

*Научная статья*

УДК 519.876.2

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.4>

## ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЮ СКЛАДСКИМИ ЗАПАСАМИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

София Степанова<sup></sup>, Сальбек Бекетов\*<sup></sup>

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,  
stepanova2.sv@edu.spbstu.ru, salbek.beketov@spbpu.com

\*Автор, ответственный за переписку: salbek.beketov@spbpu.com

### Аннотация

Статья посвящена разработке гибридного подхода к моделированию процессов управления складскими запасами. Рассмотрены типовые особенности управления складскими запасами в условиях изменчивого спроса, сезонности и неопределенности поставок, характерных для строительной отрасли. В рамках исследования было выполнено описание текущего состояния складских и логистических процессов и построены типовые BPMN-диаграммы, отражающие полный цикл движения материалов: от формирования потребности и закупки до приемки, хранения и передачи материалов на строительные объекты. На основе данного процессного подхода предложено создание гибридной имитационной модели, сочетающей дискретно-событийное моделирование и элементы системной динамики, что позволит учитывать сезонные колебания спроса, изменения условий поставок и другие внешние факторы. Результаты исследования являются базой для разработки модели целевого состояния процессов, направленной на снижение рисков дефицита и избыточного накопления материалов, а также повышение эффективности складских и логистических процессов. Предлагаемый подход ориентирован на формирование устойчивой системы управления запасами, обеспечивающей снижение избыточного накопления материалов, сокращение потерь и рациональное использование ресурсов. Использование гибридной имитационной модели позволит учитывать как долгосрочные тенденции изменения спроса и условий функционирования системы, так и операционные особенности складских процессов, что повысит устойчивость и адаптивность управления запасами.

**Ключевые слова:** управление запасами, складские запасы, строительные материалы, автоматизация управления, логистические процессы, моделирование материальных потоков.

**Цитирование:** Степанова, С., Бекетов, С., 2025. Гибридный подход к моделированию процессов управления складскими запасами строительных материалов. Sustainable Development and Engineering Economics. 3, 4. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.4>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Степанова С., Бекетов С., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*Research Article*

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.4>

## A HYBRID APPROACH TO PROCESS MODELING AND INVENTORY MANAGEMENT OF BUILDING MATERIALS

Sofiia Stepanova<sup></sup>, Salbek Beketov\*<sup></sup>

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, [stepanova2.sv@edu.spbstu.ru](mailto:stepanova2.sv@edu.spbstu.ru), [salbek.beketov@spbpu.com](mailto:salbek.beketov@spbpu.com)

\*Corresponding author: [salbek.beketov@spbpu.com](mailto:salbek.beketov@spbpu.com)

### Abstract

The article is devoted to the development of a hybrid approach to modeling inventory management processes. Typical features of inventory management in conditions of variable demand, seasonality and uncertainty of supplies typical for the construction industry are considered. As part of the study, the current state of warehouse and logistics processes was described and typical BPMN diagrams were constructed that reflect the full cycle of material movement: from demand generation and procurement to acceptance, storage and transfer of materials to construction sites. Based on this process approach, it is proposed to create a hybrid simulation model combining discrete event modeling and elements of system dynamics, which will allow taking into account seasonal fluctuations in demand, changes in supply conditions and other external factors. The results of the study are the basis for developing a model of the target state of processes aimed at reducing the risks of shortage and excessive accumulation of materials, as well as improving the efficiency of warehouse and logistics processes. The proposed approach is focused on the formation of a sustainable inventory management system that ensures the reduction of excessive accumulation of materials, reduction of losses and rational use of resources. The use of a hybrid simulation model will allow taking into account both long-term trends in demand and operating conditions of the system, as well as operational features of warehouse processes, which will increase the stability and adaptability of inventory management.

**Keywords:** inventory management, inventory, building materials, management automation, logistics processes, material flow modeling.

**Citation:** Stepanova, S., Beketov, S., 2025. A hybrid approach to process modeling and inventory management of building materials. *Sustainable Development and Engineering Economics* 3, 4. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.4>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Stepanova S., Beketov S., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

## 1. Введение

Эффективное управление складскими запасами строительных материалов является одним из ключевых факторов обеспечения устойчивого развития строительных предприятий, поскольку напрямую влияет на рациональное использование ресурсов, снижение потерь и стабильность производственных процессов (Bulatnikova & Radaev, 2025; Oropku et al., 2022). Строительная отрасль отличается высокой чувствительностью к временным отклонениям, вследствие чего дефицит необходимых материалов на складе может привести к простоям, увеличению сроков реализации проектов и росту совокупных издержек. В то же время избыточные запасы способствуют нерациональному использованию складских площадей и отвлечению оборотных средств, снижая общую экономическую эффективность деятельности предприятия. Поддержание оптимального соотношения между уровнем запасов и фактической потребностью затруднительно без применения системного подхода, особенно в условиях нестабильного спроса и неопределенности в цепочках поставок (Becerra et al., 2022; Nigmatulin et al., 2025).

Дополнительную сложность в процесс планирования вносит неравномерность потребления строительных материалов, обусловленная сезонными факторами и спецификой отдельных строительных объектов. Колебания объемов спроса требуют более точного расчета параметров пополнения запасов и сроков размещения заказов. При этом возможные задержки поставок и изменения логистических условий повышают вероятность перебоев в обеспечении строительных процессов. В сложившихся условиях управление складскими запасами требует регулярного мониторинга, аналитической оценки отклонений и оперативного принятия корректирующих управленческих решений (Tao et al., 2024; Madamidola et al., 2024; Ernst et al., 1993).

