

# Экономико-математические методы и модели Economic & mathematical methods and models

Научная статья

УДК 519.863

DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18408>

EDN: <https://elibrary/VNLROA>



## МОДЕЛЬ ОБОСНОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ РИСКОВ

П.А. Булатникова , А.Е. Радаев 

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

 [bulatnikovap10@gmail.com](mailto:bulatnikovap10@gmail.com)

**Аннотация.** Эффективное управление материально-техническим обеспечением является одним из ключевых факторов устойчивого развития при гарантировании требуемого уровня гибкости и адаптивности производственных систем промышленных предприятий. Особую значимость в этом контексте приобретают вопросы обеспечения эффективной системы управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов, непосредственно задействованных в соответствующих производственных процессах. *Целью исследования* является разработка инструментальных средств для решения задачи обоснования характеристик системы управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов с учетом требований в части недопущения дефицита материального ресурса и превышения максимально допустимого уровня запаса. *Объектом исследования* является система управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов, задействованных в основном технологическом процессе промышленного предприятия. *Предметом исследования* являются характеристики системы управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов, задействованных в основном технологическом процессе промышленного предприятия. В рамках исследования был проведен детальный анализ существующих научных разработок в области обоснования характеристик систем управления запасами материальных ресурсов на промышленных предприятиях, определены недостатки соответствующих инструментальных средств (моделей, методик, алгоритмов и т.п.). Была разработана оптимизационная модель, обеспечивающая обоснования характеристик системы управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов с учетом следующих категорий рисков: риска возникновения дефицита одной или нескольких номенклатурных позиций запасов материальных ресурсов; риска превышения максимально допустимого уровня запаса материальных ресурсов для одной или нескольких номенклатурных позиций. В качестве теоретической основы использовалась методика оптимизации страхового запаса для одной номенклатурной позиции. Наиболее эффективные алгоритмы для реализации модели базируются на методе обобщенного понижающего градиента, демонстрирующем высокие показатели точности и сходимости в отношении наличия гладких (дифференцируемых) функций, а также на стохастических методах глобального поиска. Разработанная оптимизационная модель была реализована на практическом примере – для решения задачи обоснования характеристик системы управления запасами материальных ресурсов, используемых в деятельности предприятий строительной отрасли. Результаты реализации модели на практическом примере подтвердили ее высокую практическую значимость.

**Ключевые слова:** оптимизационная модель, промышленное предприятие, материальные ресурсы, управление запасами, остаточный уровень запаса, уровень дефицита

**Для цитирования:** Булатникова П.А., Радаев А.Е. (2025) Модель обоснования характеристик системы управления запасами материальных ресурсов с учетом различных категорий рисков. П-Economy, 18 (4), 140–157. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18408>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18408>

## MODEL FOR SUBSTANTIATING THE CHARACTERISTICS OF A MATERIAL RESOURCE INVENTORY MANAGEMENT SYSTEM, TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS RISK CATEGORIES

P.A. Bulatnikova  , A.E. Radaev 

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation

 bulatnikovap10@gmail.com

**Abstract.** Effective management of material and technical support is one of the key factors of sustainable development while ensuring the required level of flexibility and adaptability of production systems within industrial enterprises. Of particular importance in this context are the issues related to ensuring an effective system for managing multi-item stocks of material resources directly involved in the corresponding production processes. *The objective of the study* is to develop tools for solving the problem of substantiating the characteristics of a system for managing multi-item stocks of material resources, taking into account the requirements for preventing a shortage of a material resource and exceeding the maximum permissible stock level. *The object of the study* is a system for managing multi-item stocks of material resources involved in the main technological process of an industrial enterprise. *The subject of the study* is the characteristics of a system for managing multi-item stocks of material resources involved in the main technological process of an industrial enterprise. The study included a detailed analysis of existing scientific developments in the field of substantiating the characteristics of material resource stock management systems within industrial enterprises, and identifying the shortcomings of the corresponding tools (models, methods, algorithms etc.). An optimization model was developed that provides justification for the characteristics of the management system for multi-item stocks of material resources, taking into account the following risk categories: the risk of a shortage of one or more product items of stocks of material resources; the risk of exceeding the maximum permissible level of stock of material resources for one or more product items. The methodology for optimizing the safety stock for one product item was used as a theoretical basis. The most effective algorithms for implementing the model are based on the generalized decreasing gradient method, which demonstrates high accuracy and convergence rates in relation to the presence of smooth (differentiable) functions, as well as on stochastic global search methods. The developed optimization model was implemented on a practical example – to solve the problem of substantiating the characteristics of the management system for stocks of material resources used in the activities of enterprises in the construction industry. The results of the implementation of the model on a practical example confirmed its high practical significance.

