https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

СТРАТЕГИРОВАНИЕ:
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
2026. Том 6. № 4

Оригинальная статья
УДК 303.4:004.94

Стратегическая оценка критически важных ресурсов промышленного предприятия с применением цифровых моделей (на примере золотодобывающего комбината АО «НГМК»)

Д. С. Евдокимов[1], К. А. Катасонова[2], Е. С. Аксенова[3], А. А. Иншаков[4]
Центральный экономико-математический институт РАН (ЦЭМИ РАН), Москва, Россия
[1]dimaevd15@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-8304-9448
[2]kkristinjour@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-8349-8451
[3]len.krasnova2016@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-5150-4845
[4]inchakov695@gmail.com; https://orcid.org/0009-0002-0892-3988

Аннотация: Дефицит водных ресурсов становится одним из главных ограничений устойчивого развития промышленности в засушливых регионах мира. Даже крупнейшие игроки горно-металлургического сектора, несмотря на технологический потенциал, испытывают серьезные трудности с обеспечением производственных нужд. В Узбекистане, где более 90 % водозабора приходится на сельское хозяйство, конкуренция между аграрным и промышленным секторами выражена достаточно ярко. К числу таких предприятий относится АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» – один из мировых лидеров по производству золота высшей пробы (999,9), ежегодно потребляющий порядка 130–140 млн кубометров воды. Цель исследования заключалась в разработке концептуального подхода к применению имитационного моделирования и технологии цифровых двойников в стратегическом управлении водными ресурсами промышленного предприятия. Объектом исследования выступило структурное подразделение гидрометаллургического завода № 2 (ГМЗ-2) АО «НГМК». Методологическую основу работы составили системный подход, анализ существующих практик цифровизации водопользования и имитационное моделирование производственных процессов. В ходе исследования проанализирована действующая система водопользования АО «НГМК», изучен опыт применения имитационных моделей и цифровых двойников в промышленности, а также определены возможности использования подобных инструментов для анализа водных потоков в процессе переработки руды. Основным результатом исследования стала разработка концепции прототипа цифрового двойника ГМЗ-2, реализуемая на платформе Unity с использованием языка программирования C# и среды разработки Visual Studio. Предложенное решение позволяет проводить многовариантный сценарный анализ, оценивать долгосрочные последствия управленческих решений и проверять достижимость целевых KPI без вмешательства в реальное производство. В дальнейшем такой инструмент может использоваться как дополнительное средство обоснования решений в рамках стратегического планирования водопользования предприятия и, после соответствующей адаптации, применяться для других производственных объектов АО «НГМК».
Ключевые слова: имитационное моделирование, дефицит водных ресурсов, добыча золота, цифровизация, АО «НГМК», цифровой двойник, стратегическое управление, оборотное водоснабжение

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Программно-аналитические комплексы для повышения эффективности принимаемых управленческих решений в Российской Федерации» № FMGF-2025-0001.

© 2026. Автор(ы). Статья распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

Цитирование: Евдокимов Д. С., Катасонова К. А., Аксенова Е. С., Иншаков А. А. Стратегическая оценка критически важных ресурсов промышленного предприятия с применением цифровых моделей (на примере золотодобывающего комбината АО «НГМК») // Стратегирование: теория и практика. 2026. Т. 6. № 4. С. 481–496. https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496; https://elibrary.ru/VWOAAU

Поступила в редакцию 30.07.2026. Прошла рецензирование 03.09.2026. Принята к печати 08.09.2026.

original article

Resource Strategizing for Industrial Enterprises via Digital Modeling: A Gold Mining Case Study

Dmitrij S. Evdokimov[1], Kristina A. Katasonova[2], Elena S. Aksenova[3], Andrey A. Inchakov[4]
Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia
[1]dimaevd15@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-8304-9448
[2]kkristinjour@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-8349-8451
[3]len.krasnova2016@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-5150-4845
[4]inchakov695@gmail.com; https://orcid.org/0009-0002-0892-3988

Abstract: Water scarcity is emerging as a major constraint on sustainable industrial development in arid regions. Even major players in the mining and metallurgical sectors face significant challenges in meeting their operational water requirements, despite their technological capabilities. This tension between the agricultural and industrial sectors is particularly pronounced in Uzbekistan, where agriculture accounts for over 90% of total water withdrawal. As a global leader in the production of 999.9-purity gold, the Navoi Mining and Metallurgical Company consumes approximately 130–140 million cubic meters of water annually. To address this issue, the authors applied simulation modeling and digital twin technology to the strategic management of water resources at this industrial enterprise. The study relied on a systems approach, an analysis of existing water-use digitalization practices, and the simulation modeling of production processes. By integrating an analysis of the actual water-use system with a review of industrial applications for simulation models and digital twins, the authors identified opportunities to apply these tools to water management during ore processing. The resulting conceptual prototype for a digital twin of Hydrometallurgical Plant No. 2 was implemented on the Unity platform using C# and Visual Studio. The proposed solution enables multi-scenario analysis, the assessment of the long-term consequences of management decisions, and the evaluation of target KPI feasibility without interfering with actual production operations. In the future, this tool could facilitate decision-making in the strategic water-use planning of other production facilities.
Keywords: simulation modeling, water resource scarcity, gold mining, digitalization, Navoi Mining and Metallurgical Company, digital twin, strategic management, water recycling

Funding: This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, State Assignment No. FMGF-2025-0001: Decision Support Software and Analytical Systems in the Russian Federation.

Citation: Evdokimov DS, Katasonova KA, Aksenova ES, Inchakov AA. Resource Strategizing for Industrial Enterprises via Digital Modeling: A Gold Mining Case Study. Strategizing: Theory and Practice. 2026;6(4): 481–496. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496; https://elibrary.ru/VWOAAU

Received 30 July 2026. Reviewed 03 September 2026. Accepted 08 September 2026.

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

СТРАТЕГИРОВАНИЕ:
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
2026. Том 6. № 4

应用数字模型对工业企业关键资源进行战略评估（以纳沃伊矿冶联合企业股份公司黄金开采联合企业为例）

德米特里 • 谢尔盖耶维奇 • 叶夫多基莫夫[1]，克里斯蒂娜 • 亚历山德罗夫娜 • 卡塔索诺娃[2]，
叶莲娜 • 谢尔盖耶夫娜 • 阿克谢诺娃[3]，安德烈 • 阿列克谢耶维奇 • 因沙科夫[4]

俄罗斯科学院中央经济数学研究所（CEMI RAS），俄罗斯莫斯科
[1]dimaevd15@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-8304-9448
[2]kkristinjour@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-8349-8451
[3]len.krasnova2016@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-5150-4845
[4]inchakov695@gmail.com; https://orcid.org/0009-0002-0892-3988

