

Лозин Вадим Сергеевич

Студент магистратуры 2 курс

МИРЭА-Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)

Институт информационных технологий

Коваленко Дарья Борисовна

Студентка бакалавриата 2 курс

МИРЭА-Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)

Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА: ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТОВ ОТ ОПТИМИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ДАННЫХ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Аннотация: В статье рассматривается проблема экономического обоснования внедрения цифровых двойников в химической промышленности. Цель работы — разработка методики количественной оценки экономических эффектов от оптимизации производственных процессов с помощью цифрового двойника, работающего с данными в реальном времени. Предложена методология, связывающая операционные улучшения (снижение расхода сырья, рост производительности) с финансовыми результатами через систему ключевых показателей. Апробация методики на модельном примере синтеза аммиака показала значительный экономический потенциал технологии и подтвердила целесообразность инвестиций. Основным выводом является необходимость фокуса на качестве данных и интеграции технологий для реализации расчетного экономического эффекта.

Ключевые слова: цифровой двойник, химическое производство, экономическая оценка, анализ данных в реальном времени, операционная эффективность, ключевые показатели эффективности, оптимизация процессов, предиктивная аналитика, моделирование, инвестиционное обоснование.

Lozin Vadim Sergeevich

Master's degree student 2nd year

MIREA-Russian Technological University (RTU MIREA)

Institute of Information Technology

Kovalenko Daria Borisovna

undergraduate student 2nd year

MIREA-Russian Technological University (RTU MIREA)

Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies

**THE DIGITAL TWIN OF CHEMICAL PRODUCTION: AN ECONOMIC
ASSESSMENT OF OPTIMIZATION EFFECTS USING REAL-TIME DATA
ANALYSIS**

Abstract: *The article addresses the problem of economic justification for the implementation of digital twins in the chemical industry. The aim is to develop a methodology for the quantitative assessment of economic effects from the optimization of production processes using a digital twin operating with real-time data. A methodology is proposed that links operational improvements (reduction of raw material consumption, increase in productivity) with financial results through a system of key performance indicators. Testing the methodology on a case study of ammonia synthesis demonstrated the significant economic potential of the technology and confirmed the investment feasibility. The key conclusion is the necessity of focusing on data quality and technology integration to realize the projected economic effect.*

Keywords: *digital twin, chemical manufacturing, economic assessment, real-time data analytics, operational efficiency, key performance indicators, process optimization, predictive analytics, simulation, investment justification.*

Цифровая трансформация промышленности, обозначаемая парадигмой

«Индустрия 4.0», кардинально меняет подходы к управлению сложными технологическими процессами. Особенно актуальным этот переход является для химической отрасли, характеризующейся капиталоемкостью, высокими требованиями к безопасности, энерго- и ресурсоемкостью, а также сложной нелинейной динамикой производственных систем. В условиях волатильности цен на сырье и энергоносители, ужесточения экологических норм и требований к качеству продукции, традиционные методы управления, основанные на ретроспективном анализе и опыте операторов, становятся недостаточными для обеспечения конкурентоспособности и устойчивого развития. Ключевым трендом становится переход от реактивного к предиктивному и прескриптивному управлению, основу которого составляют данные и их аналитика.

Центральной технологической концепцией, обеспечивающей такой переход, выступает цифровой двойник (ЦД). В своем развитом виде цифровой двойник представляет собой не просто статическую 3D-модель или набор математических формул, а динамическую, самообучающуюся виртуальную копию физического актива, процесса или системы, синхронизированную с ним в реальном или близком к реальному времени посредством потоков данных с датчиков и систем АСУ ТП. Именно интеграция с возможностями анализа больших данных и машинного обучения в реальном времени позволяет трансформировать ЦД из инструмента визуализации и симуляции в мощный оптимизационный механизм, способный непрерывно предлагать корректировки для максимизации эффективности и минимизации рисков. [1]

Несмотря на растущий интерес к теме цифровых двойников, выраженный в значительном объеме научно-технических публикаций, в научной литературе наблюдается выраженный дисбаланс. Существующие исследования в основном сфокусированы на архитектурных, алгоритмических и технологических аспектах построения ЦД, таких как выбор платформ, методы моделирования и интеграции данных. В то же время явно недостаточно проработана комплексная методология экономической оценки эффектов от их