**Keywords:** optimization model, industrial enterprise, material resources, inventory management, residual inventory level, deficit level

**Citation:** 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. *П-Еconomy*, 18 (4), 140–157. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.18408>

### Введение

#### *Актуальность исследования*

В современных условиях развития отечественных промышленных предприятий, характеризующихся высокой изменчивостью характеристик соответствующих сетей поставок, эффективное управление материально-техническим обеспечением становится одним из ключевых факторов устойчивого развития при гарантировании требуемого уровня гибкости и адаптивности соответствующих производственных систем. Особую значимость в этом контексте приобретают вопросы обеспечения эффективной системы управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов, непосредственно задействованных в основных производственных процессах,

для достижения минимизации затрат на управление запасами и, как следствие, повышения показателей рентабельности промышленных предприятий [1, 2]. Данное обстоятельство определяется значительной долей потерь, обусловленных неэффективным управлением запасами при отсутствии применения обоснованного научного подхода к организации поставок и хранения материальных ресурсов, в общей структуре затрат промышленных предприятий. Также следует отметить высокую степень влияния характеристик системы управления запасами на показатели гибкости (в частности, размаха значений временных или объемных параметров процесса поставки, при которых обеспечивается отсутствие дефицита материального ресурса или превышения максимально допустимого уровня соответствующего запаса) и адаптивности (в частности, ожидаемого периода или уровня дефицита материального ресурса при изменении временных или объемных параметров процесса поставки). При этом проблема обеспечения эффективного функционирования системы управления материальными ресурсами на промышленных предприятиях усугубляется отсутствием эффективных научных разработок, предоставляющих учет различных категорий рисков при обосновании характеристик соответствующих материальных потоков с учетом временных и пространственных ограничений, задаваемых в отношении производственных систем.

Таким образом, потребность современных промышленных предприятий в обеспечении эффективного функционирования систем управления запасами материальных ресурсов, а также отсутствие научных разработок в области обоснования характеристик вышеупомянутых систем управления запасами с учетом всех ключевых факторов (в том числе факторов случайного характера, обуславливающих наличие различных категорий рисков) определяют актуальность настоящего исследования.

#### *Литературный обзор*

На начальных этапах исследования был произведен обзор и анализ научных работ в области обоснования характеристик систем управления запасами материальных ресурсов в рамках промышленных предприятий.

В.М. Волокитина, Т.Г. Гедич, В.О. Дятлова, В.В. Сыроижко, Ш.М. Валитов, М.С. Языков, Ю.Д. Николаева, Д.И. Заруднев и К.Н. Буренок в своих работах [3–9] рассматривают наиболее распространенные классические системы управления запасами, их отличительные особенности, преимущества и недостатки, а также эффективность их функционирования применительно к технологическим процессам строительной отрасли.

А.А. Кузубов в своей работе [10] отмечает важность использования логистического подхода (предполагающего одновременный учет процессов снабжения, производства, сбыта продукции) при решении задач обеспечения эффективного функционирования систем управления запасами материальных ресурсов.

Е.В. Скворода в своей работе [11] рассматривает процесс решения задачи определения размера партии, интервала поставки и иных сопутствующих параметров системы управления запасами материальных ресурсов в качестве ключевой компоненты методического подхода к проектированию стратегии управления производственными запасами на промышленных предприятиях.

В работе [12] Р.Ю. Бородавко представлено описание формализованной процедуры определения оптимального уровня сбытовых запасов на основе результатов обработки статистических данных об объемах, структуре и уровне спроса на продукцию предприятия или (в случае отсутствия упомянутых статистических данных) на основе результатов экономико-математического моделирования.

Е.В. Капустиным и А.С. Шкуркиным в работе [13] предложено интегрально-дифференциальное уравнение для функции распределения уровня запасов в рамках модели управления запасами, предполагающей простейший поток заявок потребителей на отгрузку материального ресурса со склада, случайный объем отгрузки материального ресурса в рамках отдельной заявки, а также



пополнение запасов материального ресурса до заданного начального уровня через равные промежутки времени.

В работе [14] О.С. Прокофьевой и Я.В. Ющук представлено описание имитационной модели управления складскими запасами готовой продукции промышленного предприятия. При этом формализованное описание процесса решения задачи формирования системы управления складскими запасами выполнено с использованием средств линейного программирования и предполагает минимизацию интегральных логистических затрат предприятия.

О.В. Пацула в работе [15] рассмотрены вопросы использования средств динамического программирования для определения характеристик системы управления запасами материальных ресурсов в рамках задачи оптимального управления заемными средствами предприятия с учетом отдельных категорий финансовых рисков.

