

**Абрамов Игорь Викторович**  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

### **Оценка экономической эффективности внедрения цифровых двойников для управления парком оборудования в аддитивном производстве**

**Аннотация.** Статья посвящена разработке методики оценки экономической эффективности внедрения системы цифровых двойников для управления парком оборудования в аддитивном производстве. Рассмотрены функциональная структура системы, специфика применения цифровых двойников в условиях многофакторных производственных процессов и методологические подходы к оценке инвестиций в цифровизацию. Предложена комплексная модель расчета показателей эффективности, включающая NPV, IRR, ROI и TCO. На основе модельного примера проведена количественная оценка выгод, затрат и рисков проекта. Результаты исследования подтверждают высокую экономическую целесообразность внедрения цифровых двойников, демонстрируя значительное сокращение простоев и операционных расходов.

**Ключевые слова:** цифровые двойники, аддитивное производство, экономическая эффективность, предиктивная аналитика, управление производством.

**Abramov Igor Viktorovich**  
National Research Nuclear University MEPHI

### **Evaluating the Economic Efficiency of Implementing Digital Twins for Equipment Fleet Management in Additive Manufacturing**

**Annotation.** This article develops a methodology for evaluating the economic efficiency of implementing a digital twin system for equipment fleet management in additive manufacturing. The functional structure of the system, the specifics of using digital twins in multifactorial production processes, and methodological approaches to evaluating investments in digitalization are discussed. A comprehensive model for calculating performance indicators, including NPV, IRR, ROI, and TCO, is proposed. A model example is used to quantitatively assess the benefits, costs, and risks of the project. The results of the study confirm the high economic feasibility of implementing digital twins, demonstrating a significant reduction in downtime and operating expenses.

**Keywords:** digital twins, additive manufacturing, economic efficiency, predictive analytics, production management.

Современное промышленное производство переживает период интенсивной цифровой трансформации, связанной с внедрением технологий Индустрии 4.0. При этом цифровая трансформация должна рассматриваться не просто как внедрение отдельных технологий, а как системная инновация, требующая построения концептуальной модели управления, объединяющей операционный, аналитический блоки и блок управления изменениями для повышения адаптивности предприятия к рыночным условиям [1] и одним из наиболее перспективных направлений цифровизации является применение технологии цифровых двойников, которая демонстрирует стремительный рост: объем рынка цифровых двойников в 2024 году оценивался в 13,6 млрд долларов США и, как ожидается, будет расти со среднегодовым темпом роста в 41,4% в период с 2025 по 2034 год, чему способствует растущее внимание к устойчивому развитию и энергоэффективности [2].

Особую актуальность технология цифровых двойников приобретает в контексте аддитивного производства (АП), характеризующегося высокой сложностью технологических процессов, многопараметричностью контроля и значительной капиталоемкостью оборудования [3]. Аддитивное производство играет жизненно важную роль в Индустрии 4.0 благодаря возможности децентрализации и сокращению производственных циклов, однако для полного раскрытия его потенциала необходим системный подход к управлению, рассматривающий цифровое АП как комплексную инновацию в продуктах и процессах [4].

Аддитивное производство требует непрерывного мониторинга множества взаимосвязанных параметров: температурных полей, скорости наплавления материала, качества порошковых композиций, вибрационных характеристик, что делает традиционные методы управления оборудованием недостаточно эффективными. Незапланированные простои промышленного оборудования АП могут приводить к потерям до \$26,000 в час, что обусловлено не только упущенной прибылью, но и высокой стоимостью производственных активов и в этих условиях цифровые двойники, создающие виртуальную копию физического оборудования с синхронизацией данных в реальном времени, предоставляют возможность прогнозирования отказов и оптимизации производственных процессов [5].

Несмотря на растущий интерес научного сообщества и промышленных предприятий к технологии цифровых двойников, существует значительный пробел в методологическом обеспечении оценки экономической эффективности их внедрения применительно к управлению парком оборудования аддитивного производства. Существующие исследования либо фокусируются на технических аспектах разработки цифровых двойников, либо рассматривают отдельные процессы без комплексной экономической оценки [6].

