

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 65.011:004.94

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-141-150



МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Мартынец Е.Р.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Внесение изменений и перепроектирование изделия, как правило, многократно увеличивает стоимость и длительность цикла разработки, а также увеличивает количество натурных испытаний и опытных образцов изделия. Так, недостаточная эффективность проектов может быть выражена в большой длительности и стоимости, в связи с чем в данном исследовании предложена методика внедрения технологии цифровых двойников в целях совершенствования процесса разработки изделий. Целью исследования выступает формирование основных этапов, целевых показателей и требований, способствующих совершенствованию процесса разработки изделий высокотехнологичной промышленности. В работе представлена практикоориентированная методика совершенствования процесса разработки изделий машиностроительных предприятий. Материалы исследования основаны как на существующем опыте отечественных и зарубежных авторов в области внедрения цифровых технологий, включая цифровые двойники, так и на научно-исследовательских проектах, реализуемых инжиниринговыми подразделениями крупнейших отечественных корпораций. Кроме того, в основу предлагаемого метода заложены основные положения национального стандарта ГОСТ Р 57700.37–2021 «Цифровые двойники изделий» и результаты применения технологии цифровых двойников в деятельности Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ (CompMechLab®). В работе представлены сформированные группы требований к процессу разработки изделий машиностроения, при этом рассмотрены целевые показатели процесса разработки, которые включают длительность, стоимость, трудоемкость, удовлетворение требованиям процесса разработки и удовлетворение требованиям технического задания. Также в работе представлен алгоритм разработки цифрового двойника изделия. Тем самым возможно достижение высокого уровня эффективности процесса разработки изделия высокотехнологичной промышленности, что обеспечит технологическое лидерство страны и национальное превосходство.

Ключевые слова: цифровой двойник, разработка, цифровые (виртуальные) испытания, моделирование, длительность, стоимость, изделие, требования, процесс

© Мартынец Е.Р., 2025

Для цитирования

Мартынец Е.Р. Методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 141-150. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-141-150>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODOLOGY FOR IMPROVING THE PRODUCT DEVELOPMENT PROCESS USING DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

Martynets E.R.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia

Abstract. Making changes and redesigning a product frequently significantly increases the cost and duration of the development cycle, as well as increases the number of field tests and prototypes of the product. Thus, the insufficient effectiveness of projects can be expressed in a long duration and cost, and therefore this study suggests a methodology for implementing digital twin technology in order to improve the product development process. The purpose of the study is to form the main stages, targets and requirements that contribute to the improvement of the product development process in the high-tech industry. The paper presents the practice-oriented methodology for improving the product development process of machine-building enterprises. The research materials are based both on the existing experience of domestic and foreign authors in the field of digital technology implementation, including digital twins, and on research projects implemented by engineering divisions of the largest domestic corporations. In addition, the proposed method is based on the main provisions of the national standard GOST R 57700.37–2021 "Digital twins of products" and the results of the use of digital twins technology in the activities of SPbPU Engineering Center "Computer-Aided Engineering Center" (CompMechLab[®]). The paper presents the formed groups of requirements for the process of developing mechanical engineering products, while considering the target indicators of the development process, which include duration, cost, labor intensity, meeting the requirements of the development process and meeting the requirements of the terms of reference. The paper presents an algorithm for developing a digital twin of product. Thus, it is possible to achieve a high level of efficiency of the product development process in high-tech industry, which ensures the country's technological leadership and national superiority.

Keywords: digital twin, development, digital (virtual) testing, modeling, duration, cost, product, requirements, process.

For citation

Martynets E.R. Methodology for Improving the Product Development Process Using Digital Twin Technology. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 141-150. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-141-150>

Введение

Традиционный процесс разработки изделий обычно подразумевает прохождение ряда итераций (шагов), направленных на перепроектирование изделия, что вызвано внесением изменений в конструкцию по результатам натурных испытаний, в том числе вследствие неудовлетворения требований к изделию [1, 2]. Тем самым многократно увеличивается стоимость процесса разработки – требуются затраты на производство и испытания опытных образцов, оплату труда инженеров-конструкторов и инженеров-расчетчиков и пр. [3] Кроме того, значительно увеличивается длительность стадии разработки изделия, в связи с чем могут возникать переносы сроков передачи конструкторской документации в производство. Согласно существующей практике, проекты по разработке более чем в половине случаев задерживаются не менее чем на 1 год от планируемого срока [4].

Обозначенное выше свидетельствует о низкой эффективности традиционного подхода, поскольку наступают риски неудовлетворения требований к изделию, нарушения сроков и бюджета проекта, а также возникает вероятность неучета тех или иных целевых показателей, критически важных для данной конструкции и сфер применения изделия. По данной

причине, а также вследствие стремления промышленных организаций, в том числе занятых процессами инжиниринга и разработки конструкций и систем, к соответствию тенденциям цифровой трансформации экономики все большее внимание уделяется внедрению передовых цифровых и производственных технологий.

Среди отечественных авторов можно выделить труды Антипова Д.В. [5–8], Губановой О.Г. [5], Горюховой Д.А. [6, 7], Антиповой О.И. [9, 10], Хаймович И.Н. [10, 11] и других научных исследователей и ученых [12–16], посвященные анализу практик применения передовых цифровых и производственных технологий, формированию новых и совершенствованию существующих методов организации процессов разработки изделий, а также вопросам качества разрабатываемой продукции при удовлетворении требований. Значительная доля проводимых исследований в данной области приходится на вопросы внедрения автоматизированных систем проектирования (CAD, Computer-Aided Design), систем инженерного анализа (CAE, Computer-Aided Engineering) и систем управления жизненным циклом (PLM, Product Lifecycle Management). Учитывая современный уровень развития вычислительной техники и повсеместное применение

CAD-, CAE-, PLM-систем, предлагаемые методы совершенствования процессов разработки являются довольно зрелым и проработанным вопросом.