В работе [16] Е.П. Белоусовой представлено описание процесса решения задачи управления запасами материальных ресурсов как задачи поиска оптимального управляющего воздействия с использованием метода обратной связи.

Ц.-М. Цой<sup>1</sup> приводит описание детерминированных и стохастических задач управления запасами, базирующихся на аналитической модели экономичного размера заказа (Economic Order Quantity – EOQ), а также примеры решения задач для отдельных разновидностей эшелонированных логистических цепей.

В работе [17] Э.А. Сильвера, Д.Ф. Пайка и Р. Петерсона представлено описание принципов адаптации методов составления бюджета капиталовложений к решению задач обоснования оптимального уровня запасов материального ресурса в рамках промышленного предприятия.

Вопросы учета многономенклатурности запасов при обосновании характеристик соответствующих детерминированных систем управления рассмотрены в работах А.С. Мандель [18, 19], а также А.Е. Радаева, А.В. Левенцова, В.В. Кобзева [20].

Вопросы учета факторов случайного характера (в том числе относящихся к процессу потребления грузов со склада) при обосновании характеристик систем управления запасами материальных ресурсов в рамках промышленного предприятия представлено в работах О.А. Свиридовой, О.А. Корокусова, В.В. Домбровского, Е.В. Чаусовой, Р. Росси, Ш.А. Тарима, Б. Хниша, С. Прествича [21–25].

В статье [26] М.Ю. Карловой представлено описание обобщенной математической модели для формирования оптимальной стратегии управления запасами материальных ресурсов на основе ориентированных графов, в которых узлы описывают альтернативные состояния системы управления запасами, а дуги – переходы между состояниями, обусловленные управляющими воздействиями.

А.Л. Казаков, А.А. Лемперт и Т.Б. Фунг в работе [27] рассматривают вопросы описания систем управления запасами материальных ресурсов с использованием линейных дифференциальных уравнений второго порядка с запаздывающим аргументом.

В работе [28] И.В. Грылевой приведены результаты анализа областей эффективного практического применения отдельных детерминированных и стохастических моделей управления запасами.

М.Г. Гасратов в своей работе [29] рассматривает вопросы учета ценовой конкуренции промышленных предприятий, осуществляющих определенную логистическую функцию, с использованием элементов теории игр при обосновании характеристик соответствующих систем управления запасами.

В статье [30] И.В. Доможировой предложены экономико-математические модели расчета характеристик управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов промышленного предприятия на основе критериев маржинальной прибыли, валовой прибыли и логистических издержек.

<sup>1</sup> Choi Ts.-M. (2014) *Handbook of EOQ Inventory Problems: Stochastic and Deterministic Models and Applications*, New York: Springer New York. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7639-9>

На основе результатов обзора и анализа научных работ, относящихся к рассматриваемой предметной области, были сделаны следующие выводы:

– значительная часть научных публикаций (в том числе<sup>2</sup> [3–11, 28]) содержит описание научных результатов обзорного или методического характера, при этом авторы публикаций не предлагают каких-либо инструментальных средств (моделей, методик, алгоритмов и т.п.), обеспечивающих значительное повышение адекватности получаемых результатов решения задачи обоснования характеристик системы управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов в рамках промышленных предприятий;

– в отдельных работах (в том числе [12, 14, 17, 26, 30]) представлено формализованное описание процесса решения задачи обоснования характеристик системы управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов для учета тех или иных факторов внутренней или внешней среды, однако отсутствие результатов реализации разработки на практическом примере не позволяет объективно оценить ее практическую значимость;

– в отдельных работах представлено описание научных разработок для решения рассматриваемой задачи, базирующихся на методах дифференциального исчисления [13, 27], динамического программирования [15], оптимального управления [16], решения систем линейных уравнений [18, 19], линейной и нелинейной оптимизации [20], а также на элементах теории вероятности [21–25] и теории игр [29]; основными недостатками вышеупомянутых разработок являются следующие: отсутствие объективного учета факторов случайного характера, относящихся в том числе к процессам поступления и убытия грузов из зоны хранения, и связанных с ними категорий рисков [15, 18–20]; высокая трудоемкость решения задачи для большого количества номенклатурных позиций (видов материального ресурса) [15, 16, 18, 19, 21–25, 29]; относительно невысокая адекватность работы вычислительных алгоритмов для реализации моделей [20].

Вышеуказанные выводы определили целесообразность разработки инструментальных средств, учитывающих характер вероятностных распределений случайных величин характеристик объемов многономенклатурных запасов, относящихся в том числе к остаточному запасу и дефициту, обусловленный влиянием различных категорий рисков.