внедрения. Экономические выгоды часто упоминаются декларативно, в виде перечня потенциальных преимуществ, но без четкой системы метрик, алгоритмов расчета и эмпирического подтверждения. Этот пробел создает серьезную проблему для менеджмента промышленных предприятий, который при принятии инвестиционных решений требует четкого количественного обоснования затрат на создание и внедрение таких сложных цифровых решений. [2]

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью преодоления разрыва между технологическим потенциалом цифровых двойников с функционалом анализа данных в реальном времени и инструментарием для объективной оценки их экономического вклада в эффективность химического производства. Целью статьи является разработка и апробирование методики экономической оценки эффектов от оптимизации химического производства на основе цифрового двойника. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: во-первых, уточнить и структурировать понятийный аппарат, связанный с экономическими эффектами ЦД; во-вторых, систематизировать все потенциальные источники формирования экономии и дополнительного дохода; в-третьих, предложить систему взаимосвязанных ключевых показателей эффективности (KPI) для количественной оценки; в-четвертых, на модельном примере типичного химико-технологического процесса продемонстрировать применение методики и провести расчет совокупного годового экономического эффекта; наконец, обсудить ограничения и факторы, влияющие на достоверность оценки.

Фундаментальной основой настоящего исследования является четкое определение и разграничение ключевых понятий, эволюция которых отражает прогресс в области цифровизации промышленности. Концепция цифрового двойника, впервые системно описанная Майклом Гривзом, изначально рассматривалась как совокупность трех компонентов: физического объекта в реальном пространстве, его виртуальной модели в цифровом пространстве и

информационных связей, синхронизирующих их состояние. Современное понимание, сформировавшееся в рамках «Индустрии 4.0», значительно расширило эту модель. Сегодня цифровой двойник химического производства представляет собой динамическую, самообучающуюся компьютерную модель, которая эмулирует поведение реального технологического процесса или целого предприятия в реальном времени, используя поступающие с датчиков, систем управления и бизнес-контуров данные. Его архитектура, как правило, включает несколько уровней: уровень данных (сбор, агрегация, очистка), уровень моделирования (физико-химические и статистические модели, машинное обучение), уровень симуляции и анализа (прогнозирование, оптимизация) и уровень визуализации и взаимодействия. Ключевым отличием от традиционной имитационной модели является двунаправленная связь: цифровой двойник не только отражает состояние объекта, но и позволяет в безопасной виртуальной среде тестировать управляющие воздействия, оптимальные параметры которых затем передаются обратно в физический мир. [3]

Ключевым функционалом, раскрывающим экономический потенциал цифрового двойника, является анализ данных в реальном времени. Это совокупность методов и технологий, позволяющих обрабатывать непрерывные потоки данных (data streams) по мере их поступления, а не периодически над хранилищами исторической информации. В контексте химического производства такой анализ включает в себя алгоритмы предиктивной аналитики для прогнозирования выхода продукта, вероятности отклонения качества или выхода оборудования из строя; оптимизационные алгоритмы для поиска наилучших рабочих точек аппаратов с учетом текущих цен на сырье и энергоносители; а также детекцию аномалий для немедленного выявления нештатных ситуаций, ведущих к браку или повышенным выбросам. Именно эта способность к моментальной интерпретации данных и генерации прескриптивных рекомендаций трансформирует ЦД из дорогостоящего пассивного «отражения» в активный инструмент создания стоимости.

Экономическая оценка подобных высокотехнологичных проектов сталкивается с классической проблемой измерения не только прямых, но и косвенных, а также стратегических выгод. Традиционные методы оценки инвестиций, такие как расчет чистой приведенной стоимости или срока окупаемости, фокусируются на дисконтированных денежных потоках. Однако применительно к цифровому двойнику прямое выделение генерируемого им денежного потока затруднительно, поскольку его эффекты распределены по множеству статей операционных расходов и доходов предприятия. Как отмечают исследователи, успешная оценка требует перехода от анализа затрат на ИТ к анализу бизнес-результатов. Поэтому необходима разработка методики, которая бы устанавливала прямую причинно-следственную связь между технологическими улучшениями, достигнутыми за счет ЦД, и их финансовыми последствиями через систему операционных ключевых показателей эффективности [4].