Кроме того, в ходе исследования проанализирована деятельность по выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в интересах промышленности на основе опыта и компетенций Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ (CompMechLab[®]), а также ряда высокотехнологичных предприятий, составляющих партнерскую сеть Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, в том числе входящих в Госкорпорацию «Ростех» и Госкорпорацию «Росатом».

Проведенный анализ методов и подходов к процессам разработки позволяет сделать вывод, что предприятиям, осуществляющим разработку и последующее производство высокотехнологичной продукции, в том числе в наукоемких и критически важных отраслях, рекомендуется анализ и реорганизация процессов, направленных на создание и выпуск изделий, за счет внедрения инновационных цифровых технологий, включая цифровые двойники, что на текущий момент составляет малую долю исследований отечественных и зарубежных авторов. В данном исследовании приведены ключевые этапы, а также целевые показатели и требования к процессам, человеческим и материально-техническим ресурсам, которые составляют основу разработанной методики совершенствования процесса разработки изделий машиностроения с применением цифровых двойников.

Академическая направленность текущего исследования подразумевает формирование типовой методики для машиностроительных предприятий, при этом особенности и специфика конкретных отраслей промышленности, а также технологических процессов может требовать адаптации методики и внесения уточнений.

Материалы и методы исследования

Предлагаемый подход учитывает тенденции к повсеместному распространению и внедрению цифровых инструментов в деятельность промышленных компаний, в том числе в управленческие, производственные и технологические процессы производства. Это будет способствовать повышению эффективности инженерных и производственных систем, совершенствованию научно-методологической основы обеспечения показателей и требований к процессу разработки, разрабатываемому изделию и уровню качества.

В ходе проведения исследования были применены такие общенаучные методы, как теоретический анализ подходов к оценке и организации процессов разработки продукции, методы сравнительного анализа, методы процессного и системного подходов, методы теории алгоритмов, методы оценки эффективности освоения новой продукции, а также другие общенаучные методы.

Теоретической и научно-методологической основой исследования послужили работы российских и зарубежных ученых по использованию цифровых инструментов и внедрению методов повышения эффективности при разработке изделий предприятиями машиностроения, в том числе передовых цифровых и производственных технологий, а также нормативно-технические документы.

В 2021 году утвержден национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [17]. Значимость утверждения национального стандарта определяется его фокусировкой на создании цифровых двойников изделий высокотехнологичной промышленности, а именно машиностроения, и лежащих в основе цифрового двойника математических и компьютерных моделей, основанных на законах физики, механики и математики [3].

Согласно приведенному в национальном стандарте ГОСТ Р 57700.37–2021 определению, **цифровой двойник изделия** – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [17]. В процессе разработки цифрового двойника изделия создается многоуровневая система требований – матрица требований, целевых показателей и ресурсных ограничений, которая обеспечивает удовлетворение требований к изделию и позволяет проанализировать взаимное влияние целевых показателей [18].

Также следует выделить основные положения технологии цифровых двойников, детальный обзор сформированных отечественных и зарубежных концепций цифровых двойников, примеры внедрения технологии в различных отраслях промышленности и секторах экономики, приведенные в монографии «Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности», составленной коллективом авторов из Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [19].

Полученные результаты и их обсуждение

Разработка цифрового двойника изделия обеспечивает рациональное сочетание всех показателей проектируемого изделия и, как следствие, высокий уровень качества разрабатываемой продукции, а также снижение финансовых и временных ресурсов [1]. Это происходит за счет минимизации количества изменений, вносимых в конструкцию изделия при производстве и проведении испытаний опытных образцов за счет проведения множества цифровых (виртуальных) испытаний при разработке изделия с применением технологии цифровых двойников [1]. Тем самым снижается количество опытных образцов и проводимых натурных испытаний.

Достижение обозначенных выше эффектов может быть подтверждено рядом значительных примеров отечественной высокотехнологичной промышленности. В частности, технология цифровых двойников способствовала снижению длительности и стоимости процессов разработки изделий, а также повышению эффективности процессов в ряде проектов, реализованных предприятиями АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК», входит в Госкорпорацию «Ростех») [20], Госкорпорации «Росатом» [21], ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» (ПАО «ОАК», входит в Госкорпорацию «Ростех») [22], и др. [1, 19, 23, 24]

В ходе проведенного анализа были сформированы основные требования к организации разработки изделия (**рис. 1**). Обозначенные требования составляют часть предлагаемой методики в разрезе ресурсной обеспеченности процесса разработки, поскольку выполнение обозначенных требований делает возможным получение заявленных эффектов от внедрения методики в процесс разработки.

Так, требования к ресурсной обеспеченности составляют 4 группы показателей:

1. Требования к материально-технической оснащенности, проектно-технологической, инженерной инфраструктуре (Hardware и Software).

1.1. Наличие актуального верифицированного и валидированного специализированного инженерного программного обеспечения, обладающего высоким уровнем адекватности.

1.2. Наличие платформенного решения (например, программно-технологической платформы в со-

ответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 [17]), обеспечивающего эффективный обмен данными, их надежное хранение и управление ими, интеграцию и взаимодействие между инженерным программным обеспечением.

1.3. Оборудованные инженерные рабочие места.

1.4. При необходимости – наличие оборудованной опытно-промышленной и испытательной площадки.