#### *Цель исследования*

Целью исследования является разработка инструментальных средств для решения задачи обоснования характеристик системы управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов с учетом требований в части недопущения дефицита материального ресурса и превышения максимально допустимого уровня запаса.

Основными задачами исследования явились следующие:

1. Разработка оптимизационной модели обоснования характеристик системы управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов с учетом отдельных категорий рисков.
2. Практическая реализация полученной оптимизационной модели на примере конкретного производственного предприятия.

Объектом исследования является система управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов, задействованных в основном технологическом процессе промышленного предприятия.

Предметом исследования являются характеристики системы управления многономенклатурными запасами материальных ресурсов, задействованных в основном технологическом процессе промышленного предприятия.

#### **Методы и материалы**

На промежуточных этапах исследования была разработана оптимизационная модель обоснования характеристик системы управления многономенклатурными запасами материальных

<sup>2</sup> Choi Ts.-M. (2014) *Handbook of EOQ Inventory Problems: Stochastic and Deterministic Models and Applications*, New York: Springer New York. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7639-9>

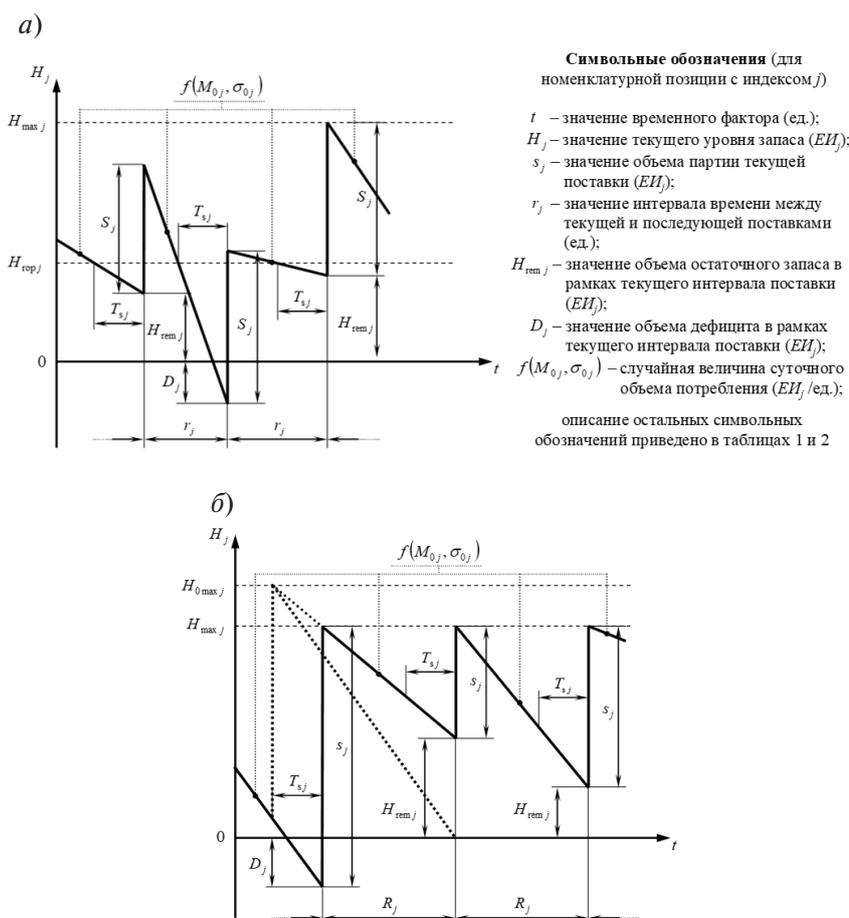


Рис. 1. Графическое описание моделей управления запасами, учитываемых в рамках разработанной оптимизационной модели:  
 а) модель с фиксированной партией поставки; б) модель с фиксированным ритмом поставки  
 Fig. 1. Graphical description of inventory management models considered within the developed optimization model:  
 a) fixed order quantity model; b) fixed delivery rate model

ресурсов с учетом следующих категорий рисков: риск возникновения дефицита одной или нескольких номенклатурных позиций запасов материальных ресурсов; риск превышения максимально допустимого уровня запаса материальных ресурсов для одной или нескольких номенклатурных позиций. Оптимизационная модель базируется на следующих основных положениях:

1. Технологический процесс грузопереработки, реализуемый в рамках складского объекта, в рамках которого применяется система управления запасами материальных ресурсов, соответствует одной из следующих моделей управления запасами:

– модель с фиксированной партией поставки, предполагающая для каждой номенклатурной позиции запасов размещение заказа на поставку неизменного по заказам объема в момент времени, соответствующий достижению текущим уровнем запаса некоторого «сигнального» значения – так называемой точки заказа; при этом имеет место переменный интервал времени между хронологически смежными поставками на склад каждого отдельного вида груза;

– модель с фиксированным ритмом поставки, предполагающая для каждой номенклатурной позиции запасов размещение заказа на поставку переменного объема через неизменный по заказам интервал времени, соответствующий ритму поставки.