Целью настоящего исследования является разработка комплексной методики оценки экономической эффективности внедрения системы цифровых двойников для управления парком оборудования в аддитивном производстве. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: систематизация функциональных возможностей цифровых двойников в контексте АП; идентификация статей затрат и источников экономического эффекта; разработка модели расчета показателей эффективности (NPV, IRR, ROI, TCO); проведение сценарного анализа и оценки рисков; формулирование практических рекомендаций по внедрению.

Научная гипотеза исследования заключается в том, что внедрение цифровых двойников в управление парком оборудования АП обеспечивает положительную чистую приведенную стоимость и рентабельность инвестиций более 50% в течение двух лет за счет сокращения простоев на 40-50%, оптимизации загрузки оборудования и снижения эксплуатационных затрат на 15-25%.

Концепция цифровых двойников была впервые сформулирована М. Гривсом в 2002 году как виртуальное представление физического объекта или процесса, обеспечивающее двустороннюю передачу данных в реальном времени [7]. В производственном контексте цифровой двойник представляет собой динамическую цифровую модель физического актива, которая непрерывно обновляется на основе данных, получаемых от встроенных сенсоров и систем мониторинга [8]. Технологический стек цифровых двойников включает несколько взаимосвязанных элементов: сеть IoT-сенсоров для сбора данных, облачные или периферийные вычислительные платформы для обработки информации, алгоритмы машинного обучения для прогнозной аналитики и системы имитационного моделирования для оценки альтернативных сценариев [9]. Цифровые двойники позволяют моделировать сценарии «что будет, если», обеспечивая поддержку более оперативного и экономически обоснованного принятия решений, а также способствуют глубокому пониманию поведения сложных физических систем на всех этапах жизненного цикла [10].

Аддитивное производство характеризуется рядом особенностей, определяющих специфические требования к системам управления оборудованием. Многофакторность технологических процессов АП, включающая одновременный контроль температурных полей, скорости наплавления, качества исходных материалов и вибрационных характеристик, создает сложную задачу оптимизации, решение которой традиционными методами затруднительно [3]. Высокая капиталоемкость промышленного оборудования АП, стоимость которого варьируется от \$150,000 для систем селективного лазерного спекания (SLS) до \$1,000,000 для установок прямого лазерного выращивания металлов (DMLS), обуславливает критическую важность предиктивного обслуживания для предотвращения дорогостоящих отказов.

Систематический обзор применения цифровых двойников в АП, выполненный [3], демонстрирует, что основные направления использования технологии включают: мониторинг процесса в реальном времени с возможностью корректировки параметров, прогнозирование дефектов и качества продукции, оптимизацию траекторий перемещения печатающей головки и планирование предиктивного обслуживания. Перспективным направлением развития также является интеграция производственных мощностей в цифровые платформы аддитивных услуг, что позволяет реализовать новые бизнес-модели и обеспечить гибкое взаимодействие между заказчиками и распределенными производственными площадками [11].

Экономическая оценка инвестиций в цифровые технологии представляет собой методологическую задачу, требующую адаптации традиционных финансовых инструментов. Классические показатели эффективности инвестиционных проектов - чистая приведенная стоимость (NPV), внутренняя норма доходности (IRR) и срок окупаемости - не всегда адекватно отражают специфику цифровой трансформации, связанную с наличием трудноизмеримых выгод и отложенных эффектов [12].

Концепция совокупной стоимости владения (ТСО), разработанная для оценки ИТ-систем, позволяет учитывать не только прямые капитальные и операционные затраты, но и скрытые издержки, связанные с интеграцией, миграцией данных, обучением персонала и организационными изменениями [13]. В работе [14] показана применимость методологии ТСО для оценки проектов внедрения цифровых двойников в российских промышленных предприятиях, подчеркивая необходимость учета специфики отечественной производственной среды. Анализ эмпирических исследований и практических кейсов свидетельствует о значительном экономическом потенциале технологии цифровых двойников. Внедрение цифровых двойников в производственные процессы позволяет сократить время разработки продукции до 50% и повысить выполнение обязательств перед клиентами до 20%. Российское исследование, проведенное в 2025 году, показало рост рентабельности инвестиций в цифровые двойники с 20% в 2021 году до 80% в 2024 году, что свидетельствует о повышении зрелости технологии и накоплении экспертизы внедрения [14].