1.5. При необходимости – наличие вычислительных мощностей (высокопроизводительных вычислительных систем), центров обработки и хранения данных и др.

2. Требования к персоналу (Brainware [19]).

2.1. Мультидисциплинарная команда инженеров-конструкторов, инженеров-расчетчиков, инженеров-технологов, обладающих компетенциями в области цифрового проектирования и моделирования, знаниями системного цифрового инжиниринга [25], компетенциями разработки и эксплуатации цифровых двойников, численного моделирования, а также опытом выполнения НИР и НИОКР в данной отрасли и в разрезе областей наук (гидроаэродинамика, механика деформированного твердого тела и др.).

2.2. Административная команда, включающая системных инженеров, руководителей проектов и направлений, проектных менеджеров, обладающих компетенциями в области проектного менеджмента, знаниями в части внедрения и организации системной работы, эффективного процесса разработки систем и др.

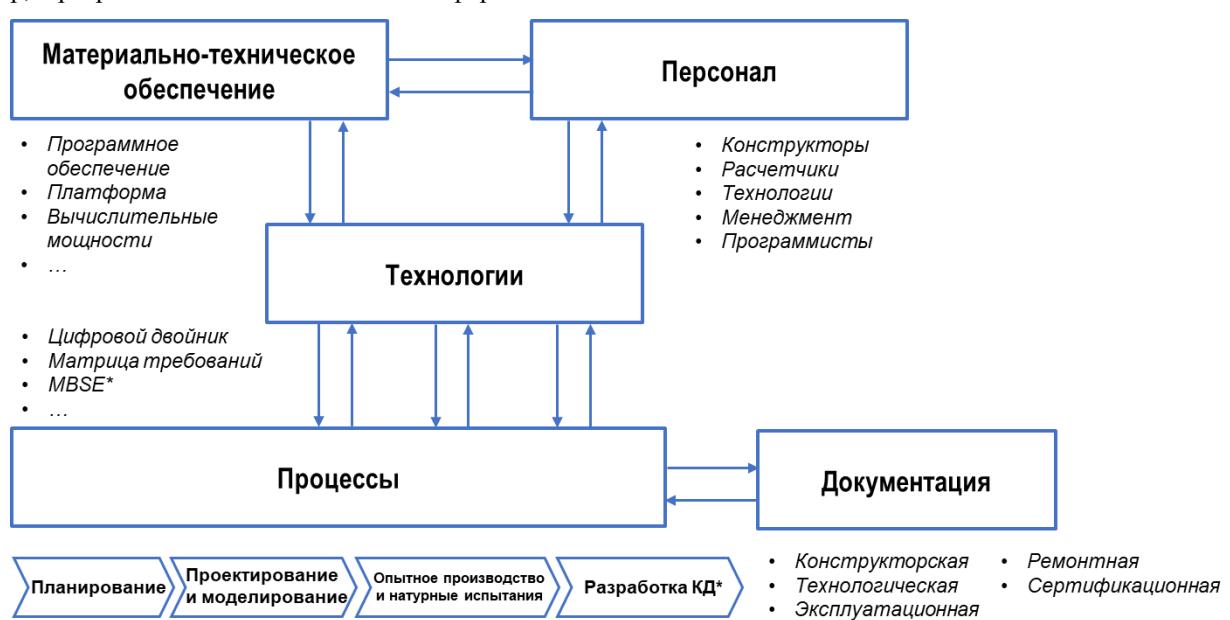


Рис. 1. Схема взаимосвязи требований к организации разработки изделия (источник: составлено автором)
Fig. 1. Scheme of requirements interrelation to the product development organization (source: compiled by the author)

2.3. При необходимости – команда по направлению программирования, обладающая компетенциями в обеспечении функционирования программно-инженерного стека, включая работу программно-технологической (цифровой) платформы, инженерного программного обеспечения, а также знаниями в адаптации программных средств под особенности процессов предприятия.

3. Требования к технологиям.

3.1. Возможность формирования матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений [2, 18, 19, 26, 27], содержащей основные требования к изделию, удовлетворение которых обеспечивает выполнение технического задания и требуемый уровень надежности, качества, функциональности и ресурса продукции.

3.2. Обеспечение системного подхода к разработке на основе методов и концепций модельно-ориентированного системного инжиниринга [19].

3.3. Технологии проведения цифровых (виртуальных) испытаний на основе разработанных математических и компьютерных моделей высокого уровня адекватности в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 [17].

3.4. Технологии разработки цифровых двойников и обеспечения процессов применения цифровых двойников на всех стадиях жизненного цикла (разработки, производства, эксплуатации).

3.5. При необходимости – возможность организации процессов сбора и обработки потоков данных, поступающих от изделия при проведении натурных испытаний, технологических процессах и производственных операциях, а также процессах эксплуатации, возможность организации обратных корректирующих действий от цифрового двойника, размещенного на программно-технологической платформе, к функционирующему изделию (формирование двухсторонних информационных связей между цифровым двойником и изделием с применением инструментов промышленного интернета вещей [19]).

4. Требования к документации (конструкторской, технологической, эксплуатационной, ремонтной, сертификационной) – требования могут быть сформированы отраслевыми экспертами применительно к конкретным научоемким изделиям высокотехнологичной промышленности.

Эффективность процесса разработки в соответствии с предлагаемой методикой оценивается с позиции пяти характеристик – целевых показателей (рис. 2):

1. Длительность процесса разработки t [1].
2. Стоимость процесса разработки S [3].
3. Трудоемкость процесса разработки L .
4. Удовлетворение требованиям процесса разработки (УТР).
5. Удовлетворение требованиям технического задания (матрицы требований) (УТЗ).