摘要：水资源短缺正成为全球干旱地区工业可持续发展的主要制约因素。即使是拥有强大技术实力的矿冶行业巨头，在满足生产需求方面也面临着严峻挑战。在乌兹别克斯坦，农业用水量占总取水量的90%以上，因此农业与工业部门之间的用水竞争尤为激烈。纳沃伊矿冶联合企业股份公司（JSC «NGMK»）便是其中一家典型企业，作为高纯度黄金（999.9）生产领域的全球领导者，其年用水量约为1.3亿至1.4亿立方米。本研究的目的是制定一种概念性方法，将仿真建模与数字孪生技术应用于工业企业的水资源战略管理。研究对象为JSC «NGMK»旗下的2号湿法冶金厂的结构分支。方法论基础包括系统方法、对现有用水数字化实践的分析以及生产过程的仿真建模。研究内容包括分析 JSC «NGMK»当前的用水系统，研究了在工业中使用仿真模型和数字孪生的经验，并且确定了在矿石加工过程中使用这些工具分析水流的可能性。研究的主要成果是为2号湿法冶金厂开发了数字孪生原型概念，该原型基于 Unity 平台，利用了 C# 编程语言和 Visual Studio 开发环境。所提出的解决方案支持多方案情景分析、评估管理决策长期后果并在不干预实际生产的情况下检验KPI指标的可实现性。未来，该工具可作为企业用水战略规划决策的辅助支持手段，并经适当调整后应用于 JSC «NGMK» 的其他生产设施。

关键词：仿真建模，水资源短缺，黄金开采，数字化，JSC «NGMK»，数字孪生，战略管理，循环供水

资助：本研究是在俄罗斯联邦科学与高等教育部国家任务框架内完成的，任务名称为“旨在提高俄罗斯联邦管理决策效率的软件分析系统”，项目编号 FMGF-2025-0001。

2026年7月30日收到稿件。2026年9月3日完成评审。2026年9月8日接受发表。

ВВЕДЕНИЕ

Рост мировых объемов добычи золота сопровождается увеличением водопотребления и энергозатрат. По данным ООН, к 2030 г. глобальный дефицит воды может достичь 40 %[1], и, по предварительной оценке, в 2026 г. более 2 млрд человек[2] проживают в странах, испытывающих острую нехватку водных ресурсов. В условиях изменения климата и ускоряющейся индустриализации проблема рационального водопользования становится одной из ключевых для устойчивого развития горнодобывающего сектора, который традиционно относится к числу наиболее водоемких отраслей промышленности.

Данная проблема напрямую затрагивает Центральную Азию: в частности, Республика Узбекистан сталкивается с серьезным дефицитом воды, который усугубляется ростом численности населения и развитием промышленного сектора экономики. Население страны выросло с 20,6 млн в 1991 г.

[1] Новый доклад ООН подчеркивает острую необходимость более рационального управления водными ресурсами // Unesco. URL: https://www.unesco.org/ru/articles/novyy-doklad-oon-podcherkivaet-ostruyu-neobkhodimost-bolee-racionalnogo-upravleniya-vodnymi (дата обращения: 24.07.2026).
[2] Питьевая вода // Всемирная организация здравоохранения. URL: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water (дата обращения: 24.07.2026).

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

до 36 млн в 2023 г., а к 2050 г. ожидается, что численность превысит 50 млн[3]. Основной объем водозабора приходится на сельское хозяйство, что создает жесткую конкуренцию между аграрным и промышленным секторами, особенно в засушливых регионах, где сосредоточены крупные горнометаллургические предприятия. Среди них – акционерное общество «Навоийский горно-металлургический комбинат» (АО «НГМК»), крупнейший производитель золота и урана в Узбекистане, а также один из ведущих налогоплательщиков и работодателей страны.

В этом контексте эффективное стратегирование[4,5] водопользования становится ядром долгосрочного развития. Оно требует перехода к проактивному планированию, основанному на комплексном анализе ресурсных ограничений, технологических возможностей и внешних экосистемных взаимосвязей. Разработка и реализация стратегии невозможны без применения современных аналитических инструментов, позволяющих воспроизводить сложные производственные взаимосвязи, оценивать последствия управленческих решений в долгосрочной перспективе и проводить сценарный анализ без рисков для реального производства. Одним из таких инструментов являются имитационное моделирование и цифровые двойники производственных объектов, построенные на базе агент-ориентированного подхода. Они объединяют статистические данные с системами мониторинга и становятся эффективной платформой для прогнозирования водопотребления, оптимизации оборотных циклов и снижения экологической нагрузки. Данные подходы к управлению ресурсами и оптимизации производства формируют основу для нового уровня стратегического планирования на производстве[6].

Технологические процессы ежегодно модернизируются, а вопросы оптимизации ресурсов предприятия становятся сложнее, поэтому применяемый инструментальный комплекс должен отвечать современным стандартам. Центральный экономико-математический институт Российской академии наук (ЦЭМИ РАН) имеет многолетний опыт разработки агент-ориентированных моделей, имитационных симуляторов и цифровых двойников, способствующих решению задач промышленного и социально-экономического профиля[7,8]. В рамках сотрудничества с АО «НГМК» и в соответствии со Стратегией эффективного водопользования АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» на период до 2040 г. и более длительную перспективу, учеными ЦЭМИ РАН разработана концепция цифрового двойника для оптимизации водопользования, направленная на повышение эффективности работы комбината и разработку сценарных подходов с максимальной детализацией процессов добычи золота.

Цель исследования заключалась в разработке концептуального подхода к применению имитационного моделирования и технологии цифровых двойников в стратегическом управлении водными ресурсами промышленного предприятия.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выступило структурное подразделение гидрометаллургического завода № 2 (ГМЗ-2) АО «Навоийский горно-металлургический

[3] В сухом остатке: как Узбекистан борется с водным кризисом // Официальный сайт ООО «МИЦ «Известия» МИР. URL: https://iz.ru/1615844/igor-karmazin/v-sukhom-ostatke-kak-uzbekistan-boretsia-s-vodnym-krizisom (дата обращения: 24.07.2026).

[4] Квинт В. Л. Формирование стратегии как науки // Лекции и доклады членов Российской академии наук в СПбГУП (2013–2023): сборник статей. К 300-летию Российской академии наук. СПб.: Санкт-Петербургский Гуманитарный университет профсоюзов, 2023. С. 384–389. https://elibrary.ru/HKWTQE

[5] Квинт В. Л. Развитие стратегии как науки // Лекции и доклады членов Российской академии наук в СПбГУП (2013–2023): сборник статей. К 300-летию Российской академии наук. СПб.: Санкт-Петербургский Гуманитарный университет профсоюзов, 2023. С. 305–314. https://elibrary.ru/KDPZID

[6] Теория и практика стратегирования: сборник избранных научных статей и материалов VIII Международной науч.-практ. конф. М.: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2025. 435 с. https://doi.org/10.55959/MSU012275-6-2025-16

[7] Евдокимов Д. С., Катасонова К. А., Аксенова Е. С. Усовершенствованная агент-ориентированная модель с функционалом сценарного моделирования и свойствами цифрового двойника для прогнозирования социо-эпидемиолого-экономических процессов в регионах России // Искусственные общества. 2023. Т. 18. № 4. С. 5. https://doi.org/10.18254/S207751800028782-9

[8] Имитационное моделирование для решения отечественных задач социально-экономической направленности / Д. С. Евдокимов [и др.]. М.: Центральный экономико-математический институт РАН, 2025. 192 с. https://elibrary.ru/WBNAHR

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

комбинат». Методологическая основа исследования базируется на системном подходе к анализу ресурсного обеспечения водой промышленного предприятия и включает комплекс различных методов: обработку статистических данных и отчетов АО «НГМК» за последние годы; изучение стратегических документов Республики Узбекистан в сфере водных ресурсов; обзор и сравнительный анализ существующих практик применения имитационного моделирования и цифровых двойников на промышленных предприятиях различных отраслей; рассмотрение полного цикла золотодобычи для создания концепции цифрового двойника. Предложенный подход к интеграции цифровых инструментов в систему стратегического управления водными ресурсами основан на принципах проактивного планирования, многовариантного сценарного анализа и оценки долгосрочных последствий управленческих решений без вмешательства в реальный производственный процесс.