Особый интерес представляют данные о влиянии цифровых двойников на эксплуатационные показатели оборудования, в отчете [15] показана возможность сокращения незапланированных простоев на 45-50% за счет предиктивной аналитики, снижение затрат на обслуживание на 10-30% и сокращение операционных расходов на 15-25%.

Методологической основой оценки экономической эффективности выступает дисконтированный анализ денежных потоков с расчетом комплекса показателей. Чистая приведенная стоимость проекта и внутренняя норма доходности рассчитывались по стандартным формулам.

Рентабельность инвестиций рассчитывается как отношение совокупных приведенных выгод к совокупным приведенным затратам:

$$ROI = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}} \times 100\%$$

где  $B_t$  — выгоды в период  $t$ ,  $C_t$  — затраты в период  $t$ ,  $r$  — ставка дисконтирования. Совокупная стоимость владения системой цифровых двойников за период планирования определяется как:

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^T \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}$$

где  $CAPEX$  — капитальные затраты,  $OPEX_t$  — операционные затраты в период  $t$ .

Предлагаемая архитектура включает четыре функциональных модуля. Модуль сбора данных базируется на сети IoT-сенсоров (температура, вибрация), передающих информацию по протоколу MQTT. Модуль предиктивной аналитики использует алгоритмы машинного обучения (Random Forest, LSTM) для прогнозирования состояния оборудования. Модуль оптимизации загрузки реализует динамическое планирование производственных заданий. Модуль визуализации предоставляет интерфейс мониторинга в реальном времени. Важным аспектом является интеграция с корпоративными системами (ERP, MES) для обеспечения сквозной цифровизации. Техническая инфраструктура включает серверное оборудование с резервированием и защищенные каналы связи.

Капитальные затраты (CAPEX) на внедрение системы для парка из 10 единиц оборудования оцениваются в \$220,000 (табл.1). Операционные затраты (OPEX) составляют \$66,000 в год (табл.2). Бюджет проекта на первый год с учетом скрытых издержек составляет \$286,000. Внедрение рекомендуется проводить поэтапно: пилот, масштабирование, оптимизация.

Ключевым источником эффекта является сокращение незапланированных простоев. При базовом уровне простоев 8% и стоимости часа \$10,000 потери составляют \$7 млн в год. Внедрение цифровых двойников позволяет сократить простои на 45%, [11] экономя \$3,15 млн ежегодно.

Таблица 1. Капитальные затраты (CAPEX)

Статья затрат	Количество	Цена за ед.	Сумма
IoT-сенсоры и контроллеры	40 комплектов	\$500	\$20,000
Серверное оборудование	2 сервера	\$15,000	\$30,000
Сетевое оборудование	1 комплект	\$10,000	\$10,000
Лицензии ПО (платформа ЦД)	10 единиц оборудования	\$5,000	\$50,000
Разработка ML-моделей и интеграция	-	-	\$80,000
Обучение персонала	15 человек	\$2,000	\$30,000
Итого CAPEX			\$220,000

Таблица 2. Операционные затраты (OPEX, годовые)

Статья затрат	Сумма/год
Поддержка и обновление ПО (20% от стоимости лицензий)	\$10,000
Обслуживание серверов и сети	\$5,000
Хранение и обработка данных (облако)	\$8,000
Сопровождение системы (0.5 FTE инженера)	\$40,000
Калибровка сенсоров	\$3,000
Итого OPEX	\$66,000

Оптимизация технического обслуживания (переход к предиктивной модели) снижает затраты на 20%, экономя \$50,000 в год. Повышение общей эффективности

оборудования (ОЕЕ) с 65% до 85% обеспечивает прирост производительности, эквивалентный дополнительной выручке \$616,000. Снижение брака дает экономию \$36,000, а энергоэффективность — \$9,600. Совокупные годовые выгоды оцениваются в \$3,86 млн.

Финансовый анализ на горизонте 5 лет показывает высокую привлекательность проекта. Чистая приведенная стоимость (NPV) при ставке дисконтирования 10% составляет \$12,4 млн. Внутренняя норма доходности (IRR) достигает 754%, что объясняется быстрой окупаемостью (менее 1 года). Рентабельность инвестиций (ROI) за 5 лет составляет 2,999%. Индекс рентабельности (PI) равен 57,4.

Эти показатели подтверждают гипотезу о высокой эффективности внедрения цифровых двойников в АП, значительно превосходящей традиционные инвестиционные альтернативы.