Сложности усиливаются ростом количества операций, связанных с движением материалов: закупкой, транспортировкой, приемкой, хранением, внутренними перемещениями и распределением между объектами. Ошибки на любом этапе могут приводить к потере времени, увеличению затрат или возникновению дефицита. Чтобы избежать подобных ситуаций, необходимо применять методы, которые позволяют не только отслеживать запасы, но и прогнозировать будущие потребности, учитывать надежность поставщиков и возможные изменения в спросе (Tadayonrad & Ndiaye, 2023; Kaynov et al., 2024).

В последние годы управление запасами все чаще строится на использовании количественных методов. Это связано с тем, что традиционные подходы оказываются недостаточными при большом объеме данных и высокой изменчивости условий. Применение различных подходов к улучшению логистических процессов позволяет вычислять более точные параметры заказа, выбирать подходящие стратегии пополнения и снижать операционные издержки (Tao et al., 2024). При этом становится важным учитывать факторы, которые ранее редко включались в расчеты: надежность поставщиков, вероятность задержек, поведение спроса, ограничения по объемам хранения и транспорта и так далее (Qi et al., 2023).

Повышение эффективности управления запасами предполагает систематическое обновление и совершенствование применяемых методов и инструментов. Традиционные модели, основанные на предположении о постоянстве спроса и фиксированных интервалах поставок, в недостаточной степени отражают реальные условия функционирования складов строительных материалов. В отличие от них, расширенные методы управления запасами позволяют

учитывать особенности потребления материалов, влияние внешних факторов, а также потенциальные риски, связанные с нарушением поставок и изменением производственных условий (Kanike, 2023; Zhang et al., 2024). Применение таких подходов способствует поддержанию оптимального уровня запасов и снижению вероятности простоев при выполнении строительных работ.

В условиях высокой неопределенности возрастает значимость дополнительных аналитических и цифровых инструментов управления. Колебания спроса, несогласованность графиков поставок и изменения объемов строительной деятельности существенно усложняют процессы прогнозирования и планирования. В связи с этим разработка и внедрение методов и цифровых моделей, ориентированных на работу с неполной, нестабильной и динамически изменяющейся информацией, позволяют повысить точность оценки текущего состояния запасов и обеспечить более устойчивое и адаптивное функционирование складской системы (Stopková et al., 2019; Balakrishna et al., 2024).

Развитие цифровых технологий и методов обработки данных усиливает потребность в инструментах, которые помогают анализировать запасы комплексно. Такие решения позволяют выявлять «узкие» места, оценивать влияние различных факторов на уровень запасов и выбирать подходящую стратегию управления в меняющихся условиях (Gintsyak et al., 2023; Preil & Krapp, 2022). Это делает разработку новых инструментов и моделей важной частью современной практики складского управления.

Анализ существующих подходов к имитационному моделированию систем управления складскими запасами показывает, что в большинстве исследований используется одна модельная парадигма, например системная динамика для анализа агрегированных потоков (Lebedeva & Poluektova, 2013; Gridina & Shchukina, 2025) или дискретно-событийное моделирование для описания операционных процессов (Nigmatulin et al., 2025; Zagidullin & Filimonova, 2023; Danilov & Mayevskiy, 2025). Такие модели позволяют рассматривать отдельные аспекты управления запасами, однако оказываются ограниченными при необходимости одновременного учета долгосрочных тенденций и детальной логики выполнения складских операций. Это формирует исследовательский разрыв, связанный с недостаточной интеграцией различных уровней описания системы управления запасами.

Таким образом, целью данного исследования является использование гибридного подхода к автоматизации управления складскими запасами строительных материалов на основе формализации и анализа логистических и складских операций с целью повышения эффективности управления запасами, снижения рисков дефицита и избыточного накопления материалов, а также обеспечения устойчивости производственных и логистических процессов в условиях изменчивого спроса и нестабильных поставок.

Научная новизна исследования заключается в разработке и обосновании гибридного подхода к моделированию процессов управления складскими запасами строительных материалов, основанного на сочетании системной динамики и дискретно-событийного моделирования. В работе предложено разделение элементов между двумя контурами: системная динамика применяется для описания агрегированных и долгосрочных показателей, тогда как дискретно-событийное моделирование используется для представления операционной логики складских процессов.

## 2. Материалы и методы

Материалы и методы исследования основаны на применении процессного и имитационного подходов к анализу и моделированию системы управления складскими запасами строительных материалов. В качестве методологической базы использованы положения теории управления запасами, системного анализа, имитационного моделирования и процессного управления, а также современные исследования в области цифровизации логистических и складских процессов.

В качестве объекта исследования рассматривается система управления складскими запасами строительных материалов, функционирующая в условиях изменчивого спроса, сезонности и неопределённости поставок. Предметом исследования являются процессы формирования потребности, закупки, приёмки, хранения и распределения строительных материалов, а также методы их моделирования и автоматизации.

Исходными материалами для исследования послужили данные о типовых логистических и складских процессах на строительных предприятиях, а также результаты анализа научных публикаций, посвященных управлению запасами, имитационному моделированию и цифровизации логистики. Для описания процессов использовались укрупненные параметры, характерные для строительной отрасли, в том числе интенсивность спроса, сроки поставок, вероятность задержек, параметры хранения и потери материалов.

Методика исследования включала несколько последовательных этапов. На первом этапе был проведён анализ предметной области и существующих подходов к управлению складскими запасами строительных материалов. На втором этапе было выполнено описание текущего состояния процессов (AS-IS) с использованием BPMN-диаграмм, отражающих как полный цикл обеспечения строительных объектов материалами, так и отдельный контур движения материалов. На третьем этапе была разработана концептуальная архитектура гибридной имитационной модели, основанной на взаимодействии системно-динамического и дискретно-событийного контуров. На заключительном этапе были определены направления использования модели для анализа управленческих решений и формирования целевого состояния процессов (TO-BE).