В соответствии с подходом Владимира Львовича Квинта – руководителя Стратегии эффективного водопользования АО «НГМК» на период до 2040 г. и более длительную перспективу – стратегирование промышленного предприятия рассматривается как непрерывный процесс формирования и реализации долгосрочных приоритетов, учитывающий глобальные тренды, национальные интересы и внутренние ресурсные ограничения. В связи с этим применительно к настоящему исследованию объектом стратегирования выступает система водопользования подразделения ГМЗ-2 АО «НГМК», при этом внешним ограничением является дефицит водных ресурсов в Республике Узбекистан.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Цифровизация водной отрасли Узбекистана

Засушливый континентальный климат и высокий уровень испарения определяют повышенную нагрузку на имеющиеся водные ресурсы в Республике Узбекистан, которая дополнительно усиливается ввиду численности населения (и увеличения спроса на воду для хозяйственно-бытовых нужд). Традиционно основным потребителем воды в стране является сельское хозяйство, что ограничивает доступность водных ресурсов для промышленного сектора.

Сложившаяся ситуация требует усовершенствования методологии управления ограниченными водными ресурсами, в связи с чем в стране внедряются передовые технологии. Этот процесс активизировался благодаря международным проектам в области интегрированного управления водными ресурсами. В рамках проводимых реформ осуществлялся переход от управления преимущественно по административно-территориальному принципу к управлению с учетом гидрографических границ, что позволило повысить качество координации на разных уровнях, а также способствовало децентрализации[9].

Поскольку большая часть водных ресурсов традиционно расходуется сельским хозяйством, на первый план выходят программы, связанные с повышением эффективности водопользования в промышленности. Таким проектом стала Стратегия эффективного водопользования АО «Навоийский горно-металлургический комбинат на период до 2040 г. и более длительную перспективу» (далее – Стратегия). В ее подготовке приняли участие ученые МГУ имени М. В. Ломоносова, ЦЭМИ РАН и других ведущих научно-исследовательских организаций. Разработанная Стратегия учитывает необходимость применения цифровых технологий, включая системы управления и прогнозирования для оперативного реагирования на возникающие изменения с учетом климатических, экономических, технологических и демографических факторов. В результате закладывается методологическая основа для перехода к проактивному управлению водными ресурсами, в том числе и на уровне промышленных предприятий, таких как АО «НГМК».

В сфере государственной политики в Узбекистане реализуется ряд пилотных проектов с применением

[9] World Bank Supports Water Supply and Sanitation Sector Reforms and Infrastructure Development in Three Regions of Uzbekistan // World Bank Group. URL: https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2020/03/12/uzbekistan-water-services-and-institutional-support-project (дата обращения: 24.07.2026).

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

технологии цифрового двойника для повышения безопасности водных ресурсов, поддержанных Агентством торговли и развития США (USTDA). Один из них предусматривает использование цифровых двойников для мониторинга водопроводной инфраструктуры в реальном времени, выявления утечек и прогнозирования спроса на воду. Данные цифровые решения будут применяться в городах Чирчик и Джизак с возможным расширением на другие регионы Узбекистана, при условии успешной апробации. Он реализуется совместно с Азиатским банком развития (ADB) и компанией Nobel Systems, Inc. (Калифорния)[10].

Международная ассоциация водных ресурсов (IWRA) и Корейская корпорация водных ресурсов (K-water) совместно работают над проектом «Smart Water Management» (SWM), направленным на внедрение информационно-коммуникационных технологий в управление водными ресурсами[11,12]. В материалах проекта рассматривается опыт более чем 25 стран, в том числе и Республики Узбекистан, а представленные примеры охватывают различные направления цифровизации водного хозяйства. В Узбекистане цифровые инструменты применяются в отдельных сферах управления водными ресурсами, но их более широкое использование в промышленном секторе все еще остается актуальной задачей. Цифровизация должна охватывать как фактический учет потребленной воды, так и процесс ее использования в производстве, чтобы в дальнейшем обеспечить оптимизацию расхода данного ресурса. Одним из предприятий, которые могли бы выиграть от применения современных технологий с указанным функционалом, является АО «НГМК».

Технологические решения и автоматизация управления водными ресурсами в АО «НГМК»

АО «НГМК» относится к крупнейшим промышленным предприятиям Республики Узбекистан и занимает важное место в экономике всей страны. Производственная структура комбината включает 12 крупных месторождений, 7 перерабатывающих заводов, а также ряд вспомогательных инфраструктурных объектов[13,14]. Производимые предприятием золотые слитки имеют пробу 999,9 и представлены на мировом рынке драгметаллов. По состоянию на декабрь 2025 г. численность сотрудников составляла более 50 тыс. человек, а общий объем переработанной руды позволил получить порядка 98,19 т драгоценного металла[15]. Значение предприятия для республики можно оценить по объему налоговых поступлений: по итогам 2024 г. АО «НГМК» занял первое место среди крупнейших налогоплательщиков страны (отчисления составили около 2,7 млрд долларов США[16]).

Водохозяйственная система АО «НГМК» включает разветвленную сеть водозаборных сооружений, насосные станции, протяженную сеть трубопроводов, которые обеспечивают водой производственные объекты. Ориентировочная расчетная годо-

[10] USTDA Advances Water Security in Uzbekistan // Официальный сайт The U.S. Trade and Development Agency. URL: https://www.ustda.gov/ustda-advances-water-security-in-uzbekistan/ (дата обращения: 24.07.2026).

[11] Официальный сайт IWRA. IWRA is excited to be collaborating with K-water (the Korea Water Resources Corporation) and water experts from around the world on the new Smart Water Management (SWM) Project // International Water Resources Association. URL: https://www.iwra.org/swm/ (дата обращения: 24.07.2026).

[12] Модельные комплексы для повышения эффективности использования критически важных ресурсов – пресной воды / Д. С. Евдокимов [и др.] // Искусственные общества. 2024. Т. 19. № S. С. 5. https://doi.org/10.18254/S207751800032883-0

[13] Навоийский горнометаллургический комбинат: по пути устойчивого развития // ГУ «Редакция газет «Янги Ўзбекистон» и «Правда Востока». URL: https://yuz.uz/ru/news/navoiyskiy-gorno-metallurgicheskiy-kombinat-po-puti-ustoychivogo-razvitiya (дата обращения: 24.07.2026).

[14] Продукция Навоийского горнометаллургического комбината – эталон качества // Глобус: геология и бизнес. URL: https://www.vnedra.ru/glavnaya-tema/produkcziya-ngmk-etalon-kachestva-18970/ (дата обращения: 24.07.2026).

[15] Финансовые результаты по МСФО за 2025 год // NMMC. URL: https://www.ngmk.uz/wp-content/uploads/2026/03/NMMC-FY-2025-IFRS-RU.pdf (дата обращения: 24.07.2026).

[16] Навоийский ГМК стал лидером по налоговым отчислениям в Узбекистане // KUN.UZ. URL: https://kun.uz/ru/news/2025/01/15/navoiyskiy-gmk-stal-liderom-po-nalogovym-otchisleniyam-v-uzbekistane (дата обращения: 24.07.2026).