Анализ чувствительности показал, что NPV наиболее эластичен к сокращению простоев (+1,8) и приросту ОЕЕ (+1,5). Влияние капитальных затрат минимально (эластичность -0,2).

Сценарный анализ подтверждает устойчивость проекта (табл.3). Даже в пессимистичном сценарии (сокращение простоев 30%, перерасход CAPEX 25%) NPV остается положительным (\$6,2 млн), а срок окупаемости не превышает 1,2 года.

Таблица 3. Результаты сценарного анализа показателей экономической эффективности (горизонт 5 лет)

Показатель	Пессимистичный сценарий	Базовый сценарий	Оптимистичный сценарий
<b>Ключевые предпосылки</b>			
Сокращение простоев	30%	45%	50%
Прирост ОЕЕ	20%	30,8%	40%
Изменение CAPEX	+25% (перерасход)	0% (план)	-10% (экономию)
<b>Финансовые результаты</b>			
Чистая приведенная стоимость (NPV)	\$ 6 200 000	\$ 12 415 519	\$ 18 500 000
Внутренняя норма доходности (IRR)	1 450%	754%	> 4 000%
Дисконтированный срок окупаемости (DPP)	1,2 года	< 1 года	0,7 года
Рентабельность инвестиций (ROI)	1 450%	2 999%	4 200%

Основные риски включают низкую точность ML-моделей, сопротивление персонала и проблемы интеграции (табл.4). Для минимизации рисков предусмотрены пилотное тестирование, программы обучения и поэтапное внедрение.

Таблица 4. Матрица рисков

Риск	Вероятность	Влияние	Приоритет	Стратегия минимизации
Низкая точность ML-моделей	Средняя	Высокое	Критический	Пилотное тестирование на 3 принтерах, дообучение на реальных данных
Сопrotивление персонала	Высокая	Среднее	Высокий	Программа обучения, вовлечение на ранних этапах
Проблемы интеграции с ERP	Средняя	Среднее	Средний	Привлечение системного интегратора, поэтапная интеграция
Кибербезопасность	Низкая	Высокое	Средний	Сегментация сети, шифрование, регулярные аудиты
Зависимость от вендора ПО	Средняя	Низкое	Низкий	Использование open-source компонентов, там, где возможно

Наиболее значительным источником экономического эффекта от внедрения системы цифровых двойников является сокращение незапланированных простоев производственного оборудования. В базовом сценарии без применения цифровых двойников среднее время простоя составляет 8% от рабочего времени, что для парка из 10 единиц оборудования при двухсменном режиме работы (4000 часов в год на единицу) составляет 3200 часов или 700 часов суммарно с учетом различной производительности оборудования. При средней стоимости часа простоя \$10,000, включающей упущенную прибыль и постоянные затраты на персонал, годовые потери достигают \$7,000,000.

Внедрение системы цифровых двойников с модулем предиктивной аналитики позволяет сократить незапланированные простои на 45% за счет заблаговременного выявления признаков деградации оборудования и планирования профилактических работ в оптимальные временные окна [15]. Сокращение времени простоев до 3,5% от рабочего времени обеспечивает экономию 315 часов ежегодно, что эквивалентно \$3,150,000 предотвращенных потерь. В первый год эксплуатации системы данный эффект учитывается с коэффициентом 0,5 ввиду неполного функционирования в период внедрения, что составляет \$1,575,000.

Переход от реактивной стратегии обслуживания к предиктивной модели на основе данных цифровых двойников позволяет оптимизировать затраты на техническое обслуживание оборудования. В базовом сценарии расходы на незапланированные ремонты составляют \$200,000 в год, а избыточное регламентное обслуживание, проводимое по временному графику без учета фактического состояния оборудования, требует дополнительных \$50,000 ежегодно. Предиктивное обслуживание обеспечивает снижение совокупных затрат на 20% за счет исключения преждевременных замен компонентов и более эффективного планирования закупок запасных частей, что составляет экономию \$50,000 в год. Дополнительно, сокращение складских запасов запасных частей на 30% высвобождает оборотный капитал в размере \$30,000.