Выбор гибридного подхода обусловлен необходимостью одновременного учёта факторов макроуровня, таких как сезонность спроса и изменение условий поставок, и особенностей складских операций на микроуровне. Применение системной динамики позволяет анализировать долгосрочное поведение системы управления запасами, а дискретно-событийное моделирование обеспечивает детальное описание логики выполнения операций и взаимодействия ресурсов.

Используемые материалы и методы исследования обеспечивают комплексный анализ процессов управления складскими запасами строительных материалов и создают основу для дальнейшей разработки цифровой модели поддержки принятия управленческих решений в условиях неопределённости и изменчивости внешней среды.

## 3. Результаты и обсуждение

В ходе исследования было выполнено подробное описание типовых процессов, связанных с обеспечением строительных объектов материалами, и была подготовлена процессная диаграмма (рис. 1), отражающая фактическую последовательность действий всех участников.

Данный подход используется для наглядного представления операций, их взаимосвязей и условий перехода между этапами в компании, что позволяет выявлять ключевые элементы управления запасами.

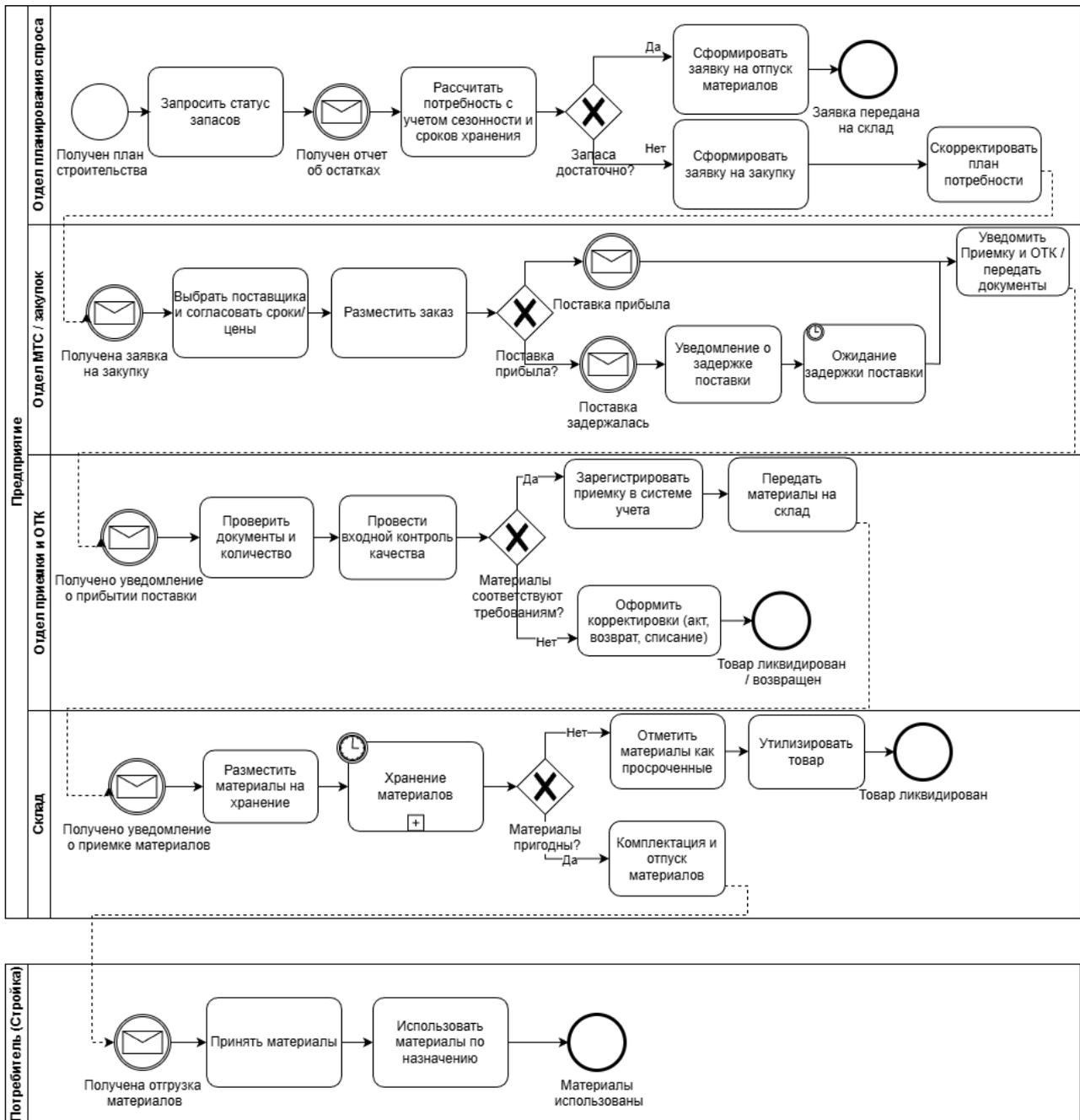


Рисунок 1. BPMN-диаграмма управления складскими запасами строительных материалов

Исходя из анализа компании, деятельность которой связана со строительными материалами, был проведен полный цикл деятельности: от получения планов строительства до передачи материалов конечному потребителю. Процесс начинается с получения информации о потребности и актуальных запасах. После сравнения ожидаемого расхода и имеющихся остатков принимается решение о необходимости пополнения. При недостатке запасов формируется заявка на закупку, которая передается в подразделение, отвечающее за взаимодействие с поставщиками. Также были учтены этапы выбора поставщика, согласования сроков, размещения заказа и контроля его исполнения. Возможны два варианта: своевременная поставка и