[17] Водосбережение – приоритетная задача // НГМК. URL: https://www.ngmk.uz/ru/press-center/news-and-press-releases/Suvni-tejash-ustuvor-vazifa/ (дата обращения: 24.07.2026).

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU
СТРАТЕГИРОВАНИЕ:
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
2026. Том 6. № 4

вая потребность комбината насчитывает порядка 130 млн кубометров[17], при этом фактический забор воды в 2025 г. достиг 141,7 млн кубометров[18]. Водоснабжение осуществляется из нескольких источников, к которым относятся системы орошения Зарафшанского оазиса, водохранилище Тусунсай, а также подземные водоносные горизонты Бешбулаг и Сарибазар.

Одним из направлений снижения потребности в свежей воде является развитие системы оборотного водоснабжения. АО «НГМК» успешно реализует данное направление: за 2022–2024 гг. объем забора воды из поверхностных источников сократился с 97,80 до 92,09 млн кубометров[19].

Управление такими объемами воды требует постоянного учета ее поступления и расходования на отдельных производственных участках. Для этого на АО «НГМК» постепенно внедряются средства автоматизированного контроля и обработки производственных данных[20], включая высокоточные электромагнитные расходомеры Promag для контроля водоподачи[21] и специализированное ПО для сбора и обработки информации. В 2023 г. запущен единый ситуационный центр[22], обеспечивающий информационно-аналитическую поддержку руководства. Основная задача этого центра состоит в комплексном контроле, анализе и управлении процессами геологоразведки, добычи руды, транспортировки и переработки на гидрометаллургических заводах[23].

Научно-технологический задел для реализации водосберегающей стратегии на АО «НГМК» уже сформирован. В 2020 г. при участии ЦЭМИ РАН, МГУ и Московской школы экономики была разработана Стратегия водоснабжения, водоотведения и водного баланса Республики Узбекистан на период до 2035 г. и на более длительную перспективу[24]. Один из контуров стратегического документа предусматривает создание систем долгосрочного планирования водных ресурсов, а в качестве ключевого инструмента предлагает использование имитационного и агент-ориентированного моделирования в комплексе с цифровыми двойниками, что позволяет прогнозировать водопотребление с учетом климатических, экономических, технологических и демографических факторов[25].

АО «НГМК» располагает разветвленной водохозяйственной инфраструктурой, современной технологической базой, а также накопленным опытом внедрения автоматизированных систем ситуационного управления. Комплексный подход создает предпосылки для перехода к более сложным инструментам прогнозирования и стратегического планирования, таким как имитационное моделирование и цифровые двойники производственных процессов, предложенные в стратегии развития комбината специалистами ЦЭМИ РАН.

В мировой практике управления ресурсами сложилась иерархия аналитических инструментов. На начальном уровне находятся статистические

[18] Отчет об устойчивом развитии АО «НГМК» за 2025 год // НГМК. URL: https://www.ngmk.uz/wp-content/uploads/2026/07/%D0%9E%D0%A3%D0%A0-2025-010726.pdf (дата обращения: 24.07.2026).

[19] Холбоев Г. О., Бакоев Х. Ю. Экологические аспекты решения водных проблем путем повторного использования очищенных сточных вод на АО «НГМК» // Горный вестник Узбекистана. 2025. № 1. С. 116–120.

[20] Внедрение цифровых технологий в деятельность АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» // Глобус: геология и бизнес. URL: https://www.vnedra.ru/glavnaya-tema/vnedrenie-czifrovyh-tehnologij-v-deyatelnost-ao-navoijskij-gorno-metallurgicheskij-kombinat-18977/ (дата обращения: 16.05.2025).

[21] Электромагнитные расходомеры серии Promag (Endress+Hauser) // Пром Комплекс Инжиниринг. URL: https://www.pkimpex.ru/series/promag (дата обращения: 16.05.2025).

[22] Запущен единый ситуационный центр // actual.ngmk. URL: https://actual.ngmk.uz/ru/home/pressa/1336-a-unified-situational-center-was-launched.html (дата обращения: 16.05.2025).

[23] Запущен единый ситуационный центр // НГМК. URL: https://www.ngmk.uz/ru/press-center/news-and-press-releases/1336-zapushen-edinyi-situacionnyi-centr/ (дата обращения: 24.07.2026).

[24] Стратегия водоснабжения, водоотведения и водного баланса Республики Узбекистан на период до 2035 года и на более длительную перспективу // Московская школа экономки. URL: https://mse.msu.ru/strategija-vodosnabzhenija-vodootvedenija-i-vodnogo-balansa-respubliki-uzbekistan-na-period-do-2035-goda-i-na-bolee-dlitelnuju-perspektivu/ (дата обращения: 24.07.2026).

[25] Программно-аналитические решения и концепции имитационных моделей молодых ученых ЦЭМИ РАН для государственного администрирования социально-экономических процессов / Д. С. Евдокимов [и др.]. М.: Наука, 2024. 320 с. https://doi.org/10.52929/9785605111061

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

методы и балансовые модели[26], позволяющие оценивать пропорции и выявлять дисбалансы, но ограниченные статичным характером. Более сложный уровень включает в себя сценарное прогнозирование (регрессионный анализ, эконометрику), однако для многостадийных производств с обратными связями эти методы не учитывают стохастику процессов. Наиболее перспективным направлением для промышленных предприятий является разработка цифровых двойников (на базе имитационного моделирования и/или агент-ориентированного подхода), которые позволят с высокой точностью воспроизводить работу производственных систем с учетом случайных факторов, обратных связей и нелинейных зависимостей. Среди подходов имитационного моделирования наиболее гибким предстает агент-ориентированный, при котором каждый элемент системы моделируется как активный объект (он же агент), обладает заданным набором характеристик, внутренним состоянием, памятью и способностью принимать решения[27]. Взаимодействие агентов между собой и с внешней средой позволяет воспроизводить эмерджентные свойства системы, которые невозможно выявить при использовании традиционных аналитических методов. Указанный подход подтвержден результатами ряда реализованных проектов как в международной, так и в российской практике управления промышленными предприятиями.

Практические примеры применения цифровых двойников и имитационного моделирования в промышленности

Эффективность имитационного моделирования и цифровых двойников для управления сложными производственными системами подтверждается рядом успешных проектов, реализованных в различных отраслях промышленности. В качестве примера можно привести имитационно-аналитический комплекс, который представляет собой цифровой двойник перерабатывающих производств нефтегазовой отрасли, разработанный российскими учеными (рис. 1[28]).

В составе представленного комплекса используется имитационная потоковая модель, которая воспроизводит работу реальных объектов производства. В качестве основы для ее построения выбраны Уренгойский завод по подготовке газового конденсата к транспорту и Сургутский завод по стабилизации конденсата (оба предприятия входят в состав комплекса ПАО «Газпром» в Западной Сибири). Модель воспроизводит движение материальных потоков между отдельными участками производства, что позволяет сопоставлять расчетные и фактические показатели работы предприятия.

При этом имитационное моделирование применяется и в более специализированных процессах производства, в частности, при выпуске многоассортиментного высококачественного листового стекла, для которого существенную роль играет расход энергетических и сырьевых ресурсов при переходе производственной линии с одного типа продукции на другой (рис. 2[29]).