Внедрение системы цифровых двойников обеспечивает комплексное повышение коэффициента общей эффективности оборудования (ОЕЕ) за счет воздействия на все три составляющие показателя. Базовое значение ОЕЕ 65% формируется как произведение доступности 88%, производительности 80% и качества 92%. Применение предиктивной аналитики повышает доступность до 95% за счет сокращения простоев, оптимизация планирования загрузки увеличивает производительность до 92%, а раннее выявление отклонений параметров процесса улучшает качество до 97%. Целевое значение ОЕЕ 85% обеспечивает прирост производительности на 30,8% относительно базового сценария.

Экономическая интерпретация роста ОЕЕ имеет двойственный характер. При текущем уровне загрузки производственных мощностей увеличение эффективности на 30,8% позволяет нарастить объем выпуска с 5000 до 6540 изделий в год без дополнительных инвестиций в оборудование. При средней марже \$300 на изделие дополнительная прибыль составляет \$462,000 ежегодно. Альтернативная интерпретация: предприятие может отказаться от планируемой покупки трех дополнительных принтеров стоимостью \$200,000 каждый, что обеспечивает единовременную экономию капитальных затрат \$600,000. Консервативная оценка с учетом ограниченной возможности немедленной реализации всего объема дополнительной продукции предполагает прирост годовой выручки \$616,000.

Мониторинг параметров процесса аддитивного производства в режиме реального времени и автоматическая корректировка отклонений обеспечивают снижение уровня брака продукции. Базовый уровень брака 5% от объема производства при годовой стоимости материалов \$1,200,000 формирует потери \$60,000 ежегодно. Внедрение системы цифровых двойников с контролем критических параметров (температура, скорость наплавления, качество подложки) позволяет снизить брак до 2%, обеспечивая экономию \$36,000 в год (с учетом постепенного выхода на целевой показатель - \$18,000 в первый год).

Проведенное исследование разработало и апробировало комплексную методику оценки экономической эффективности внедрения системы цифровых двойников для управления парком оборудования в аддитивном производстве. Методика включает структурированную модель капитальных затрат, составляющих \$220,000, и операционных затрат на уровне \$66,000 ежегодно, количественную оценку выгод, достигающих \$3,861,600 в год начиная со второго года эксплуатации, а также систему показателей эффективности, охватывающую чистую приведенную стоимость, внутреннюю норму доходности, рентабельность инвестиций, совокупную стоимость владения и индекс рентабельности.

Исходная гипотеза исследования о том, что внедрение цифровых двойников обеспечивает положительную чистую приведенную стоимость и рентабельность инвестиций более 50% в течение двух лет, получила полное подтверждение. Расчеты демонстрируют чистую приведенную стоимость \$12,415,519 за пятилетний период, внутреннюю норму доходности 754%, рентабельность инвестиций 2,999% за пять лет (что соответствует приблизительно 240% за первый год) и дисконтированный срок окупаемости менее одного года. Данные результаты значительно превосходят первоначальные ожидания и подтверждают высокую экономическую эффективность технологии цифровых двойников в контексте управления оборудованием аддитивного производства.

Практическая значимость разработанной методики заключается в возможности ее применения промышленными предприятиями, эксплуатирующими парк оборудования аддитивного производства численностью от пяти единиц, для обоснования инвестиционных решений в области цифровизации перед руководством и внешними инвесторами. Методика также может служить основой для приоритизации направлений внедрения цифровых двойников в условиях ограниченности инвестиционных ресурсов.

Исследование имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации результатов. Модельный характер объекта исследования предполагает, что фактические показатели эффективности будут варьироваться в зависимости от специфики конкретного предприятия, включая отраслевую принадлежность, масштаб производства, квалификацию персонала и зрелость существующих цифровых систем. Модель не учитывает макроэкономические риски, такие как инфляция, волатильность валютных курсов и изменения в налоговом законодательстве, которые могут существенно влиять на фактическую эффективность инвестиций. Методика разработана для основных технологий аддитивного производства (FDM, SLS, DMLS) и требует адаптации для применения к альтернативным технологиям, таким как струйное связывание или цифровая светодиодная проекция (DLP).