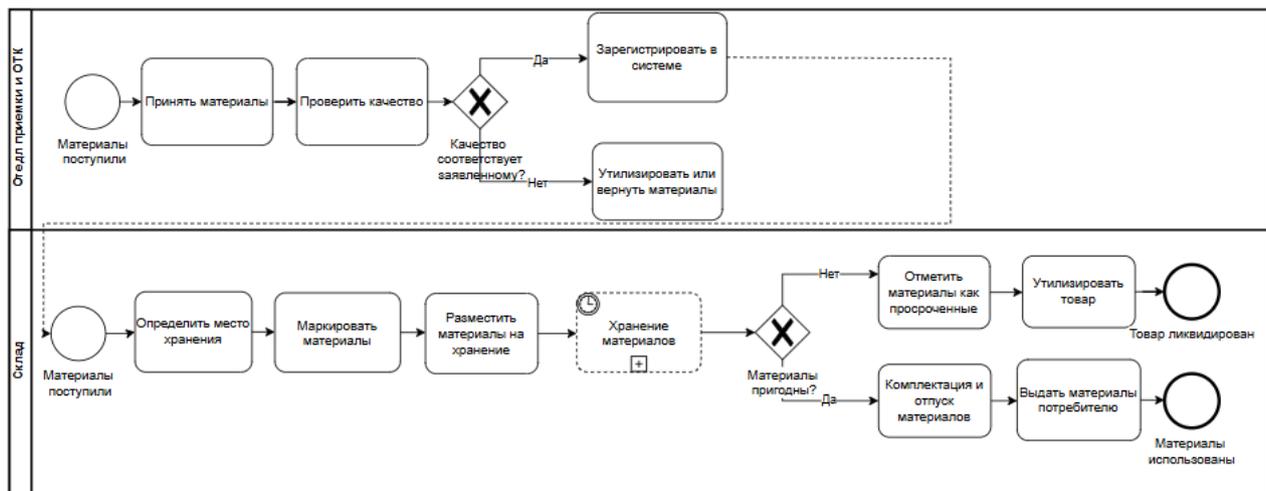
задержка. В случае задержки запускается процедура уведомления и уточнения сроков, что влияет на последующие операции планирования. Если поставка прибывает вовремя, процесс переходит к приемке и контролю качества.

Процессы, связанные с приемкой материалов, включают проверку сопроводительных документов и количественных показателей, входной контроль качества, а также фиксацию результатов проверки. В случае соответствия материалов установленным требованиям осуществляются их регистрация в информационной системе и последующая передача на склад. При выявлении несоответствий инициируется процедура корректировки, которая может включать оформление возврата, списания или утилизации материалов. Такая схема отражает реальные условия функционирования логистической цепочки и позволяет учитывать возможные отклонения в потоке материалов.

После регистрации материалы поступают на склад, где осуществляются определение места хранения, размещение и последующий контроль их состояния. На BPMN-диаграмме выделены операции, связанные с выявлением непригодных или просроченных материалов. В подобных случаях инициируются процессы утилизации. При подтверждении пригодности материалов выполняются операции комплектации и передачи конечному потребителю. Завершающим этапом логистической цепочки является использование материалов на строительном объекте.

Подробное отражение всех операций дает возможность оценить, как именно данные переходят между подразделениями, какие решения оказывают влияние на последующие этапы и где формируются потенциальные задержки. Такое представление важно для дальнейшего анализа, поскольку точность описания исходных процессов определяет качество последующих расчетов и моделирования (Sencer & Karaismailoglu, 2022; Stein Dani et al., 2022).

Отдельно сформирована BPMN-диаграмма, отражающая только операции, связанные с движением строительных материалов (рис. 2).



**Рисунок 2.** BPMN-диаграмма движения строительных материалов

В схему включены этапы приемки, проверки качества, регистрации поступления, определения места хранения, маркировки, размещения, контроля состояния материалов, выявления просроченных или непригодных запасов, а также действий по утилизации, возврату или передаче конечному потребителю. В сравнении с общей процессной диаграммой на