В рамках методики предполагается влияние на обозначенные выше целевые показатели за счет прохождения алгоритма по разработке цифрового двойника при соблюдении требований к ресурсам. Возможность снижения *временных и финансовых затрат* в процессе разработки цифрового двойника объясняется снижением количества вносимых изменений, повышением количества цифровых (виртуальных) испытаний, снижением необходимого количества опытных образцов и проводимых натурных испытаний [3]. Снижение *стоимости* разработки изделия является одной из целевых функций цифрового двойника [3].

Длительность процесса разработки t , в свою очередь, может быть раскрыта через показатели:

M_{sim} – количество итераций (шагов), связанных с разработкой моделей и проведением цифровых (виртуальных) испытаний изделия; показатель M_{sim} отражает оптимальное количество проведенных цифровых испытаний изделия (чем больше цифровых испытаний, тем выше уровень адекватности разрабатываемых моделей и выше вероятность удовлетворения требованиям [1]) при соблюдении оптимального объема трудозатрат и стоимости организации процессов моделирования;

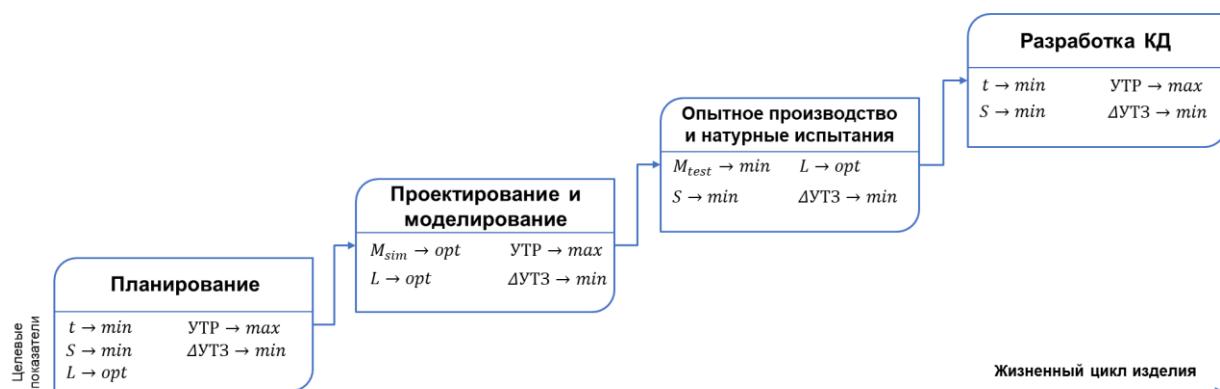


Рис. 2. Целевые показатели методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологий цифровых двойников (источник: составлено автором)

Fig. 2. Target indicators of the methodology for improving the product development process using digital twin technology (source: compiled by the author)

M_{test} – количество итераций (шагов), связанных с производством и испытаниями опытных образцов; показатель M_{test} отражает оптимальное количество натурных испытаний (чем больше натурных испытаний, тем выше стоимость и длительность разработки изделия и выше вероятность прохождения сертификационных и приемочных испытаний) при соблюдении оптимального объема трудозатрат, длительности и стоимости организации процессов испытаний и вывода продукции на рынок.

Трудоемкость процесса разработки напрямую влияет на эффективность разработки цифрового двойника по причине существующей тенденции, вызванной смещением ролей инженера-конструктора (К), инженера-расчетчика (Р) и инженера-технолога (Т), а также расширением роли инженеров-расчетчиков [19, 28]. Увеличение числа инженерных расчетов в процессе разработки изделия требует пересмотра кадрового ландшафта инженерных подразделений и внедрения в процесс разработки системных инженеров, в задачи которых войдет обеспечение работы инженеров в формате параллельного взаимодействия с учетом системного инжиниринга применительно к разрабатываемому изделию (формат обмена между инженерами: К↔Р↔Т) взамен традиционного подхода, когда обмен информацией происходил по итогам работы одного инженера и передаче проекта другому, что вызывало множество итераций, возврат к предыдущим стадиям и «доводку» [16] изделия до требуемых характеристик (формат обмена между инженерами: К→Р→Т→К→…→Т). Так, согласно статистике, более 30% рабочего времени инженера-конструктора занимает организация процесса передачи данных [29]. В связи с этим возможно внедрение платформенных решений и методов системного инжиниринга, что обеспечит бесперебойное и регулярное взаимодействие инженеров в процессе реализации проекта и позволит уменьшить время, связанное с передачей информации и возвращением на предыдущие этапы в целях «доводки» изделия.

Удовлетворение требованиям процесса разработки, в свою очередь, подразумевает как удовлетворение требованиям к организации разработки изделия с точки зрения ресурсной обеспеченности (см. **рис. 1**), так и с точки зрения обеспечения факторов конкурентоспособности предприятия, таких как соотношение «цена – качество», эффективность процессов предприятия и пр.

Удовлетворение требованиям технического задания (при разработке цифрового двойника – матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений изделия) (УТЗ) подразумевает снижение разницы между эталонным значением показателя матрицы и фактическим значением показателя матрицы, то есть проведение балансировки матрицы требований, в результате которой достигаются и удовлетворяются все требования, заявленные заказчиком,

обеспечиваются высокие показатели надежности и качества разрабатываемой продукции, а также технологичность изделия (подробнее о балансировке матрицы см. [26, 18, 27]). Кроме того, удовлетворение требованиям технического задания тесно связано с достижением высокого уровня качества изделия [2].