Для исследования процесса производства российскими учеными разработана системно-динамическая модель в среде AnyLogic. С ее помощью определяются размеры производственных партий и складских запасов для разных типов стекла с учетом образования стеклобоя (непригодного для прямого использования стекла), который возникает при переходе от выпуска одного вида к другому. Оборудование в этот период продолжает

[26] Балансовый метод: что это, применение в экономике и управление запасами // InvestFuture. URL: https://investfuture.ru/articles/balansoviy-metod-v-analize-khozyaystvennoy-deyatelnosti (дата обращения: 24.07.2026).

[27] Имитационное моделирование для решения…

[28] Заимствовано авторами из опубликованной научной статьи: Разработка имитационно-аналитического комплекса анализа и оптимизации работы перерабатывающих производств нефтегазовой отрасли / Н. А. Кисленко [и др.] // Двенадцатая всероссийская науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2025). СПб.: ЦТСС, 2025. С. 61–77. https://elibrary.ru/HJPBMC

[29] Заимствовано авторами из опубликованной научной статьи: Мешалкин В. П., Большаков А. А., Петров Д. Ю. Оптимизация планирования выпуска партий многоассортиментного высококачественного листового стекла // Известия Санкт-Петербургского технологического института (технического университета). 2025. № 74. С. 66–72. https://doi.org/10.36807/1998-9849-2025-74-100-66-72

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU
СТРАТЕГИРОВАНИЕ:
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
2026. Том 6. № 4



Рис. 1. Структура имитационно-аналитического комплекса

Fig. 1. Structure of the simulation-analytical complex

расходовать сырье и ресурсы, но получаемая продукция не соответствует требуемым параметрам и направляется на переплавку. Вследствие этого увеличение числа таких переходов, а также их продолжительность приводит к дополнительному расходу ресурсов на единицу продукции, поэтому накопление стеклобоя служит прямым индикатором энергоэффективности производства. После 500 итераций получены оптимальные размеры партий, что позволило снизить запасы стеклобоя на 16 % при той же динамике спроса за счет сокращения числа и длительности переходов между режимами.

Еще одним подтверждением эффективности многоуровневого подхода к имитационному моделированию служит проект, реализованный для автоматизированного роботизированного участка литья полимеров под давлением (рис. 3[30]).

Для разработки использована платформа DELMIA 3DEXPERIENCE, специализирующаяся на цифровом проектировании производственных систем. Модель дает возможность получить трехмерную визуализацию работы участка с привязкой к временным параметрам, сформировать управляющие программы для роботов, отработать алгоритмы взаимодействия оборудования, оптимизировать время цикла и рассчитать производительность. Это позволяет еще на этапе проектирования оценить эффективность решения, минимизировать риски простоев при наладке и сформировать базу для дальнейшего масштабирования моделирования

[30] Заимствовано авторами из опубликованной научной статьи: Абаев Г. Е., Демкович Н. А., Яблочников Е. И. Роль и задачи имитационного моделирования на этапе перехода от цифрового производства к «умным фабрикам» // Труды Восьмой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2017. СПб.: ЦТСС, 2017. С. 219–227.

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

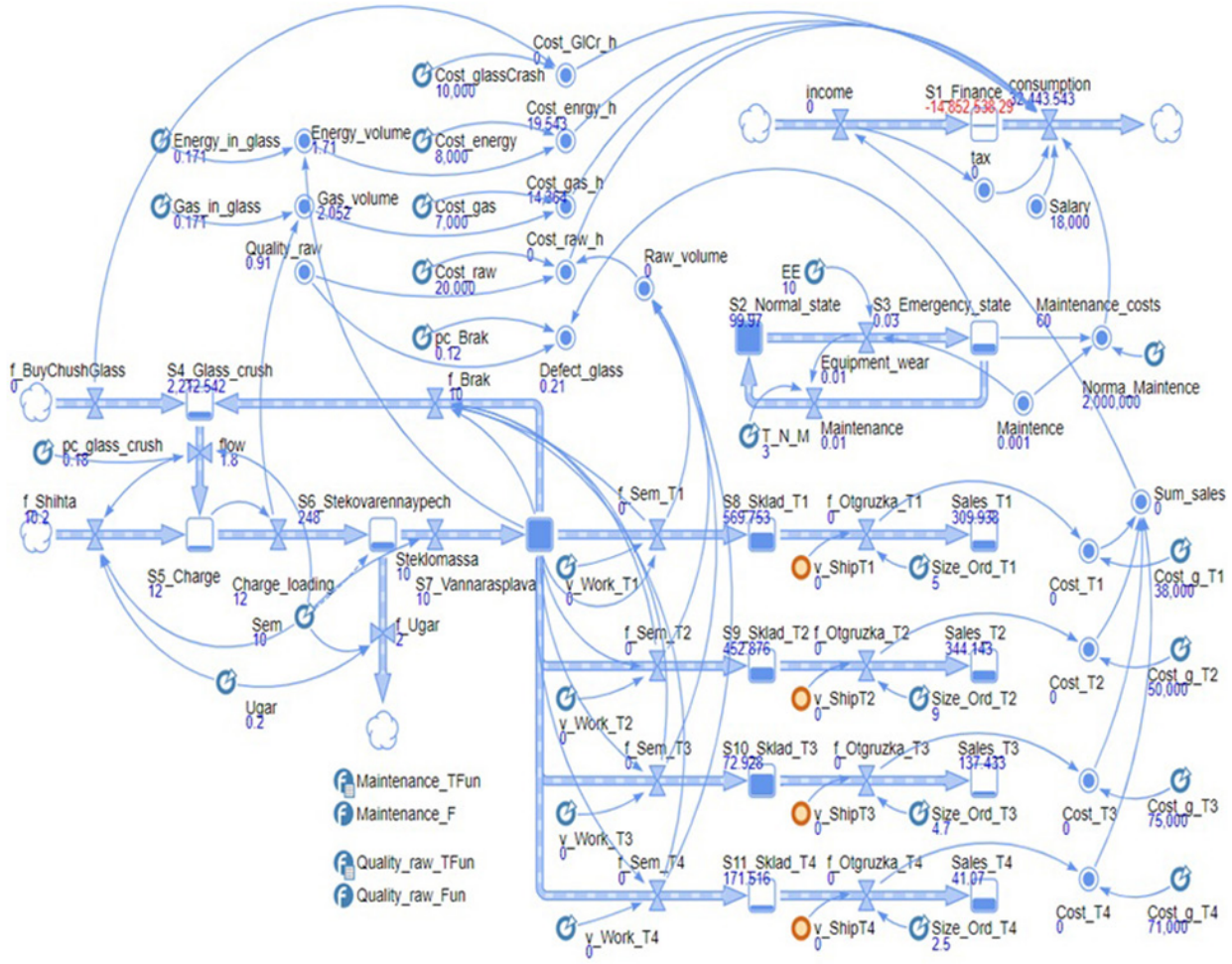


Рис. 2. Блок-схема системно-динамической модели производства высококачественного листового стекла