Графическое описание вышеупомянутых моделей представлено на рис. 1.

2. Каждая из моделей, упомянутых в п. 1, предполагает случайный характер величины суточного объема потребления каждого вида материального ресурса, соответствующий нормальному закону вероятностного распределения.

3. Каждая из моделей, упомянутых в п. 1, применяется одновременно ко всем номенклатурным позициям (видам материальных ресурсов), обрабатываемым в рамках складского объекта.

4. Каждая из моделей, упомянутых в п. 1, предполагает обоснование характеристик процесса поставки на склад каждого вида материальных ресурсов для обеспечения отсутствия дефицита упомянутого вида материальных ресурсов с заданной вероятностью.

5. Каждая из моделей, упомянутых в п. 1, предусматривает резервирование складских мощностей под каждый вид материальных ресурсов для обеспечения отсутствия переполнения емкости склада с заданной вероятностью.

6. Основным показателем организационно-технологической эффективности реализуемой системы управления запасами — это уровень сервиса, описывающий вероятность того, что спрос на определенный вид материального ресурса в течение интервала поставки будет удовлетворен исключительно за счет наличного запаса.

7. Основным показателем экономической эффективности реализуемой системы управления запасами — суммарные затраты, связанные как с хранением запасов материальных ресурсов, так и с их дефицитом на складе.

8. Затраты на хранение запасов каждой отдельной номенклатурной позиции материальных ресурсов определяются значением математического ожидания случайной величины остаточного объема запаса за интервал поставки.

9. Потери от дефицита каждого вида материального ресурса определяются значением математического ожидания случайной величины объема запаса, формируемого за интервал поставки.

10. Объем складского пространства, выделенный для запасов каждого отдельного вида груза, не может использоваться для хранения других номенклатурных позиций.

11. Необходимо определить оптимальные значения управляемых характеристик системы управления запасами на основе соответствующих показателей организационно-технологической и экономической эффективности.

Исходные данные и неизвестные переменные разработанной оптимизационной модели представлены в табл. 1. В качестве неизвестных переменных данной оптимизационной модели рассматривается вероятность отсутствия дефицита, учитываемая для каждой отдельной номенклатурной позиции, однозначно определяющая основные параметры модели управления запасом, на которых базируются показатели организационно-технологической и экономической эффективности применяемой модели.



**Таблица 1. Исходные данные и неизвестные переменные оптимизационной модели**  
**Table 1. Input data and unknown variables of the optimization model**

| № п.п. | Наименование элемента исходных данных  | Ед. изм.   | Обозначение / выражение       |
|--------|--|--|-------------------------------|
| 1      | 2  | 3  | 4                             |
| 1      | Исходные данные  |  |                               |
| 1.1    | Агрегированные исходные данные   |  |                               |
| 1.1.1  | Количество видов материального ресурса   | ед.  | $n$                           |
| 1.1.2  | Максимальный интервал времени поставки материального ресурса на склад <sup>(1)</sup>                                     | ед. <sup>(2)</sup>                                       | $T_{s \max}$                  |
| 1.1.3  | Длительность учетного временного периода   | ед. <sup>(2)</sup>                                       | $T$                           |
| 1.1.4  | Фактическая резервируемая емкость складского объекта   | м <sup>3</sup>   | $H'_{\max \text{ lim}}$       |
| 1.2    | Индексы  |  |                               |
| 1.2.1  | Индекс вида материального ресурса  | —  | $j = 1, 2, \dots, n$          |
| 1.2.2  | Индекс, определяющий количество суток до момента поставки  | —  | $k = 0, 1, \dots, T_s^{\max}$ |
| 1.3    | Исходные данные, задаваемые для каждого вида материального ресурса с индексом $j(j = 1, 2, \dots, n)$                    |  |                               |
| 1.3.1  | Наименование вида материального ресурса  | —  | —                             |
| 1.3.2  | Объем, занимаемый единицей объема потребления  | м <sup>3</sup> /ЕИ <sub><i>j</i></sub> <sup>(3)</sup>    | $v_j$                         |
| 1.3.3  | Параметр вероятностного распределения случайной величины суточного объема потребления                                    | Математическое ожидание                                  | $EИ_j^{(3)}$<br>$M_{0j}$      |
| 1.3.4  |  | Среднеквадратическое отклонение                          | $EИ_j^{(3)}$<br>$\sigma_{0j}$ |
| 1.3.5  | Объем партии поставки <sup>(4)</sup>   | $EИ_j^{(3)}$   | $S_j$                         |
| 1.3.6  | Ритм поставки <sup>(5)</sup>   | ед. <sup>(2)</sup>                                       | $R_j$                         |
| 1.3.7  | Длительность поставки партии материального ресурса   | ед. <sup>(2)</sup>                                       | $T_{sj}$                      |
| 1.3.8  | Суточные затраты на хранение единицы объема потребления  | д.е./<br>(ЕИ <sub><i>j</i></sub> ·ед.) <sup>(2)(3)</sup> | $c_{hj}$                      |
| 1.3.9  | Суточные потери от дефицита единицы объема потребления   | д.е./<br>(ЕИ <sub><i>j</i></sub> ·ед.) <sup>(2)(3)</sup> | $c_{dj}$                      |
| 1.3.10 | Минимальное значение вероятности покрытия спроса (уровня сервиса)  | —  | $U_{\min j}$                  |
| 1.3.11 | Вероятность отсутствия переполнения резерва складского объекта   | —  | $P_{cj}$                      |
| 1.3.12 | Предельное значение вероятности отсутствия дефицита  | Минимальное значение                                     | $P_{\min j}$<br>$P_{\min j}$  |
| 1.3.13 |  | Максимальное значение                                    | $P_{\max j}$<br>$P_{\max j}$  |
| 2      | Неизвестные переменные   |  |                               |
| 2.1    | Неизвестные переменные, учитываемые для каждого отдельного вида материального ресурса с индексом $j(j = 1, 2, \dots, n)$ |  |                               |
| 2.1.1  | Фактическое значение вероятности отсутствия дефицита   | —  | $P_{0j}$                      |