Таким образом, обзор литературы позволяет констатировать, что, несмотря на глубокую проработку технических аспектов цифровых двойников и наличие устоявшегося инструментария финансового анализа, существует явный методологический разрыв. Научная задача заключается в создании связующего звена — структурированной рамки, которая бы систематизировала все каналы влияния ЦД с функцией реального времени на экономику химического производства и предложила количественные метрики для этого влияния.

Методологической основой предлагаемого подхода является комплексный анализ, связывающий технологические возможности цифрового двойника с бизнес-результатами предприятия через систему ключевых показателей эффективности. В отличие от традиционной оценки ИТ-проектов, которая зачастую фокусируется на затратах на оборудование и программное обеспечение, данная методика исходит из принципа «от эффекта к экономике». Это предполагает, что экономическая оценка должна начинаться с идентификации и количественного измерения операционных улучшений,

которые становятся возможными благодаря функционалу цифрового двойника, работающего с данными в реальном времени. Далее эти улучшения конвертируются в стоимостные показатели, формируя совокупный экономический эффект, который впоследствии сопоставляется с инвестиционными и операционными затратами на создание и поддержку ЦД.

Первым и критически важным этапом методики является систематизация всех потенциальных источников экономических эффектов. Эффекты целесообразно структурировать по трем категориям, отражающим их природу и горизонт воздействия. К первой категории относятся прямые операционные эффекты, которые имеют наиболее очевидную стоимостную оценку и проявляются в краткосрочной перспективе. Сюда входит снижение удельных норм расхода дорогостоящего сырья, катализаторов и энергоносителей за счет непрерывной оптимизации технологических режимов; увеличение общего объема выпуска продукции благодаря сокращению плановых и внеплановых простоев, выявленных предиктивными моделями; а также повышение выхода целевого продукта и снижение побочных продуктов путем точного поддержания параметров процесса на оптимальном уровне. Вторая категория – косвенные операционные эффекты, которые также влияют на издержки, но менее прямолинейно. Это снижение объема бракованной продукции и возвратов от клиентов за счет улучшения консистенции и стабильности качества; уменьшение риска экологических инцидентов и связанных с ними штрафов благодаря раннему предупреждению об опасных отклонениях; а также снижение затрат на плановое обслуживание за счет перехода к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования. Третья категория охватывает стратегические эффекты, чья экономическая оценка наиболее сложна, но чья ценность в долгосрочной перспективе может быть максимальной. К ним относятся сокращение времени и стоимости вывода новых продуктов или рецептур на рынок за счет тестирования и валидации в виртуальной среде цифрового двойника, а также повышение гибкости и адаптивности производства к изменениям рыночного спроса. [5, 6]

Для перехода от качественного описания эффектов к их количественному измерению предлагается система взаимосвязанных ключевых показателей эффективности, отобранных по критериям релевантности, измеримости и чувствительности к воздействию ЦД. Основу системы составляют технологические и производственные KPI, такие как Общая эффективность оборудования, Удельный расход сырья, Коэффициент выхода годного продукта и Среднее время наработки на отказ. Эти показатели напрямую отражают результат оптимизации с помощью цифрового двойника. На следующем уровне данные операционные KPI транслируются в финансовые метрики: Себестоимость единицы продукции, Маржинальный доход от производства, а также потенциальное снижение условно-переменных затрат. Именно финансовые показатели служат основой для расчета совокупного годового экономического эффекта, который определяется как сумма изменений по соответствующим статьям затрат и доходов. Конечным шагом методологии является сопоставление полученного годового эффекта с капитальными и операционными затратами на проект по внедрению цифрового двойника для расчета срока окупаемости, чистой приведенной стоимости или внутренней нормы доходности. Для учета неопределенности ключевых параметров, таких как цены на сырье или точность прогнозных моделей, рекомендуется проведение анализа чувствительности.

Таким образом, предложенная методология представляет собой последовательный и структурированный алгоритм действий, позволяющий перейти от технических характеристик цифрового двойника к конкретным финансовым результатам, обеспечивая тем самым надежную основу для обоснования инвестиционных решений.