Fig. 2. System-dynamic model of high-quality sheet glass production

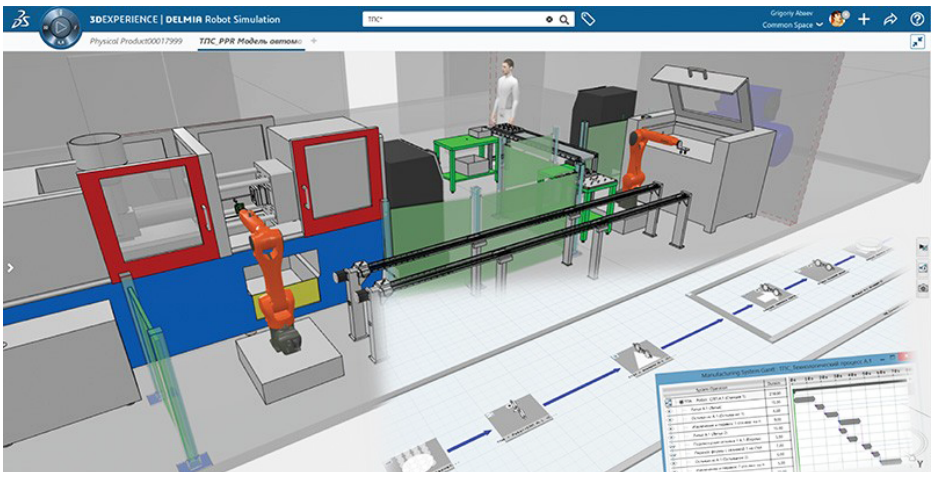


Рис. 3. Имитационная модель автоматизированного роботизированного участка литья полимеров с использованием термопластавтомата

Fig. 3. Simulation model of an automated robotic polymer molding section using a thermoplastic injection molding machine

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU
СТРАТЕГИРОВАНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
2026. Том 6. № 4

на межцеховой уровень, а также для интеграции с реальным оборудованием в рамках концепции цифрового двойника.

В Центральном экономико-математическом институте Российской академии наук (ЦЭМИ РАН) накоплен многолетний опыт разработки подобных инструментов для широкого круга социально-экономических и промышленных задач. Примером может служить исследование сотрудников института, в котором представлен авторский подход к разработке цифрового двойника завода по выпуску телевизионной техники (рис. 4[31]).

Для решения поставленной задачи авторы построили гибридную имитационную модель в среде AnyLogic, объединяющую дискретно-событийное и агентное моделирование. Целевая функция направлена на максимизацию накопленной валовой прибыли, а оптимизация выполняется встроенным алгоритмом по управляемым параметрам, таким как численность сборщиков, контролеров, упаковщиков, а также время выполнения операций.

Таким образом, спектр применения имитационного моделирования и цифровых двойников охватывает множество отраслей промышленности и позволяет решать производственные задачи разной направленности.

Концепция прототипа цифрового двойника гидрометаллургического завода (ГМЗ-2) для АО «НГМК»

Одной из задач, поставленных при разработке Стратегии для АО «НГМК», стало создание инструмента для анализа водопотребления в производственном процессе. Необходимость такой разработки

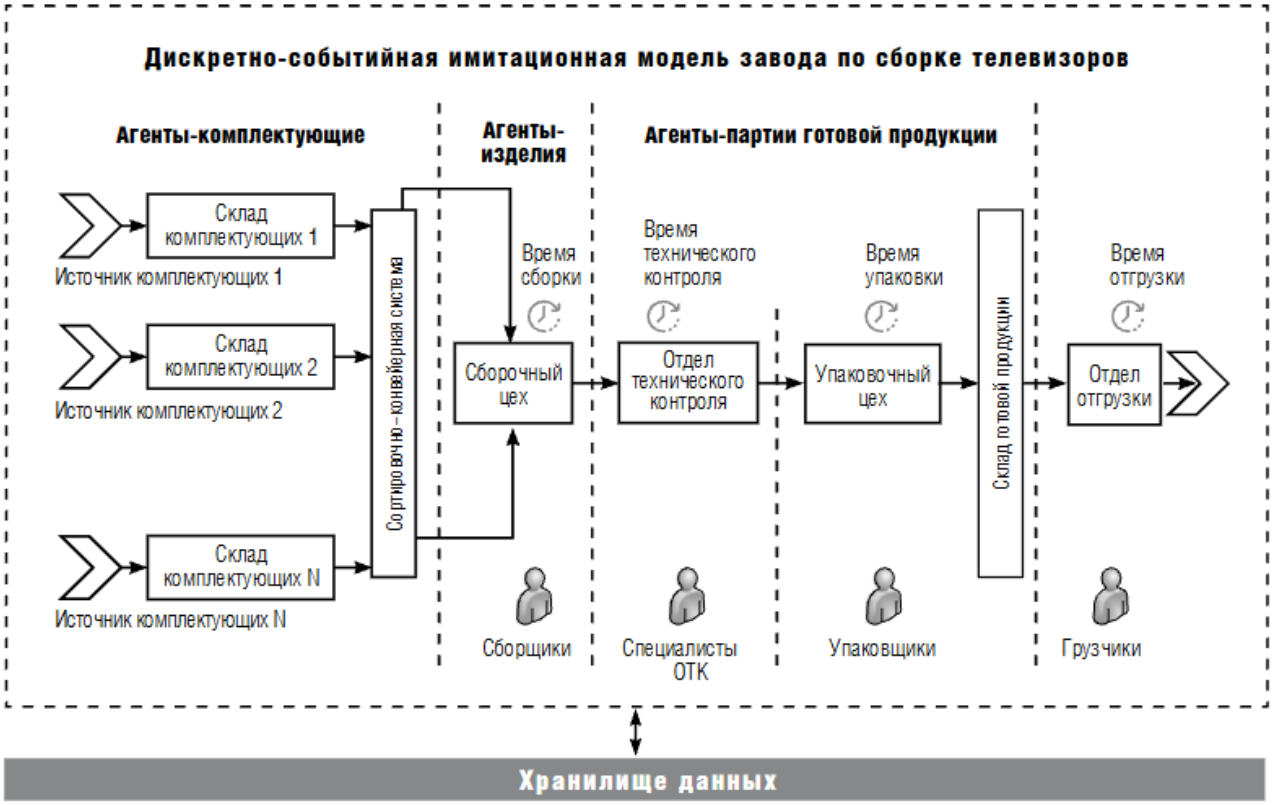


Рис. 4. Укрупненная схема цифрового двойника производственного предприятия

Fig. 4. Digital twin of a manufacturing enterprise

[31] Заимствовано авторами из опубликованной научной статьи: Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик / В. Л. Макаров [и др.] // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 2. С. 7–20. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

заключается в том, что вода используется сразу на нескольких стадиях обработки руды, причем ее часть возвращается в производственный цикл для повторного использования. В результате общий водный баланс зависит от характеристик оборудования, объемов переработки руды и распределения оборотной воды между технологическими стадиями. Для исследования этих взаимосвязей авторами была разработана концепция прототипа цифрового двойника одного из производственных объектов АО «НГМК» – ГМЗ-2. Программная часть прототипа создается в среде Unity с использованием Visual Studio (рис. 5[32]).