Перспективные направления дальнейших исследований включают расширение методики на уровень цепочки поставок с интеграцией данных цифровых двойников поставщиков материалов для аддитивного производства, разработку системы бенчмаркинга эффективности цифровых двойников для различных отраслей промышленности, исследование долгосрочных эффектов эксплуатации системы на горизонте более пяти лет, включая накопление организационных знаний и эффекты непрерывного улучшения процессов, а также оценку влияния цифровых двойников на экологическую устойчивость аддитивного производства через оптимизацию углеродного следа и повышение эффективности переработки материалов.

#### Список источников

- 1.Абрамов, И. В. Концептуальная модель цифровой трансформации производственных предприятий / И. В. Абрамов // Теория и практика общественного развития. – 2023. – № 8(184). – С. 176-181. – DOI 10.24158/tipor.2023.8.21. – EDN CSHKFX.
- 2.Digital Twin Market Size & Share, Growth Analysis 2025-2034 // GM Insights. - 2025. - URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/digital-twin-market>. (дата обращения: 10.02.2026).
3. Javaid, M. Digital Twins in Additive Manufacturing: A systematic review / M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh // Additive Manufacturing. - 2025. V.13. P.- 909-918. DOI: 10.30574/WJAETS.2024.13.2.0645 EDN: EANUKI
4. Абрамов, И. В. Управление цифровым аддитивным производством: особенности и перспективы / И. В. Абрамов // Экономика и управление. – 2023. – Т. 29, № 5. – С. 574-580. – DOI 10.35854/1998-1627-2023-5-574-580. – EDN CLZVKR.
- 5, Barricelli, B. R. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications / B. R. Barricelli, E. Casiraghi, D. Fogli // IEEE Access. - 2019. - Vol. 7. - P. 167653-167671. - DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2953499
6. Liu, Y. Digital Twin-enabled Model Predictive Control in Additive Manufacturing: A comprehensive review / Y. Liu, L. Zhang, Y. Yang // Materials and Manufacturing Processes. - 2025. - Vol. 40. - DOI: 10.1080/10426914.2025.2586498
7. Grieves, M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / ed. by F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. - Cham : Springer, 2017. - P. 85-113. - DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4
8. Жарасов, Б. С. Цифровые двойники в управлении производством: принципы создания, проблемы внедрения и перспективы развития / Б. С. Жарасов, В. И. Абрамов // Современная экономика: проблемы и решения. – 2024. – № 6(174). – С. 80-94. – DOI 10.17308/meps/2078-9017/2024/6/80-94. – EDN WCDNVP.
9. Столяров, А. Д. Цифровые двойники в управлении: отраслевая специфика и практические аспекты создания / А. Д. Столяров, В. В. Гордеев, В. И. Абрамов // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 7. – С. 48-54. – DOI 10.17513/snt.40084. – EDN MRCDHV.
10. Столяров, А. Д. Цифровые двойники как инструменты повышения эффективности управления компанией / А. Д. Столяров, В. В. Гордеев, В. И. Абрамов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2024. – № 4(52). – С. 5-16. – DOI 10.21685/2227-8486-2024-4-1. – EDN YMRZCN.
11. Абрамов, И. В. Проблемы и перспективы цифровизации промышленных предприятий с использованием аддитивных технологий / И. В. Абрамов // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 2. – EDN CEXVOS.
12. Wohlers Report 2024: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry. Wohlers Associates, powered by ASTM International, 2024.

13. Kusiak, A. Smart manufacturing / A. Kusiak // International Journal of Production Research. – 2018. – Vol. 56, No. 1-2. – P. 508-517. – DOI 10.1080/00207543.2017.1351644. – EDN YDDFED.

14. Измайлов, М. К. Цифровые двойники как инструмент повышения эффективности эксплуатации основных средств в промышленности / М. К. Измайлов // Beneficium. – 2025. – № 1(54). – С. 102-111. – DOI 10.34680/BENEFICIUM.2025.1(54).102-111. – EDN HCNVYJ.

15. Цифровые двойники: революция в оптимизации производства с Digital Twin // WonderIsland Analytics. - 2025. - URL: <https://wonderisland.ru/czifrovye-dvojniki-digital-twin-revolyucziya-v-optimizaczii-proizvodstva/> (дата обращения: 10.02.2026).

#### **Сведения об авторах**

**Абрамов Игорь Викторович**, соискатель ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет», г. Москва, Россия

#### **Information about the authors**

**Abramov Igor Viktorovich**, applicant, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research Nuclear University”, Moscow, Russia