Примечания: <sup>(1)</sup> Значение элемента исходных данных должно удовлетворять условию:

– в случае реализации модели управления запасами с фиксированной партией поставки  $T_{s \max} \geq \max_j \{T_{sj}\}$ ;

– в случае реализации модели управления запасами с фиксированным ритмом поставки  $T_{s \max} \geq \max_j \{T_{sj} + R_j\}$ .

Описание компонент вышеуказанных выражений приведено в п. 1.3.6, 1.3.7 таблицы.

<sup>(2)</sup> Обозначение «ед.» определяет элементарный временной интервал – сутки.

<sup>(3)</sup> Обозначение «ЕИ<sub>*j*</sub>» определяет уникальную для каждого вида материального ресурса (с индексом  $j$ ) единицу измерения, зависящую от его конфигурации (для штучного или тарно-штучного ресурса – ед.; для навалочного ресурса – м<sup>3</sup> или т; и т.д.).

Таблица 2. Расчетные характеристики оптимизационной модели  
 Table 2. Calculated characteristics of the optimization model

| № п.п. | Наименование элемента исходных данных   |  | Ед. изм.     | Обозначение / выражение   |
|--------|---|--|--------------|---|
| 1      | 2   |  | 3            | 4   |
| 1      | Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого отдельного вида материального ресурса с индексом $j(j = 1, 2, \dots, n)$ и каждого альтернативного значения количества суток до момента поставки $k(k = 0, 1, \dots, T_{s \max})$ |  |              |   |
| 1.1    | Значение вероятности отсутствия дефицита <sup>(1)</sup>   | Для модели с фиксированной партией поставки <sup>(2)</sup> | —            | $P_{jk} = \begin{cases} \Phi \left( \frac{H_{\text{top } j} - M_{0j} \cdot (T_{sj} - k)}{\sigma_{0j} \cdot \sqrt{T_{sj} - k}} \right), & k < T_{sj}; \\ \text{null}, & k \geq T_{sj} \end{cases}$   |
| 1.2    |   | Для модели с фиксированным ритмом поставки <sup>(2)</sup>  | —            | $P_{jk} = \begin{cases} \Phi \left( \frac{H_{0\text{max } j} - M_{0j} \cdot (T_{sj} + R_j - k)}{\sigma_{0j} \cdot \sqrt{T_{sj} + R_j - k}} \right), & k < T_{sj} + R_j; \\ \text{null}, & k \geq T_{sj} + R_j \end{cases}$  |
| 2      | Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого отдельного вида материального ресурса с индексом $j(j = 1, 2, \dots, n)$  |  |              |   |
| 2.1    | Расчетная точка заказа <sup>(3)(4)</sup>  |  | $EI_j^{(5)}$ | $H_{\text{top } j} = \Phi'(P_{0j}) \cdot \sigma_{0j} \cdot \sqrt{T_{sj}} + M_{0j} \cdot T_{sj}$   |
| 2.2    | Условный максимальный объем запаса <sup>(4)(6)</sup>  |  | $EI_j^{(5)}$ | $H_{0\text{max } j} = \Phi'(P_{0j}) \cdot \sigma_{0j} \cdot \sqrt{T_{sj} + R_j} + M_{0j} \cdot (T_{sj} + R_j)$  |
| 2.3    | Расчетная резервируемая емкость склада, выражаемая в единицах материального ресурса   | Для модели с фиксированной партией поставки                | $EI_j^{(5)}$ | $H_{\text{max } j} = H_{\text{top } j} + S_j - M_{0j} \cdot T_{sj} - \Phi'(1 - P_{cj}) \cdot \sigma_{0j} \cdot \sqrt{T_{sj}}$   |
| 2.4    |   | Для модели с фиксированным ритмом поставки                 | $EI_j^{(5)}$ | $H_{\text{max } j} = H_{0\text{max } j} - M_{0j} \cdot T_{sj} - \Phi'(1 - P_{cj}) \cdot \sigma_{0j} \cdot \sqrt{T_{sj}}$  |
| 2.5    | Расчетная резервируемая емкость складского объекта, выражаемая в объеме пространства  |  | $M^3$        | $H'_{\text{max } j} = H_{\text{max } j} \cdot v_j$  |
| 2.6    | Математическое ожидание длительности периода дефицита   | Для модели с фиксированной партией поставки                | ед.          | $\bar{T}_{dj} = T_{sj} - \sum_{k=0}^{T_{sj}-1} P_{kj}$  |
| 2.7    |   | Для модели с фиксированным ритмом поставки                 | ед.          | $\bar{T}_{dj} = T_{sj} + R_j - \sum_{k=0}^{T_{sj}+R_j-1} P_{kj}$  |
| 2.8    | Математическое ожидание объема дефицита   |  | $EI_j^{(5)}$ | $\bar{D}_j = M_{0j} \cdot \bar{T}_{dj}$   |