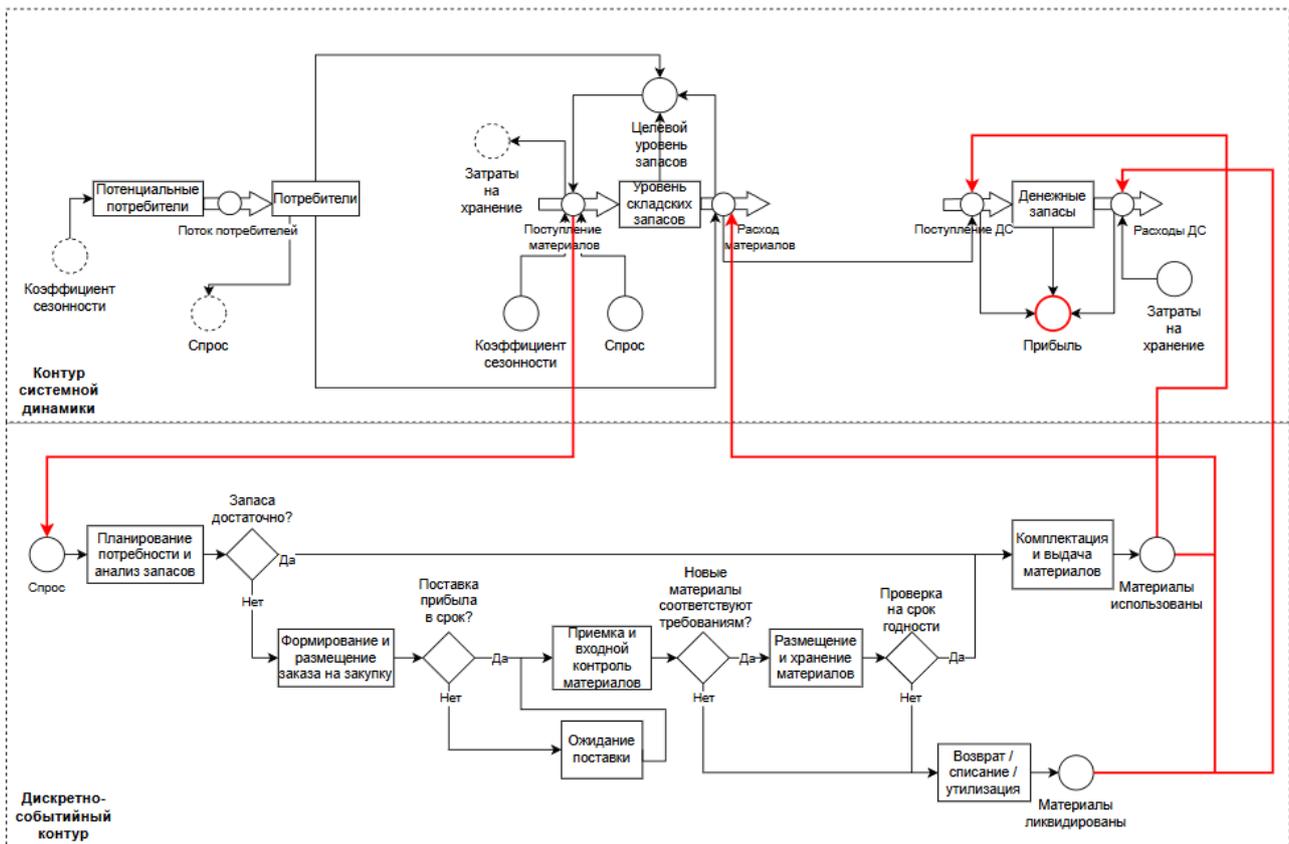
данном рисунке уточнены внутренняя логика операций, порядок переходов и последовательность действий сотрудников склада.

Данная схема является составной частью общей модели процессов компании AS-IS, однако выделена в отдельный блок, поскольку именно последовательность операций, связанных с движением и обработкой материалов, формирует основу для последующей разработки цифровой модели управления складскими запасами. Данный подход позволяет сосредоточиться на операциях, которые непосредственно определяют уровень и доступность запасов, а также влияют на параметры и результаты дальнейших расчетов.

В дальнейшем представленная диаграмма будет детализирована и перенесена в дискретно-событийную среду моделирования. Остальные процессы, не входящие непосредственно в контур движения материалов, планируется учитывать как внешние факторы, влияющие на поведение модели. На основе анализа процессов AS-IS предполагается реализовать гибридную имитационную модель, сочетающую дискретно-событийное моделирование с элементами системной динамики, что позволит учитывать такие факторы, как сезонность, изменение спроса и другие макроусловия функционирования склада. Разрабатываемая цифровая модель позволит автоматизировать ключевые функции управления запасами, включая контроль уровня складских остатков, прогнозирование потребности в строительных материалах, оценку влияния сезонных колебаний и спроса, а также поддержку принятия управленческих решений в условиях неопределенности.

Разработанные схемы отражают текущее состояние процессов (AS-IS) и фиксируют фактическую последовательность действий, связанных с обеспечением строительных объектов материалами. Данное представление необходимо для выявления ограничений существующей организации складской деятельности и определения операций и показателей, оказывающих наибольшее влияние на уровень и доступность запасов для дальнейшей оценки эффективности складских операций (Gunasekaran et al., 1999; Živičnjak et al., 2022; Abdul Rahman et al., 2023). На основе проведенного анализа и с учетом выявленных особенностей будет сформировано целевое состояние процессов (TO-BE), включающее рекомендации по совершенствованию организации работ, устранению избыточных операций и сокращению времени обработки строительных материалов.

Для обеспечения возможности комплексного анализа процессов управления запасами разработана концептуальная архитектура гибридного подхода к моделированию процессов управления складскими запасами строительных материалов, представленная на рис. 3. Архитектура основана на разделении модели на два взаимосвязанных контура: контур системной динамики и дискретно-событийный контур.



**Рисунок 3.** Концептуальная архитектура гибридного подхода к моделированию процессов управления складскими запасами строительных материалов

Представленная концептуальная схема отражает архитектуру гибридной имитационной модели управления складскими запасами строительных материалов и включает два контура: контур системной динамики и дискретно-событийный контур. Такое разделение позволяет учитывать как агрегированные изменения состояния системы во времени, так и детальную логику выполнения операционных процессов.

В контуре системной динамики находится уровень складских запасов, который изменяется под воздействием потоков поступления и расхода материалов. Поступление материалов формируется с учетом спроса и коэффициента сезонности, отражающего неравномерность потребления строительных материалов в течение года. Расход материалов определяется интенсивностью использования запасов потребителями и напрямую связан с фактическим спросом. Целевой уровень запасов используется как ориентир управления и сопоставляется с текущим уровнем складских остатков при формировании управленческих решений.

В контуре системной динамики также представлены экономические показатели. Потоки материальных ресурсов связаны с денежными потоками, формирующими уровень денежных запасов. На него влияют поступления денежных средств и расходы, включая затраты на хранение. В результате формируется показатель прибыли, позволяющий оценивать экономические последствия выбранной политики управления запасами. Таким образом, системно-динамический контур обеспечивает комплексный учет материальных аспектов функционирования складской системы.