Архитектура прототипа содержит три уровня. Первый предназначен для общего контроля завода и наблюдения, на втором представлены отдельные стадии переработки руды, между которыми и производится движение сырья и воды. Третий уровень включает используемое на каждой стадии оборудование с возможностью изменения характеристик отдельных объектов, чтобы отслеживать, как это отражается на работы последующих стадий и итоговом водном балансе. При разработке модели учитываются данные о переработке золотосодержащей руды и водопотреблении на предприятиях АО «НГМК», в том числе сведения об использовании оборотной воды за 2024 г. За основу принята технологическая последовательность стадий производства на ГМЗ-2, а предполагаемые функциональные возможности включают:

– пошаговое моделирование всех стадий обработки золотоносной руды в соответствии с существующей технологической схемой;
– возможность конфигурации параметров работы оборудования (производительность, водопотребление) как на этапе инициализации модели, так и в реальном времени ее работы;
– реализация системы оборотного водоснабжения;

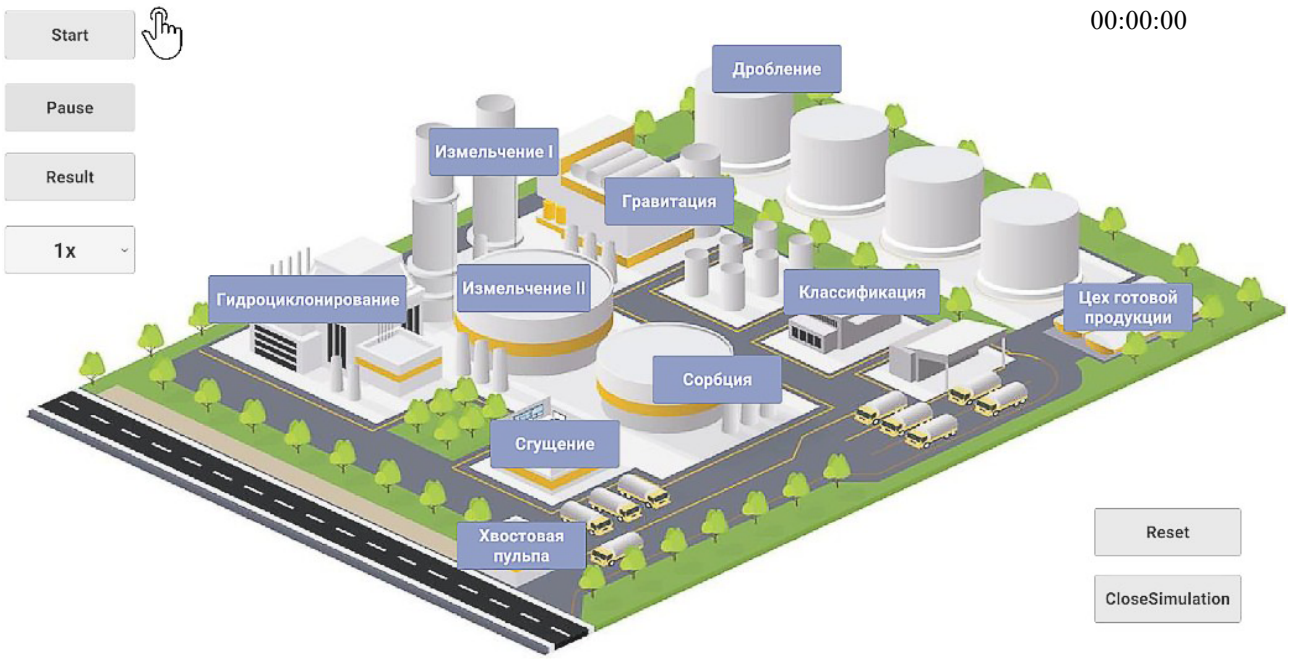


Рис. 5. Изображение виртуальной версии золотоперерабатывающего завода гидрометаллургического завода № 2 со всеми стадиями обработки в среде разработки Unity

Fig. 5. Virtual twin of Hydrometallurgical Plant No. 2 with all processing stages in the Unity development environment

[32] Составлен авторами.

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

– визуализация технологического процесса с помощью интерфейса, который в реальном времени отображает ключевые показатели;
– формирование итогового отчета с возможностью выгрузки полученных результатов симуляции.

Предполагается реализация нескольких сценариев работы оборудования: базовый (штатный) режим, соответствующий текущим производственным показателям, и варьируемый режим, позволяющий изменять загрузку машин, их производительность, отключать отдельные агрегаты и др. Такой подход позволит количественно оценивать последствия управленческих и технологических решений, а также их влияние на производственные показатели. Предлагаемая концепция призвана стать примером системы поддержки принятия решений, обеспечивающей связь между стратегическими KPI и операционными параметрами производства.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенное исследование показывает, что для крупных промышленных предприятий вопросы водопользования необходимо рассматривать не только с позиции текущего учета и обеспечения производства необходимыми объемами воды. Республика Узбекистан представляет собой наиболее наглядный пример отраслевого дисбаланса в водопользовании. Ежегодный объем забора воды в стране составляет порядка 51–53 млрд кубометров, причем более 90 % приходится на орошаемое земледелие. При существующей структуре водопотребления рост численности населения и дальнейшее развитие промышленности будут увеличивать нагрузку на имеющиеся водные ресурсы страны. Одним из крупных промышленных потребителей воды является АО «Навоийский горно-металлургический комбинат», годовая потребность которого составляет около 130–140 млн кубометров воды. Поэтому сокращение потребления свежей воды и увеличение доли ее повторного использования являются для предприятия долгосрочной стратегической задачей.

На АО «НГМК» уже применяются отдельные технические и цифровые средства контроля производственных процессов и водопотребления, включая электромагнитные расходомеры Promag, системы сбора и обработки данных, а также ситуационный центр на базе гидрометаллургического завода № 2 (ГМЗ-2). Все они позволяют получать и анализировать информацию о текущем состоянии производственных объектов. Несмотря на это, для стратегического планирования указанного инструментария недостаточно, поскольку необходимо оценивать более детальные параметры, например влияние изменения производительности оборудования, объемов переработки руды или доли распределения оборотной воды на общий водный баланс предприятия. Для решения таких задач используются разные классы инструментов, в том числе инструменты имитационного моделирования и цифровые двойники, такие как глобальные гидрологические модели WaterGAP, EPANET, CWatM, а также отраслевые инструменты Geobank, Datamine и технологии очистки AOP/ZLD[33].

Центральный экономико-математический институт РАН (ЦЭМИ РАН) имеет многолетний опыт разработки цифровых двойников и участия в создании пяти комплексных стратегий социально-экономической и промышленной направленности (в том числе для Санкт-Петербурга, Республики Узбекистан, Кузбасса и др.), поэтому в рамках сотрудничества с комбинатом ученые из лаборатории компьютерного моделирования социально-экономических процессов (1.09) предложили концептуальную архитектуру цифрового двойника системы оборотного водоснабжения гидрометаллургического завода ГМЗ-2. В перспективе доработанная практическая версия модели может стать центральным элементом информационно-аналитической системы ситуационного центра ГМЗ-2 и служить платформой для стратегического планирования, обучения персонала решению задач в условиях ресурсных ограничений, а также может быть ориентиром для других филиалов комбината.

[33] Модельные комплексы для повышения…

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

ЛИТЕРАТУРА

Абаев Г. Е., Демкович Н. А., Яблочников Е. И. Роль и задачи имитационного моделирования на этапе перехода от цифрового производства к «умным фабрикам» // Труды Восьмой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2017. СПб.: ЦТСС, 2017. С. 219–227.