| 2.9    | Математическое ожидание объема остаточного запаса <sup>(7)</sup>  | Для модели с фиксированной партией поставки                | $EI_j^{(5)}$ | $\bar{H}_{\text{rem } j} = (H_{\text{top } j} - M_{0j} \cdot T_{sj}) \cdot P_{0j} + \frac{(H_{\text{top } j} - M_{0j} \cdot T_{sj})^2}{2(\sigma_{0j} \cdot \sqrt{T_{sj}})^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}} \cdot \sigma_{0j} \cdot \sqrt{T_{sj}}$                               |
| 2.10   |   | Для модели с фиксированным ритмом поставки                 | $EI_j^{(5)}$ | $\bar{H}_{\text{rem } j} = (H_{0\text{max } j} - M_{0j} \cdot (T_{sj} + R_j)) \cdot P_{0j} + \frac{(H_{0\text{max } j} - M_{0j} \cdot (T_{sj} + R_j))^2}{2(\sigma_{0j} \cdot \sqrt{T_{sj} + R_j})^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}} \cdot \sigma_{0j} \cdot \sqrt{T_{sj} + R_j}$ |

Окончание таблицы 2

| № п.п. | Наименование элемента исходных данных   |   | Ед. изм.       | Обозначение / выражение   |
|--------|---|---|----------------|---|
| 2.11   | Фактическое значение вероятности покрытия спроса (уровня сервиса)                           | Для модели с фиксированной партией поставки | —              | $U_j = 1 - \frac{\bar{D}_j}{S_j}$                                 |
| 2.12   |   | Для модели с фиксированным ритмом поставки  | —              | $U_j = 1 - \frac{\bar{T}_{dj}}{T_{sj} + R_j}$                     |
| 2.13   | Ожидаемые затраты на хранение материальных ресурсов за интервал поставки                    | Для модели с фиксированной партией поставки | д.е./ед.       | $C_{hj} = c_{hj} \cdot T_{sj} \cdot \bar{H}_{remj}$               |
| 2.14   |   | Для модели с фиксированным ритмом поставки  | д.е./ед.       | $C_{hj} = c_{hj} \cdot (T_{sj} + R_j) \cdot \bar{H}_{remj}$       |
| 2.15   | Ожидаемые потери от дефицита грузов за интервал поставки                                    |   | д.е./ед.       | $C_{dj} = c_{dj} \cdot \bar{T}_{dj} \cdot \bar{D}_j$              |
| 2.16   | Расчетное количество интервалов поставки в рамках учетного периода                          | Для модели с фиксированной партией поставки | ед.            | $L_j = \frac{T}{T_{sj}}$  |
| 2.17   |   | Для модели с фиксированным ритмом поставки  | ед.            | $L_j = \frac{T}{T_{sj} + R_j}$                                    |
| 3      | Агрегированные расчетные характеристики   |   |                |   |
| 3.1    | Расчетная резервируемая емкость складского объекта  |   | м <sup>3</sup> | $H'_{max} = \sum_{j=1}^n H'_{maxj}$                               |
| 3.2    | Суммарные затраты, связанные с хранением материальных ресурсов, в рамках интервала поставки |   | д.е.           | $C_{0h} = \sum_{j=1}^n C_{hj}$                                    |
| 3.3    | Суммарные затраты, связанные с дефицитом материальных ресурсов, в рамках интервала поставки |   | д.е.           | $C_{0d} = \sum_{j=1}^n C_{dj}$                                    |
| 3.4    | Общие суммарные затраты в рамках интервала поставки   |   | д.е.           | $C_{0\Sigma} = C_{0h} + C_{0d} = \sum_{j=1}^n (C_{hj} + C_{dj})$  |
| 3.5    | Суммарные затраты, связанные с хранением материальных ресурсов, в рамках учетного периода   |   | д.е.           | $C_h = \sum_{j=1}^n C_{hj} \cdot L_j$                             |
| 3.6    | Суммарные затраты, связанные с дефицитом материальных ресурсов, в рамках учетного периода   |   | д.е.           | $C_d = \sum_{j=1}^n C_{dj} \cdot L_j$                             |
| 3.7    | Общие суммарные затраты в рамках учетного периода   |   | д.е.           | $C_\Sigma = C_h + C_d = \sum_{j=1}^n (C_{hj} + C_{dj}) \cdot L_j$ |