Дискретно-событийный контур отражает операционные процессы управления запасами и движения материалов. Он начинается с этапа планирования потребности и анализа запасов,

инициируемого спросом. В зависимости от наличия материалов на складе принимается решение о необходимости закупки. При недостаточности запасов формируется и размещается заказ, после чего учитываются варианты своевременной поставки либо ожидания в случае задержки. Далее выполняются приемка и входной контроль материалов, а также проверка их соответствия установленным требованиям. Материалы, прошедшие контроль, размещаются на хранение с последующей проверкой сроков годности. При выявлении непригодных материалов запускаются процедуры возврата, списания или утилизации.

Связь между контурами реализуется за счет передачи ключевых параметров и фактических результатов. Спрос и параметры управления из системно-динамического контура определяют интенсивность поступления сущностей в дискретно-событийном контуре, тогда как результаты приемки, выдачи и списания материалов используются для корректировки потоков и запасов в системной динамике. Такое взаимодействие обеспечивает целостное описание системы управления запасами и создает основу для принятия управленческих решений с учетом устойчивости и эффективности функционирования складской системы.

В рамках исследования была выполнена декомпозиция процессов управления складскими запасами с учетом специфики строительных предприятий, характеризующихся проектным характером деятельности, неравномерностью потребления материалов и высокой зависимостью от внешних условий, например спроса. Предложенная структура процессов может рассматриваться как типовая для организаций, занимающихся управлением строительными материалами, поскольку отражает полный цикл работы с материалами – от формирования потребности до использования на объекте, а также позволяет адаптировать модель под различные масштабы и условия функционирования предприятия.

Разрабатываемая имитационная модель управления складскими запасами ориентирована на поддержку принятия управленческих решений. На основе результатов моделирования возможно оценивать влияние сезонных колебаний спроса на уровень запасов, анализировать последствия задержек поставок, выбирать параметры политики пополнения и прогнозировать потребность в материалах. Модель позволяет оценивать влияние управленческих решений на прибыль предприятия, включая управление уровнем запасов и сокращение времени обработки материалов, что одновременно обеспечивает повышение устойчивости и эффективности складской системы.

#### 4. Заключение

В рамках проведенного исследования были рассмотрены процессы управления складскими запасами строительных материалов с точки зрения гибридного подхода и их формализации с использованием нотации BPMN. Был проведен анализ текущего состояния организации складской деятельности (AS-IS), охватывающий полный цикл обеспечения строительных объектов материалами: от формирования потребности и планирования закупок до приемки, хранения и передачи материалов конечному потребителю.

В результате исследования были построены процессные диаграммы, позволяющие отразить фактическую последовательность действий, взаимодействие подразделений и ключевые точки принятия решений. Отдельное выделение процессов, непосредственно связанных с движением материалов, позволило детализировать внутреннюю логику складских операций и определить этапы, которые оказывают наибольшее влияние на уровень и доступность запасов, а также на скорость и стабильность обеспечения строительных объектов.

Проведенная формализация процессов создает основу для дальнейшей цифровизации процессов управления складскими запасами. Предложенный подход позволяет перейти от описательного анализа к построению гибридной имитационной модели, сочетающей дискретно-событийное моделирование и элементы системной динамики. Использование гибридной имитационной модели обеспечит возможность учета изменчивого спроса, сезонных факторов и неопределенности поставок, а также позволит автоматизировать контроль складских остатков, прогнозирование потребности в материалах и обоснованное принятие управленческих решений.

Полученные результаты могут быть использованы при формировании модели целевого состояния процессов (ТО-ВЕ), направленной на улучшение складской деятельности, снижение рисков дефицита и избыточного накопления запасов, а также на повышение эффективности логистических и производственных процессов. Представленный подход может быть применен при разработке интеллектуальных систем управления запасами и служит основой для дальнейших исследований в области цифровизации складской логистики строительных предприятий.