Таким образом, в соответствии с заявленными показателями эффективности *цель разработки цифрового двойника* в соответствии с предлагаемой методикой совершенствования процесса разработки заключается в проектировании изделия под заданную стоимость S и длительность t с учетом трудоемкости процессов разработки L и требований к процессу разработки УТР для удовлетворения требованиям к продукции УТЗ.

Реализация вышеприведенной методики в части достижения целевых показателей с учетом ресурсной обеспеченности, как было обозначено выше, возможна за счет прохождения алгоритма по разработке и применению цифрового двойника изделия [3, 30]. Сформированная группа требований к ресурсам оказывает влияние на ключевые процессы разработки изделия, которые выделены в качестве блоков разработки изделия на алгоритме разработки цифрового двойника (**рис. 3**):

0 – подготовительные процессы (как правило, проводятся со стороны заказчика и формируют исходные данные для последующих этапов);

1 – процессы планирования;

2 – процессы проектирования и моделирования, проведения цифровых (виртуальных) испытаний;

3 – процессы проведения опытного производства и натурных испытаний;

4 – процессы формирования конструкторской документации (КД) для серийного производства [30] (данний процесс неразрывно связан с предыдущими этапами и ведется параллельно с ними, при этом является результатом прохождения всех необходимых натурных испытаний, в связи с чем на алгоритме не выделен в отдельный блок).

Отдельно следует отметить, что в рамках исследования определены возможности обеспечения и повышения качества изделия в процессе разработки цифрового двойника – основные характеристики качества закладываются на этапе проектирования конструкции.

На приведенном алгоритме выделение этапов зеленым цветом демонстрирует основные процессы, за счет которых происходит влияние на достижение приведенных в методике показателей при процессах проектирования и моделирования системы и подсистем, проведения цифровых (виртуальных) испытаний, удовлетворении матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений, производстве опытных образцов и проведении натурных испытаний [30].

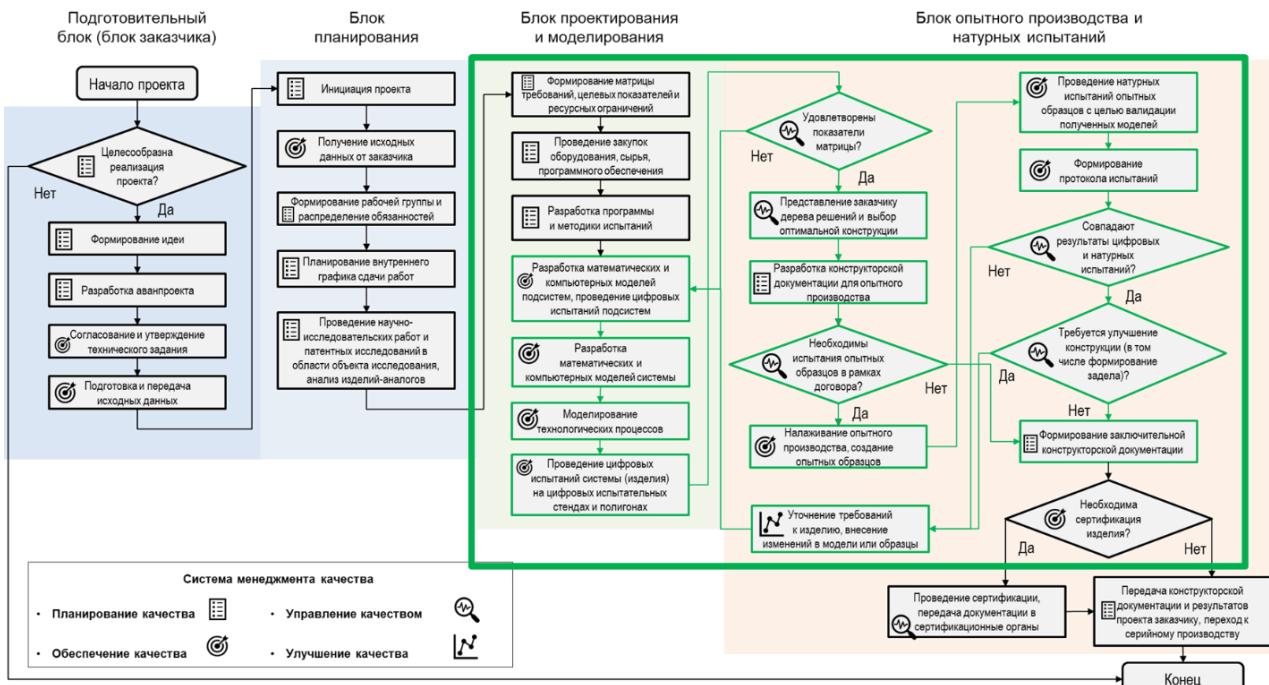


Рис. 3. Алгоритм разработки цифрового двойника изделия (источник: составлено автором [3, 30])
Fig. 3. Algorithm for developing the digital twin of product (source: compiled by the author)

Заключение

Таким образом, в ходе исследования разработана методика совершенствования процесса разработки изделия с применением технологии цифровых двойников, которая включает соблюдение требований к ресурсной обеспеченности, достижение целевых показателей разработки изделий и прохождение этапов разработки и применения цифрового двойника, что обеспечивает практикоориентированность предлагаемой методики.