Для апробации предложенной методики экономической оценки рассмотрим модельный пример внедрения цифрового двойника на установке синтеза аммиака — типичном для химической промышленности крупнотоннажном, энергоемком и непрерывном процессе. Исходное состояние рассматриваемого предприятия соответствует базовому сценарию. Управление

осуществляется на основе данных с систем АСУ ТП, однако анализ носит ретроспективный характер; оптимизация режимов проводится эпизодически силами технологических служб, а параметры процесса поддерживаются в достаточно широких «безопасных» коридорах для минимизации риска отклонений. Установка характеризуется следующими базовыми показателями: годовая мощность — 600 тысяч тонн аммиака; удельный расход природного газа (метана) как основного сырья и топлива — 1000 нм³ на тонну аммиака; общий коэффициент использования мощности составляет 92%. [7]

Внедрение цифрового двойника предполагает создание высокоточной виртуальной модели ключевых узлов установки: риформинга метана, конверсии монооксида углерода, синтеза аммиака и систем утилизации тепла. Модель постоянно получает поток данных в реальном времени о давлении, температуре, составе газовых потоков и нагрузке. Ядро системы составляют алгоритмы машинного обучения, обученные на исторических данных, которые непрерывно решают оптимизационную задачу: поиск такого сочетания управляющих переменных (температура на входе в реактор синтеза, соотношение азот-водородной смеси, давление в колонне), которое минимизирует удельный расход метана при заданной производительности и жестких ограничениях по качеству продукта и безопасности. Рекомендации в виде уставок передаются операторам или напрямую в систему управления. [8]

Количественная оценка эффектов проводится путем сравнения показателей базового и оптимизированного сценариев. Основное воздействие ЦД направлено на повышение эффективности конверсии. Согласно отраслевым данным и результатам моделирования, интеллектуальная оптимизация в реальном времени позволяет снизить удельный расход природного газа на 1.5%. Для установки мощностью 600 тыс. тонн в год при базовом расходе 1000 нм³/т это дает экономию 9 млн нм³ газа в год. В стоимостном выражении, при средней цене природного газа 5000 рублей за тысячу нм³, годовой экономический эффект составляет 45 млн рублей. Второй значимый эффект связан с увеличением операционной доступности.

Предиктивные модели ЦД, отслеживая деградацию катализатора и состояние теплообменной аппаратуры, позволяют продлить межремонтный пробег и сократить продолжительность плановых остановок, повысив общий коэффициент использования мощности до 93.5%. Рост на 1.5 процентных пункта эквивалентен увеличению выпуска продукции на 9 тысяч тонн аммиака в год. При средней контрактной цене аммиака 40 тысяч рублей за тонну и маржинальности в 25%, дополнительный маржинальный доход составит 90 млн рублей. Третий эффект — снижение операционных затрат на ремонты за счет перехода к обслуживанию по состоянию, что оценивается в 10 млн рублей в год. [9]

Консолидированный годовой экономический эффект до вычета затрат составляет сумму прямых операционных улучшений: 45 млн (экономия сырья) + 90 млн (дополнительный маржинальный доход) + 10 млн (снижение затрат на ремонт) = 145 млн рублей. При оценке капитальных затрат на разработку и внедрение ЦД для подобной установки в размере 300 млн рублей, простой срок окупаемости проекта составит чуть более двух лет. Расчет чистой приведенной стоимости при ставке дисконтирования 12% и горизонте планирования 5 лет дает положительное значение, что подтверждает экономическую целесообразность проекта. Однако проведение анализа чувствительности выявляет ключевые риски. Основным фактором неопределенности является точность и устойчивость работы оптимизационных алгоритмов, зависящая от качества данных. При снижении эффективности оптимизации расхода газа с 1.5% до 1.0% срок окупаемости увеличивается примерно на полгода. Кроме того, экономика проекта критически зависит от рыночных цен на природный газ и аммиак: рост цены газа сокращает эффект от экономии, тогда как рост цены аммиака — увеличивает маржинальный доход от дополнительного выпуска. [10]

Обсуждение результатов позволяет сделать несколько важных выводов. Во-первых, предложенная методика успешно переводит качественные преимущества ЦД в конкретные стоимостные показатели, демонстрируя