Евдокимов Д. С., Катасонова К. А., Аксенова Е. С. Усовершенствованная агент-ориентированная модель с функционалом сценарного моделирования и свойствами цифрового двойника для прогнозирования социо-эпидемиолого-экономических процессов в регионах России // Искусственные общества. 2023. Т. 18. № 4. С. 5. https://doi.org/10.18254/S207751800028782-9

Имитационное моделирование для решения отечественных задач социально-экономической направленности / Д. С. Евдокимов [и др.]. М.: Центральный экономико-математический институт РАН, 2025. 192 с. https://elibrary.ru/WBNAHR

Квинт В. Л. Развитие стратегии как науки // Лекции и доклады членов Российской академии наук в СПбГУП (2013–2023): сборник статей. К 300-летию Российской академии наук. СПб.: Санкт-Петербургский Гуманитарный университет профсоюзов, 2023. С. 305–314. https://elibrary.ru/KDPZID

Квинт В. Л. Формирование стратегии как науки // Лекции и доклады членов Российской академии наук в СПбГУП (2013–2023): сборник статей. К 300-летию Российской академии наук. СПб.: Санкт-Петербургский Гуманитарный университет профсоюзов, 2023. С. 384–389. https://elibrary.ru/HKWTQE

Мешалкин В. П., Большаков А. А., Петров Д. Ю. Оптимизация планирования выпуска партий многоассортиментного высококачественного листового стекла // Известия Санкт-Петербургского технологического института (технического университета). 2025. № 74. С. 66–72. https://doi.org/10.36807/1998-9849-2025-74-100-66-72

Модельные комплексы для повышения эффективности использования критически важных ресурсов – пресной воды / Д. С. Евдокимов [и др.] // Искусственные общества. 2024. Т. 19. № S. С. 5. https://doi.org/10.18254/S207751800032883-0

Программно-аналитические решения и концепции имитационных моделей молодых ученых ЦЭМИ РАН для государственного администрирования социально-экономических процессов / Д. С. Евдокимов [и др.]. М.: Наука, 2024. 320 с. https://doi.org/10.52929/9785605111061

Разработка имитационно-аналитического комплекса анализа и оптимизации работы перерабатывающих производств нефтегазовой отрасли / Н. А. Кисленко [и др.] // Двенадцатая всероссийская науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2025). СПб.: ЦТСС, 2025. С. 61–77. https://elibrary.ru/HJPBMC

Теория и практика стратегирования: сборник избранных научных статей и материалов VIII Международной науч.-практ. конф. М.: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2025. 435 с. https://doi.org/10.55959/MSU012275-6-2025-16

Холбоев Г. О., Бакоев Х. Ю. Экологические аспекты решения водных проблем путем повторного использования очищенных сточных вод на АО «НГМК» // Горный вестник Узбекистана. 2025. № 1. С. 116–120.

Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик / В. Л. Макаров [и др.] // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 2. С. 7–20. https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

REFERENCES

Abaev GE, Demkovich NA, Yablochnikov EI. The role and objectives of simulation modeling at the stage of transition from digital production to smart factories. Proceedings of the Eighth All-Russian Scientific and practical Conference on simulation modeling and its application in science and industry "Simulation modeling. Theory and practice" IMMOD-2017. St. Petersburg: CTSS; 2017. P. 219–227. (In Russ.)

Evdokimov DS, Aksenova ES, Katasonova KA, Inshakov AA, Burilina MA, et al. Simulation modeling for solving domestic problems of socio-economic orientation. Moscow: Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences; 2025. 192 p. (In Russ.) https://elibrary.ru/WBNAHR

Evdokimov DS, Aksenova ES, Katasonova KA, Loginova VE, Konkova TA, et al. Software-analytical solutions and concepts of simulation models of young scientists from CEMI RAS for public administration of socio-economic processes Moscow: Nauka; 2024. 320 p. (In Russ.) https://doi.org/10.52929/9785605111061

Evdokimov DS, Gamidullaeva LA, Katasonova KA, Aksenova ES, Inshakov AA. Model complexes for increasing the efficiency of the use of critical resources – fresh water. Artificial societies. 2024;19(S):5. (In Russ.) https://doi.org/10.18254/S207751800032883-0

Evdokimov DS, Katasonova KA, Aksenova ES. An Improved agent-based model with scenario modeling functional and digital twin properties for forecasting socio-epidemiological-economic processes in the regions of Russia. Artificial societies. 2023;18(4):5. (In Russ.) https://doi.org/10.18254/S207751800028782-9

Kholboev GO, Bakoev HYu. Environmental aspects of solving water problems through reuse of treated wastewater at JSC "NGMK". Gorniy Vestnik Uzbekistana. 2025;(1):116–120. (In Russ.)

Kislenko NA, Litvin YuV, Obukhov OE, Kulik VS, Boronin IA, et al. Simulation-analytical complex for the analysis and optimization of oil and gas processing operations. The Twelfth All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry "Simulation Modeling. Theory and Practice" (IMMOD-2025). St. Petersburg: CTSS; 2025. P. 61–77. (In Russ.) https://elibrary.ru/HJPBMC

Kvint VL. Development of Strategy as a Science. Lectures and Papers of Members of the Russian Academy of Sciences at St. Petersburg State University of the Humanities (2013–2023): Collection of articles. On the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg Humanitarian University of Trade Unions; 2023. P. 305–314. (In Russ.) https://elibrary.ru/KDPZID

Kvint VL. Formation of strategy as a science. Lectures and Papers by Members of the Russian Academy of Sciences at St. Petersburg State University of the Humanities (2013–2023): Collection of articles. On the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg Humanitarian University of Trade Unions; 2023. P. 384–389. (In Russ.) https://elibrary.ru/HKWTQE

Makarov VL, Bakhtizin AR, Beklaryan GL, Akopov AS. Digital plant: Methods of discrete-event modeling and optimization of production characteristics. Business Informatics. 2021;15(2):7–20. (In Russ.) https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20

Meshalkin VP, Bolshakov AA, Petrov DYu. Optimization of production planning for lots of multiassortment high-quality sheet glass. Bulletin of the Saint Petersburg Institute of Technology (Technical University). 2025;(74):66–72. (In Russ.) https://doi.org/10.36807/1998-9849-2025-74-100-66-72

Theory and Practice of Strategizing: Collection of Selected Scientific Articles and Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2025. 435 p. (In Russ.) https://doi.org/10.55959/MSU012275-6-2025-16

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2026-6-4-481-496
https://elibrary.ru/VWOAAU

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА: Каждый из соавторов внес одинаковый вклад в выполненную работу.
КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ: Евдокимов Дмитрий Сергеевич, Центральный экономико-математический институт РАН (ЦЭМИ РАН), Москва, Россия; dimaevd15@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-8304-9448
Катасонова Кристина Александровна, Центральный экономико-математический институт РАН (ЦЭМИ РАН), Москва, Россия; kkristinjour@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-8349-8451
Аксенова Елена Сергеевна, Центральный экономико-математический институт РАН (ЦЭМИ РАН), Москва, Россия; len.krasnova2016@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-5150-4845
Иншаков Андрей Алексеевич, Центральный экономико-математический институт РАН (ЦЭМИ РАН), Москва, Россия; inchakov695@gmail.com; https://orcid.org/0009-0002-0892-3988

CONTRIBUTION: All the authors contributed equally to this work.
CONFLICT OF INTEREST: The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.
ABOUT AUTHORS: Dmitrij S. Evdokimov, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia; kkristinjour@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-8349-8451
Kristina A. Katasonova, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia; kkristinjour@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-8349-8451
Elena S. Aksenova, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia; len.krasnova2016@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-5150-4845
Andrey A. Inshakov, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia; inchakov695@gmail.com; https://orcid.org/0009-0002-0892-3988