Комплексность поставленных задач определяется возможностью дальнейшего применения разработанного подхода на предприятиях различных отраслей общего машиностроения. Основным преимуществом предлагаемого подхода выступает реализация задач государственного значения, направленных на совершенствование технологического уровня промышленных предприятий и обеспечение конкурентоспособности отечественных производств. Реализация поставленных задач позволит применить технологию цифровых двойников как глобальный тренд цифровой трансформации промышленности для повышения эффективности разработки и производства высокотехнологичных изделий, что напрямую обеспечит технологический суверенитет и технологическое лидерство России, заявленное в качестве национальной цели до 2036 года (в соответствии с Указом Президента РФ от 7 мая 2024 года № 309).

Список источников

1. Мартынец Е.Р., Корниенко А.В., Левенцов В.А. Процессная модель технической подготовки производства с фокусировкой на технологии цифровых двойников // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологий и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2024. № 1. С. 72–78.
2. Мартынец Е.Р., Левенцов В.А. Факторы повышения качества наукоемкой продукции с применением передовых производственных технологий // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: сборник тезисов докладов IV Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии». СПб., 2023. С. 12–17.
3. Мартынец Е.Р., Левенцов В.А. Эффективность применения технологии разработки цифровых двойников в промышленности // Качество образования и устойчивое развитие – основа международного сотрудничества: материалы конференции Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в рамках программы Петербургского Международного экономического форума. СПб., 2024. С. 281–287.
4. Срывы сроков крупных проектов – кто виноват и что делать? URL: <https://pmexcellence.com/news/article/sryvyy-srokov-krupnykh-proektov-kto-vinovat-i-cto-delat/> (дата обращения: 03.01.2025).
5. Антипов Д.В., Губанова О.Г. Процессный подход в определении модели учета и анализа затрат на качество // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2023. Т. 26. № 3. С. 41–52.
6. Антипов Д.В., Горохова Д.А., Клентак А.С. Организация эффективного процесса проектирования и разработки новой продукции на основе специальных требо-

- ваний автопроизводителя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 433–439.
7. Управление качеством проектирования и разработки новой продукции / Антипов Д.В., Горохова Д.А., Артюхов А.В., Клентак А.С. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24. № 4 (108). С. 131–136.
8. Автоматизированная система нормирования труда на предприятии / Пяткова Е.В., Тареева А.Д., Лузик А.Д., Антипов Д.В. // От качества инструментов к инструментам качества: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Тула, 2023. С. 432–437.
9. Антипов Д.В., Антипова О.И., Еськина Е.В. Экспресс-программа повышения производительности труда в производстве // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 11. С. 542–551.
10. Управление качеством конструкторско-технологической подготовки производства с использованием базовой концептуальной модели данных / Антипова О.И., Хаймович И.Н., Чекмарев А.Н., Чурилин С.В. // Вестник Самарского муниципального института управления. 2020. № 1. С. 7–19.
11. Основные элементы проектного управления и предпроектного анализа бизнес-процесса запуска нового изделия в производство / Черкасов К.Ю., Хаймович И.Н., Булатов А.А., Агаповичева Я.А. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. № 2 (118). С. 63–69.
12. Буткевич Р.В., Клочков Ю.С. Особенности применения экспериментного метода оценивания продукции на различных этапах жизненного цикла продукции // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей 79-й всероссийской научно-технической конференции. Самара, 2022. С. 1162–1169.
13. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins // Complex Systems Engineering: Theory and Practice. 2019. С. 175–200.
14. Grieves M. Intelligent digital twins and the development and management of complex systems // Digital Twin. 2022. № 2:8. С. 1–18.
15. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication: White Paper. 2014.
16. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Агеев А.Б. Разработка и применение цифровых двойников в судостроении и кораблестроении // МОРИНТЕХ-ПРАКТИК – Информационные технологии в судостроении-2019: сб. тр. XX междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2019. С. 9–14.
17. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 10 с.
18. Мартынец Е.Р., Корниенко А.В., Левенцов В.А. Универсальная матрица требований, целевых показателей и ресурсных ограничений при проектировании научно-исследовательского производства // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2022. С. 111–119.
19. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография / Боровков А.И., Рябов Ю.А., Щербина Л.А., Мартынец Е.Р. и др.; ред. Боровков А.И. СПб.: Политех-пресс, 2022. 492 с.
20. ОДК завершает работу над созданием цифрового двойника морского газотурбинного двигателя. URL: <https://www.uecrus.com/press/odk-zavershaet-rabotu-nad-sozdaniem-tsifrovogo-dvoynika-morskogo-gazoturbinnogo-dvigatelya/> (дата обращения: 03.01.2025).
21. На предприятии научного дивизиона Росатома созданы цифровые двойники устройств для радиационных испытаний. URL: <https://rusatom-energy.ru/media/rosatom-news/na-predpriyatiu-nauchnogo-diviziona-rosatoma-sozdali-tsifrovye-dvoyniki-ustroystv-dlya-radiatsionnykh/> (дата обращения: 03.01.2025).
22. Цифровое проектирование: как создаются «безбумажные» самолеты. URL: <https://rostec.ru/media/news/tsifrovoe-proektirovanie-kak-sozdayutsya-bezbumazhnye-samolety/> (дата обращения: 03.01.2025).
23. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 4 / Боровков А.И., Ефимов-Сойни Н.К., Мартынец Е.Р. и др. // САПР и графика. 2024. № 5. С. 4–12.
24. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 5 / Боровков А.И., Чишко С.Д., Мартынец Е.Р. и др. // САПР и графика. 2024. № 7. С. 4–16.
25. Математическое моделирование как основа цифрового инжиниринга / Болдырев Ю.Я., Левенцов В.А., Мартынец Е.Р., Щербина Л.А. // Цифровой инжиниринг: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2024. С. 13–20.
26. Корниенко А.В., Левенцов В.А. Математическая модель уравновешивания матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений при использовании технологии «цифровых двойников» на наукоемких производствах // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2021. С. 63–69.
27. Корниенко А.В., Мартынец Е.Р., Левенцов В.А. Совершенствование наукоемкого производства с использованием системы комплексных технологических решений // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2022. С. 22–29.
28. Barthenheier K. Simulation Process and Data Management: Presentation for Global Product Data Interoperability Summit. Boeing Management Company, 2014. URL: <http://gpdisonline.com/wp-content/uploads/past>