### Список литературы

- Abdul Rahman, N.S.F., Karim, N.H., Md Hanafiah, R., Abdul Hamid, S., Mohammed, A., 2023. Decision analysis of warehouse productivity performance indicators to enhance logistics operational efficiency. *International Journal of Productivity and Performance Management* 72 (4), 962–985. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2021-0373>
- Balakrishna Moorthy, C., Rajani, D., Pushpalatha, A.P., Ramya, S., Selvaraj, A., Mohit Tiwari, 2024. Enhancing Inventory Management through Advanced Technologies and Mathematical Methods: Utilizing Neutrosophic Fuzzy Logic. *International Journal of Neutrosophic Science* 24 (4), 50–58. <https://doi.org/10.54216/ijns.240403>
- Becerra, P., Mula, J., Sanchis, R., 2022. Sustainable Inventory Management in Supply Chains: Trends and Further Research. *Sustainability* 14 (5), 2613. <https://doi.org/10.3390/su14052613>
- Ernst, R., Guerrero, J.L., Roshwalb, A., 1993. A quality control approach for monitoring inventory stock levels. *Journal of the Operational Research Society* 44 (11), 1115–1127.
- Gunasekaran A., Marri, H.B., Menci, F., 1999. Improving the effectiveness of warehousing operations: a case study. *Industrial Management & Data Systems* 99 (8), 328–339. <https://doi.org/10.1108/02635579910291975>
- Kanike U.K., 2023. Factors disrupting supply chain management in manufacturing industries. *Journal of Supply Chain Management Science* 4 (1–2), 1–24. <https://doi.org/10.18757/jscms.2023.6986>
- Kaynov, I., van Knippenberg, M., Menkovski, V., van Breemen, A., van Jaarsveld, W., 2024. Deep Reinforcement Learning for One-Warehouse Multi-Retailer inventory management. *International Journal of Production Economics* 267, 109088. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109088>
- Madamidola, O.A., Daramola, O.A., Akintola, K., Adeboje, O., 2024. A Review of existing inventory management systems. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)* 12 (9), 40–50.
- Opoku A., Ahmed V., Ofori G., 2022. Realising the sustainable development goals through organisational learning and efficient resource management in construction. *Resources, Conservation and Recycling* 184, 106427. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106427>
- Preil, D., Krapp, M., 2022. Artificial intelligence-based inventory management: a Monte Carlo tree search approach. *Annals of Operations Research* 308 (1–2), 415–439. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-03935-2>
- Qi, M., Shi, Y., Qi, Y., Ma, Ch., Yuan, R., Wu, D., Shen, Z.-J. (Max), 2023. A Practical End-to-End Inventory Management Model with Deep Learning. *Management Science* 69 (2), P. 759–773. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4564>
- Sencer, A., Karaismailoglu, A., 2022. A simulation and analytic hierarchy process based decision support system for air cargo warehouse capacity design. *Simulation* 98 (3), 235–255. <https://doi.org/10.1177/00375497211029915>
- Stein Dani, V., Freitas C.M.D.S., Thom L.H., 2022. Recommendations for visual feedback about problems within BPMN process models. *Software and Systems Modeling* 21 (5), 2039–2065. <https://doi.org/10.1007/s10270-021-00972-0>
- Stopková, M., Stopka, O., L'upták, V., 2019. Inventory Model Design by Implementing New Parameters into the Deterministic Model Objective Function to Streamline Effectiveness Indicators of the Inventory Management. *Sustainability* 11 (15), 4175. <https://doi.org/10.3390/su11154175>
- Tadayonrad Y., Ndiaye A.B., 2023. A new key performance indicator model for demand forecasting in inventory management considering supply chain reliability and seasonality. *Supply Chain Analytics* 3, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100026>
- Tao, S., Liu, Sh., Zhou, H., Mao, X., 2024. Research on Inventory Sustainable Development Strategy for Maximizing Cost-Effectiveness in Supply Chain. *Sustainability* 16 (11), 4442. <https://doi.org/10.3390/su16114442>
- Zhang, Q., Lu, D., Xiang, Q., Lo, W., Lin, Y., 2024. Design and optimization of dynamic reliability-driven order allocation and inventory management decision model. *PeerJ Computer Science* 10, e2294. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2294>
- Živičnjak, M., Rogić, K., Bajor I., 2022. Case-study analysis of warehouse process optimization. *Transportation Research Procedia* 64, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.026>
- Булатникова П.А., Радаев А.Е. Модель обоснования характеристик системы управления запасами материальных ресурсов с учетом различных категорий рисков // *π-Economy*. 2025. Т. 18. №. 4. С. 140–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.18721/πE.18408>
- Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Федяевская Д.Э., Поспелов К.Н., Ракова В.В. Цифровое моделирование социотехнических и социально-экономических систем. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. 164 с.

- Гридина В.В., Шукина А.А. Системно-динамическая модель оценки эффективности логистической деятельности предприятия оптово-розничной торговли // Новое в экономической кибернетике. 2025. № 2. С. 11–24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17081358>
- Данилов Г.Р., Маевский А.Г. Применение имитационного моделирования с целью эффективного внедрения инноваций в компании на примере логистики // Актуальные вопросы современной экономики. 2025. № 4. С. 162–172.
- Загидуллин Н.М., Филимонова Т.К. Разработка имитационной модели управления запасами в среде компьютерного моделирования AnyLogic // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 96–8. С. 46–49. <https://doi.org/10.18411/trnio-04-2023-404>
- Лебедева Л.М., Полуэктова Н.Р. Применение системной динамики для оценки изменения уровня запасов после внедрения ERP-систем // Проблемы экономики (Харьков). 2013. № 3. С. 321–329.
- Нигматулин А.Д., Бекетов С.М., Дергачев М.В. Совершенствование процессов управления запасами на предприятии в сфере электроники // Автоматизация в промышленности. 2025. № 8. С. 25–28.