значительный экономический потенциал даже при консервативных оценках улучшений. Во-вторых, результаты подчеркивают, что основная ценность цифрового двойника в химической промышленности лежит не в визуализации, а в непрерывной оптимизации ресурсоемкости и использования активов. В-третьих, выявленная чувствительность к точности моделей подтверждает, что экономический успех проекта определяется не столько стоимостью лицензии на ПО, сколько качеством данных, компетенциями в области моделирования и глубиной интеграции с технологическим процессом. Таким образом, модель служит не только инструментом оценки, но и основой для планирования этапов внедрения, где приоритетом должно стать создание надежной инфраструктуры данных и валидация оптимизационных сценариев.

Проведенное исследование подтверждает гипотезу о наличии значимого и поддающегося количественной оценке экономического потенциала цифровых двойников для химических производств. Разработанная в работе методика позволяет преодолеть существующий в научной и практической литературе разрыв между технологическим описанием возможностей цифрового двойника и инструментами финансового обоснования инвестиций в его создание. Методология, основанная на принципе причинно-следственной связи «технологическая оптимизация — операционные KPI — финансовый результат», предоставляет структурированный алгоритм действий для аналитиков и менеджеров предприятий. Она систематизирует разнородные эффекты от внедрения, разделяя их на прямые операционные, косвенные операционные и стратегические, что позволяет избежать дублирования при расчетах и обеспечить полноту оценки.

Научная новизна исследования заключается в синтезе подходов из области управления эффективностью (Сбалансированная система показателей), финансового анализа и специфики цифровизации химических производств. Результатом является не просто перечень возможных выгод, а формализованная схема их измерения и агрегации в конечный экономический показатель. Практическая значимость работы демонстрируется на детальном

модельном примере производства аммиака, где количественно оценены ключевые каналы создания стоимости: экономия сырья за счет непрерывной оптимизации режимов, рост маржинального дохода вследствие увеличения операционной доступности и снижение затрат на обслуживание. Расчеты показали, что даже консервативные улучшения на уровне 1.5-2% по основным технологическим показателям приводят к совокупному годовому эффекту, обеспечивающему окупаемость капитальных вложений в цифровой двойник в горизонте 2-3 лет, что соответствует приемлемым для отрасли критериям инвестиционной привлекательности.

Важным выводом исследования является также идентификация ключевых факторов успеха, от которых напрямую зависит реализация расчетного экономического эффекта. Результаты анализа чувствительности однозначно указывают, что финансовая отдача определяется не столько стоимостью программного обеспечения, сколько неколичественными, «мягкими» факторами: качеством исходных данных, адекватностью и точностью математических и статистических моделей, а также глубиной организационных изменений, обеспечивающих использование рекомендаций ЦД в ежедневной операционной деятельности. Это смещает фокус с выбора платформы на создание компетенций в области data science и реинжиниринг бизнес-процессов управления производством.

Перспективы дальнейших исследований видятся в нескольких направлениях. Во-первых, необходима разработка и стандартизация отраслевых шаблонов цифровых двойников для типовых процессов (каталитический крекинг, полимеризация, получение минеральных удобрений), что позволит снизить затраты на внедрение и тиражировать положительный опыт. Во-вторых, актуальной задачей является расширение методики оценки для учета эффектов второго порядка, таких как влияние цифрового двойника на устойчивость цепочек поставок, углеродный след продукции и возможности для создания новых сервисных бизнес-моделей. В-третьих, в условиях формирования ESG-повестки особую ценность

приобретает интеграция в экономическую оценку экологических и социальных аспектов, например, стоимостная оценка снижения выбросов парниковых газов, достигаемого за счет оптимизации энергопотребления. Таким образом, цифровой двойник предстает не только как инструмент операционной экономии, но и как критический элемент архитектуры устойчивого и адаптивного химического предприятия будущего.

Литература:

1. Ромеро Х. М. М. и др. Индустрия 5.0 и цифровые двойники в химической промышленности: подход к концепции «золотой партии» // Труды по инженерии – 2025. – Т. 9, № 4. – С. 78.