- presentations/PLM_73_Boeing-Barthenheier-SPDM.pdf (дата обращения: 28.12.2024).
29. ЛАНИТ на конференции DATADVANCE 2024 – Бедомости. URL: https://www.vedomosti.ru/press_releases/2024/12/03/lanita-konferentsii-datadvance-2024 (дата обращения: 03.01.2025).
30. Мартынец Е.Р., Корниенко А.В., Левентсов В.А. Цифровые двойники изделий как инструмент обеспечения качества на стадии разработки // Управление инновациями в условиях цифровой трансформации: сборник научных трудов III Всероссийской студенческой научно-научной конференции, Санкт-Петербург, 12–13 апреля 2024 года. СПб., 2024. С. 286–290.

References

- Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. A process model of technical pre-production with a focus on digital twin technology. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna. Seriya 4: Promyshlennye tekhnologii* [Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies], 2024;(1):72-78. (In Russ.)
- Martynets E.R., Leventsov V.A. Factors for improving the quality of high-tech products using advanced manufacturing technologies. *Upravlenie kachestvom produktov na osnovе peredovyh proizvodstvennyh tekhnologiy: sbornik tezisov dokladov IV Mezhdunarodnogo foruma «Perezdovye tsifrovye i proizvodstvennye tekhnologii»* [Product quality management based on advanced manufacturing technologies. Proceedings of the IV International Forum on Advanced Digital and Manufacturing Technologies]. St. Petersburg, 2023, pp. 12-17. (In Russ.)
- Martynets E.R., Leventsov V.A. The efficiency of digital twin development technology in industry. *Kachestvo obrazovaniya i ustoychivoe razvitiye – osnova mezdunarodnogo sotrudnichestva: Materialy konferentsii Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo v ramkah programmy Peterburgskogo Mezhdunarodnogo ekonomicheskogo foruma* [Quality of education and sustainable development are the basis of international cooperation. Proceedings of the conference of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University within the framework of the program of the Petersburg International Economic Forum]. St. Petersburg, 2024, pp. 281-287. (In Russ.)
- Sryvy srokov krupnyh projektov – kto vinovat i chto delat?* [Deadlines for major projects – who is to blame and what to do?]. Available at: <https://pmexcellence.com/news/article/sryvy-srokov-krupnykh-proektov-kto-vinovat-i-chto-delat/> (Accessed January 3, 2025).
- Antipov D.V., Gubanova O.G. The process approach in defining the accounting model and quality cost analysis. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of IzhSTU named after M.T. Kalashnikov], 2023;26(3):41-52. (In Russ.)
- Antipov D.V., Gorohova D.A., Klentak A.S. Organization of an effective process of designing and developing new products based on the special requirements of the automaker. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*. *Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2022;9:433–439. (In Russ.)
- Antipov D.V., Gorohova D.A., Artyuhov A.V., Klentak A.S. Quality management of design and development of new products. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2022;24(4(108)):131-136. (In Russ.)
- Pyatkova E.V., Tareeva A.D., Luzik A.D., Antipov D.V. Automated labor rationing system at the enterprise. *Otkachestva instrumentov k instrumentam kachestva: Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [From the quality of tools to quality tools. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Tula, 2023, pp. 432-437. (In Russ.)
- Antipov D.V., Antipova O.I., Eskina E.V. Express program for increasing labor productivity in manufacturing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2021;(11):542-551. (In Russ.)
- Antipova O.I., Khaymovich I.N., Chekmarev A.N., Churilin S.V. Quality management of design and technological preparation of manufacturing using the basic conceptual data model. *Vestnik Samarskogo munitsipalnogo instituta upravleniya* [Bulletin of the Samara Municipal Institute of Management], 2020;(1):7-19. (In Russ.)
- Cherkasov K.Yu., Khaymovich I.N., Bulatov A.A., Agapovicheva Ya.A. Basic elements of project management and pre-project analysis of the business process of launching a new product into manufacturing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2024;26(2(118)):63-69. (In Russ.)
- Butkevich R.V., Klochkov Yu.S. Features of the application of the expert method of product evaluation at various stages of the product life cycle. *Traditsii i innovatsii v stroitelstve i arhitektуре. Stroitelstvo i stroitelnye tekhnologii: Sbornik statey 79-oy vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction and construction technologies. Proceedings of the 79th All-Russian Scientific and Technical Conference]. Samara, 2022, pp. 1162-1169. (In Russ.)
- Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. 2019:175-200.
- Grieves M. Intelligent digital twins and the development and management of complex systems. *Digital Twin*. 2022;2:8:1-18.
- Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication: White Paper. 2014.
- Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Ageev A.B. Development and application of digital twins in shipbuilding. *MORINTEH-PRAKTIK – Informatsionnye tekhnologii v sudostroenii-2019* [MORINTECH-PRAKTIK - Information technologies in shipbuilding-2019]. St. Petersburg, 2019, pp. 9-14. (In Russ.)
- State standard GOST R 57700.37-2021. Computer models and modeling. Digital twins of products. General provisions. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021, 10 p. (In Russ.)

18. Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. Universal matrix of requirements, target indicators and resource constraints in the design of high-tech manufacturing. *Peredovye proizvodstvennye tekhnologii: kompyuternye (superkompyuternye) tekhnologii i organizatsiya naukoemkikh proizvodstv: Sbornik tezisov dokladov Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezdunarodnym uchastiem* [Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with international participation]. St. Petersburg, 2022, pp. 111-119. (In Russ.)
19. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Shcherbina L.A., Martynets E.R. et al. *Tsifrovye dvojnikи v vysokotekhnologichnoy promyshlennosti: monografiya* [Digital twins in the high-tech industry: monograph]. St. Petersburg: POLITEH-PRESS, 2022, 492 p. (In Russ.)
20. *ODK zavershaet rabotu nad sozdaniem tsifrovogo dvoynika morskogo gazoturbinnogo dvigatelya* [UEC is completing work on the creation of a digital twin of an offshore gas turbine engine]. Available at: <https://www.uecrus.com/press/odk-zavershaet-rabotu-nad-sozdaniem-tsifrovogo-dvoynika-morskogo-gazoturbinnogo-dvigatelya/> (Accessed January 3, 2025).
21. *Na predpriyatiи nauchnogo diviziona Rosatoma sozdany tsifrovye dvoyniki ustroystv dlya radiatsionnyh ispytaniy* [Digital twins of devices for radiation testing have been created at the enterprise of the Rosatom scientific division]. Available at: <https://rusatom-energy.ru/media/rosatom-news/na-predpriyati-nauchnogo-diviziona-rosatoma-sozdat-tsifrovye-dvoyniki-ustroystv-dlya-radiatsionnykh/> (Accessed January 3, 2025).
22. *Tsifrovoe proektirovanie: kak sozdayutsya «bezbumazhnye» samoletы* [Digital design: how paperless airplanes are created]. Available at: <https://rostec.ru/media/news/tsifrovoe-proektirovanie-kak-sozdayutsya-bezbumazhnye-samolety-/> (Accessed January 3, 2025).
23. Borovkov A.I., Efimov-Soyni N.K., Martynets E.R. et al. Digital platform for the development and application of digital twins "Digital Twins" CML-Bench®. Part 4. *SAPR i grafika* [CAD and graphics], 2024;(5):4-12. (In Russ.)
24. Borovkov A.I., Chishko S.D., Martynets E.R. et al. Digital platform for the development and application of digital twins "Digital Twins" CML-Bench®. Part 5. *SAPR i grafika* [CAD and graphics], 2024;(7):4-16. (In Russ.)
25. Boldyrev Yu.Ya., Leventsov V.A., Martynets E.R., Shcherbina L.A. Mathematical modeling as the basis of digital engineering. *Tsifrovoy inzhiniring: kompyuternye (superkompyuternye) tekhnologii i organizatsiya naukoemkikh proizvodstv: sbornik tezisov dokladov Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezdunarodnym uchastiem* [Digital engineering: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with international participation]. St. Petersburg, 2024, pp. 13-20. (In Russ.)
26. Kornienko A.V., Leventsov V.A. Mathematical model of balancing a matrix of target indicators and resource constraints when using "digital twins" technology in high-tech industries. *Peredovye proizvodstvennye tekhnologii: kompyuternye (superkompyuternye) tekhnologii i organizatsiya naukoemkikh proizvodstv: Sbornik tezisov dokladov Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezdunarodnym uchastiem* [Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with international participation]. St. Petersburg, 2021, pp. 63-69. (In Russ.)
27. Kornienko A.V., Martynets E.R., Leventsov V.A. Improvement of high-tech manufacturing using a system of integrated technological solutions. *Peredovye proizvodstvennye tekhnologii: kompyuternye (superkompyuternye) tekhnologii i organizatsiya naukoemkikh proizvodstv: Sbornik tezisov dokladov Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezdunarodnym uchastiem* [Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with international participation]. St. Petersburg, 2022, pp. 22-29. (In Russ.)
28. Barthenheier K. Simulation Process and Data Management: Presentation for Global Product Data Interoperability Summit. Boeing Management Company, 2014. Available at: http://gpdisonline.com/wp-content/uploads/past-presentations/PLM_73_Boeing-Barthenheier-SPDM.pdf (Accessed December 28, 2024).
29. *LANIT na konferentsii DATADVANCE 2024 – Vedomosti* [LANIT at the DATADVANCE 2024 conference – Vedomosti]. Available at: https://www.vedomosti.ru/press_releases/2024/12/03/lanit-na-konferentsii-datadvance-2024 (Accessed December 28, 2024).
30. Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. Digital twins of products as a quality assurance tool at the development stage. *Upravlenie innovatsiyami v usloviyah tsifrovoy transformatsii: sbornik nauchnyh trudov III Vsesrossiyskoy studencheskoy uchebno-nauchnoy konferentsii* [Innovation management in digital transformation. Proceedings of the III All-Russian Student Educational and Scientific Conference]. St. Petersburg, 2024, pp. 286-290. (In Russ.).

Поступила 05.01.2025; принята к публикации 06.02.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 05/01/2025; revised 06/02/2025; published 30/09/2025

Мартынец Екатерина Романовна – аспирант, младший научный сотрудник, ведущий специалист,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Email: katya_martinets@inbox.ru. ORCID 0000-0001-8796-0917

Ekaterina R. Martynets – Postgraduate Student, Junior Researcher, Lead Specialist,
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia.
Email: katya_martinets@inbox.ru. ORCID 0000-0001-8796-0917