## References

- Abdul Rahman, N.S.F., Karim, N.H., Md Hanafiah, R., Abdul Hamid, S., Mohammed, A., 2023. Decision analysis of warehouse productivity performance indicators to enhance logistics operational efficiency. *International Journal of Productivity and Performance Management* 72 (4), 962–985. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2021-0373>
- Balakrishna Moorthy, C., Rajani, D., Pushpalatha, A.P., Ramya, S., Selvaraj, A., Mohit Tiwari, 2024. Enhancing Inventory Management through Advanced Technologies and Mathematical Methods: Utilizing Neutrosophic Fuzzy Logic. *International Journal of Neutrosophic Science* 24 (4), 50–58. <https://doi.org/10.54216/ijns.240403>
- Becerra, P., Mula, J., Sanchis, R., 2022. Sustainable Inventory Management in Supply Chains: Trends and Further Research. *Sustainability* 14 (5), 2613. <https://doi.org/10.3390/su14052613>
- Bulatnikova P.A., Radaev A.E., 2025. Model for substantiating the characteristics of a material resource inventory management system, taking into account various risk categories. *π-Economy* 18 (4), 140–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.18721/JE.18408>
- Danilov, G., Mayevskiy, A., 2025. Application of Simulation Modeling for the Effective Implementation of Innovations in a Company Using Logistics as an Example. *Aktualnyye voprosy sovremennoy ekonomiki [Current issues of modern economics]* 4, 162–172.
- Ernst, R., Guerrero, J.L., Roshwalb, A., 1993. A quality control approach for monitoring inventory stock levels. *Journal of the Operational Research Society* 44 (11), 1115–1127.
- Gintsyak, A.M., Burlutskaya, Zh.V., Fedyayevskaya, D.E., Pospelov, K.N., Rakova, V.V., 2023. Digital Modeling of Sociotechnical and Socio-Economic Systems. Publishing House of Polytechnical University, St. Petersburg.
- Gridina, V., Shchukina, A., 2025. System-Dynamic Model for Assessing the Efficiency of Logistics Activities of a Wholesale and Retail Trade Enterprise. *New in Economic Cybernetics* 2, 11–24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17081358>
- Gunasekaran A., Marri H.B., Menci F., 1999. Improving the effectiveness of warehousing operations: a case study. *Industrial Management & Data Systems* 99 (8), 328–339. <https://doi.org/10.1108/02635579910291975>
- Kanike U.K., 2023. Factors disrupting supply chain management in manufacturing industries. *Journal of Supply Chain Management Science* 4 (1–2), 1–24. <https://doi.org/10.18757/jsccms.2023.6986>
- Kaynov, I., van Knippenberg, M., Menkovski, V., van Breemen, A., van Jaarsveld, W., 2024. Deep Reinforcement Learning for One-Warehouse Multi-retailer inventory management. *International Journal of Production Economics* 267, 109088. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109088>
- Lebedeva L.M., Poluektova, N.R., 2013. Primeneniye sistemnoy dinamiki dlya otsenki izmeneniya urovnya zapasov posle vnedreniya ERP-sistem [Application of system dynamics for assessment of changes of the level of stock after introduction of ERP systems]. *Problemy ekonomiki (Kharkov) [Problems of the Economy (Kharkiv)]* 3, 321–329.
- Madamidola, O.A., Daramola, O.A., Akintola, K., Adeboje, O., 2024. A Review of existing inventory management systems. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)* 12 (9), 40–50.
- Nigmatulin A.D., Beketov S.M., Dergachev M.V., 2025. Sovershenstvovaniye protsessov upravleniya zapasami na predpriyatii v sfere elektroniki [Improving inventory management processes at an electronics company]. *Automation in Industry* 8, 25–28.
- Opoku, A., Ahmed, V., Ofori, G., 2022. Realising the sustainable development goals through organisational learning and efficient resource management in construction. *Resources, Conservation and Recycling* 184, 106427. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106427>
- Preil, D., Krapp, M., 2022. Artificial intelligence-based inventory management: a Monte Carlo tree search approach. *Annals of Operations Research* 308 (1–2), 415–439. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-03935-2>
- Qi, M., Shi, Y., Qi, Y., Ma, Ch., Yuan, R., Wu, D., Shen, Z.-J. (Max), 2023. A Practical End-to-End Inventory Management Model with Deep Learning. *Management Science* 69 (2), P. 759–773. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4564>
- Sencer, A., Karaismailoglu, A., 2022. A simulation and analytic hierarchy process based decision support system for air cargo warehouse capacity design. *Simulation* 98 (3), 235–255. <https://doi.org/10.1177/00375497211029915>
- Stein Dani V., Freitas C.M.D.S., Thom L.H., 2022. Recommendations for visual feedback about problems within BPMN process models. *Software and Systems Modeling* 21 (5), 2039–2065. <https://doi.org/10.1007/s10270-021-00972-0>
- Stopková, M., Stopka, O., L'upták, V., 2019. Inventory Model Design by Implementing New Parameters into the Deterministic Model Objective Function to Streamline Effectiveness Indicators of the Inventory Management. *Sustainability* 11 (15), 4175. <https://doi.org/10.3390/su11154175>
- Tadayonrad Y., Ndiaye A.B., 2023. A new key performance indicator model for demand forecasting in inventory management considering supply chain reliability and seasonality. *Supply Chain Analytics* 3, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100026>
- Tao, S., Liu, Sh., Zhou, H., Mao, X., 2024. Research on Inventory Sustainable Development Strategy for Maximizing Cost-Effectiveness in Supply Chain. *Sustainability* 16 (11), 4442. <https://doi.org/10.3390/su16114442>
- Zagidullin N.M., Filimonova T.K., 2023. Razrabotka imitatsionnoy modeli upravleniya zapasami v sfere kompyuternogo modelirovaniya anylogic [Development of a simulation model of inventory management in the AnyLogic computer modeling environment], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya [Trends in the development of science and education]* 96–8, 46–49. <https://doi.org/10.18411/trnio-04-2023-404>
- Zhang, Q., Lu, D., Xiang, Q., Lo, W., Lin, Y., 2024. Design and optimization of dynamic reliability-driven order allocation and inventory management decision model. *PeerJ Computer Science* 10, e2294. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2294>
- Živičnjak, M., Rogić, K., Bajor I., 2022. Case-study analysis of warehouse process optimization. *Transportation Research Procedia* 64, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.026>

Статья поступила в редакцию 25.06.2025, одобрена после рецензирования 06.07.2025, принята к публикации 20.07.2025.

The article was submitted 25.06.2025, approved after reviewing 06.07.2025, accepted for publication 20.07.2025.

#### Информация об авторах

1. София Степанова, магистрант, Высшая школа проектной деятельности и инноваций в промышленности, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0009-0006-4481-8383>, [stepanova2.sv@edu.spbstu.ru](mailto:stepanova2.sv@edu.spbstu.ru)
2. Сальбек Бекетов, ассистент, Высшая школа проектной деятельности и инноваций в промышленности, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486>, [salbek.beketov@spbpu.com](mailto:salbek.beketov@spbpu.com)

#### About the authors:

1. Sofiia Stepanova, Master's student, Higher School of Project Activities and Innovations in Industry, Institute of Machinery, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia, <https://orcid.org/0009-0006-4481-8383> , [stepanova2.sv@edu.spbstu.ru](mailto:stepanova2.sv@edu.spbstu.ru)
2. Salbek Beketov, assistant, Higher School of Project Activities and Innovations in Industry, Institute of Machinery, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia, <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486> , [salbek.beketov@spbpu.com](mailto:salbek.beketov@spbpu.com)