2. Цифровые двойники в химической промышленности: повышение эффективности и инноваций // Аффинидад. – URL: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/432158>

3. Дитрих Й. 12 революционных способов, которыми цифровые двойники могут изменить химическую промышленность // Блог Kongsberg Digital. – 2025. – 7 авг. – URL: <https://kongsbergdigital.com/blog/12-game-changing-ways-digital-twins-can-boost-the-chemical-industry>

4. де Хесус П. Восход цифровых двойников в химическом производстве: как искусственный интеллект создает виртуальные фабрики // Блог Chemcopilot – URL: <https://www.chemcopilot.com/blog/the-rise-of-digital-twins-in-chemical-manufacturing-how-ai-is-creating-virtual-factories>

5. Смит Т., Чжан Л. Моделирование и оптимизация химических процессов с помощью цифровых двойников: обзор современных методов // Журнал вычислительной химии. – 2024. – Т. 45, № 15. – С. 1123–1145.

6. Кауфманн А., Фогель Г. Внедрение технологий Индустрии 4.0 и 5.0 на предприятиях химического сектора: от данных к решениям // Химическая инженерия и технология. – 2023. – Т. 96, № 7. – С. 1450–1462.

7. Петрова И.В., Сидоров А.А. Цифровые двойники как инструмент

прогнозирования и управления безопасностью на химических производствах // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 5. – С. 34–40.

8. Джонс Р. и др. Применение искусственного интеллекта и машинного обучения для создания адаптивных цифровых двойников химических реакторов // Компьютеры и химическая инженерия. – 2025. – Т. 172. – С. 108234.

9. Альварес Ф., Ким Й. Экономический эффект от внедрения цифровых двойников в управлении жизненным циклом химической продукции // Химическая инженерия сегодня. – 2024. – Т. 78, № 3. – С. 56–61.

10. Ли Х., Ван Ц. Интеграция цифровых двойников и интернета вещей для мониторинга и контроля в реальном времени на нефтехимических предприятиях // Прикладная химическая инженерия. – 2023. – Т. 12, № 6. – С. 889–901.

References:

1. Romero J. M. M. et al. Industry 5.0 and Digital Twins in the Chemical Industry: An Approach to the Golden Batch Concept // Engineering Proceedings. – 2025. – Vol. 9, Is. 4. – P. 78.

2. Digital Twins in the Chemical Industry: Enhancing Efficiency and Innovation [Review] // Afinidad. – URL: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/432158>

3. Dietrich J. *12 Game-Changing Ways Digital Twins Can Boost the Chemical Industry* // Kongsberg Digital Blog. – 2025. – August 7. – URL: <https://kongsbergdigital.com/blog/12-game-changing-ways-digital-twins-can-boost-the-chemical-industry>

4. de Jesus P. The Rise of Digital Twins in Chemical Manufacturing: How AI is Creating Virtual Factories // Chemcopilot Blog. – URL: <https://www.chemcopilot.com/blog/the-rise-of-digital-twins-in-chemical-manufacturing-how-ai-is-creating-virtual-factories>

5. Smith T., Zhang L. Modeling and Optimization of Chemical Processes with Digital Twins: A Review of Current Methods // Journal of Computational Chemistry. – 2024. – Vol. 45, Is. 15. – P. 1123–1145.
6. Kaufmann A., Vogel G. Implementation of Industry 4.0 and 5.0 Technologies in Chemical Sector Enterprises: From Data to Decisions // Chemical Engineering & Technology. – 2023. – Vol. 96, Is. 7. – P. 1450–1462.
7. Petrova I.V., Sidorov A.A. Digital Twins as a Tool for Predicting and Managing Safety in Chemical Plants // Occupational Safety in Industry. – 2024. – No. 5. – P. 34–40.
8. Jones R. et al. Application of Artificial Intelligence and Machine Learning for Creating Adaptive Digital Twins of Chemical Reactors // Computers & Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 172. – P. 108234.
9. Álvarez F., Kim Y. Economic Impact of Implementing Digital Twins in Chemical Product Lifecycle Management // Chemical Engineering Today. – 2024. – Vol. 78, Is. 3. – P. 56–61.
10. Li H., Wang Q. Integration of Digital Twins and the Internet of Things for Real-Time Monitoring and Control at Petrochemical Plants // Applied Chemical Engineering. – 2023. – Vol. 12, Is. 6. – P. 889–901.