17435.2>
10. Emily N., Bastian N.D. Synthetic environments for the cyber domain: a survey on advances, gaps, and opportunities. *The Cyber Defense Review*. 2023;8(2):91–104.
11. Motlagh N.H., Mohammadrezaei M., Hunt J., Zakari B. Internet of Things (IoT) and the energy sector. *Energies*. 2020;13(2):494. <https://doi.org/10.3390/en13020494>
12. Grieves M. Digital Twins: Past, present, and future. In: Stark R., Damerau T. (eds.). *Digital Twins – Concepts and applications*. Springer; 2023. P. 97–121. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4>
13. Yao J.-F., Yang Y., Wang X.-C., Zhang X.-P. Systematic review of digital twin technology and appli-

- cations. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*. 2023;6(1):10. <https://doi.org/10.1186/s42492-023-00137-4>
14. Singh M., Fuenmayor E., Hinchey E.P., Qiao Y., Murray N., Devine D. Digital Twin: Origin to future. *Applied System Innovation*. 2021;4(2):36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
 15. Gan P.Y., Li Z. Quantitative study on long term global solar photovoltaic market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;46(C):88–99. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.041>
 16. Cui F. Research on future development and challenges of new energy. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*. 2025;162(1):66–72. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2025.20068>
 17. Attaran M., Celik B.G. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*. 2023;6(80):100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>
 18. Bradley P., Whittard D., Green L., Brooks I., Hanna R. Empirical research of green jobs: A review and reflection with practitioners. *Sustainable Futures*. 2025;9:100527. <https://doi.org/10.1016/j.sfsr.2025.100527>
 19. Schmidt C., Volz F., Stojanovi, L., Sutschet G. Increasing interoperability between Digital Twin standards and specifications: Transformation of DTDL to AAS. *Sensors*. 2023;23(18):7742. <https://doi.org/10.3390/s23187742>
 20. Kopec J., Pekarcikova M., Lachvajderova L., Trebuňa M. Digital Twin, virtual reality and augmented reality and their use. In: *Conference “Invention for Enterprise”. Conference paper. Žilina, October 2021*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/366192832_digital_twin_virtual_reality_and_augmented_reality_and_their_use#fullTextFileContent
 21. Pigni F., Watson R.T., Piccoli G. Digital Twins: Representing the future. *SSRN Electronic Journal*. 2021. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3855535>

Информация об авторах

Семен Евгеньевич Гвоздяный – аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Российская Федерация; АО «Выксунский металлургический завод», 607060, Нижегородская обл., Выкса, ул. бр. Баташевых, д. 45, Российская Федерация; e-mail: gvozduc@yandex.ru

Александр Викторович Мясков – д-р экон. наук, профессор, директор Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Российская Федерация; e-mail: rumyaskov@misis.ru

Information about the authors

Semyon E. Gvozdyanyy – Postgraduate Student, National University of Science and Technology “MISIS”, 4-1 Leninskiy Ave., Moscow 119049, Russian Federation; JSC “Vyksa Metallurgical Plant”, 45 Brat'yev Batashevyykh Str., Vyksa, Nizhny Novgorod Region 607060, Russian Federation; e-mail: gvozduc@yandex.ru

Alexander V. Myaskov – Dr.Sci. (Econ.), Professor, Director of the Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, 4-1 Leninskiy Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e-mail: rumyaskov@misis.ru

Поступила в редакцию 19.04.2025; поступила после доработки 31.08.2025; принята к публикации 01.09.2025

Received 19.04.2025; Revised 31.08.2025; Accepted 01.09.2025