Примечания:

(1) Вычисление расчетных характеристик производится после расчета характеристик п. 2.1 и 2.2 таблицы – в случае реализации модели управления запасами с фиксированной партией и с фиксированным ритмом поставки материальных ресурсов соответственно.

(2) Компонент  $\Phi(\dots)$  в составе соответствующего математического выражения определяет вычисление значения функции распределения – вероятности того, что случайная величина не превысит заданное значение, – на основе заданного нормированного отклонения от математического ожидания случайной величины (вычисление производится с использованием функции Лапласа).

(3) Вычисление расчетной характеристики производится только в случае реализации модели управления запасами с фиксированной партией поставки материальных ресурсов.

(4) Компонент  $\Phi'(\dots)$  в составе соответствующего математического выражения определяет вычисление аргумента функции распределения – нормированного отклонения от математического ожидания случайной величины – на основе заданной вероятности того, что случайная величина не превысит заданное значение (вычисление производится с использованием функции Лапласа).

(5) Обозначение « $EI_j$ » определяет уникальную для каждого вида материального ресурса (с индексом  $j$ ) единицу измерения, зависящую от его конфигурации (для штучного или тарно-штучного материального ресурса – ед.; для навалочного материального ресурса – м<sup>3</sup> или т; и т.д.).

(6) Вычисление расчетной характеристики производится только в случае реализации модели управления запасами с фиксированным ритмом поставки материальных ресурсов.

(7) Математическое выражение для расчетной характеристики сформировано на основе положения о том, что случайная величина объема страхового запаса с вероятностью  $1 - P_{0j}$  принимает нулевое значение, а с вероятностью  $P_{0j}$  – значение, соответствующее усеченному нормальному вероятностному распределению со следующими параметрами: математическое ожидание  $\eta_j - M_{0j} \cdot \tau_j$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{0j} \cdot \sqrt{\tau_j}$ , нижнее граничное значение случайной величины  $\alpha_j = 0$ , верхнее граничное значение случайной величины  $\beta_j = +\infty^3$ ; при этом исходное выражение для математического ожидания вышеупомянутого усеченного нормального вероятностного распределения будет иметь вид:

$$H_{remj} = 0(1 - P_{0j}) + \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\alpha_j - (\eta_j - M_{0j} \cdot \tau_j))^2}{2(\sigma_{0j} \cdot \sqrt{\tau_j})^2}} - \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\beta_j - (\eta_j - M_{0j} \cdot \tau_j))^2}{2(\sigma_{0j} \cdot \sqrt{\tau_j})^2}} + (\eta_j - M_{0j} \cdot \tau_j) \cdot \frac{\tilde{\Phi}\left(\frac{\beta_j - (\eta_j - M_{0j} \cdot \tau_j)}{\sigma_{0j} \cdot \sqrt{\tau_j}}\right) - \tilde{\Phi}\left(\frac{\alpha_j - (\eta_j - M_{0j} \cdot \tau_j)}{\sigma_{0j} \cdot \sqrt{\tau_j}}\right)}{\sigma_{0j} \cdot \sqrt{\tau_j}}$$

где  $\tilde{\Phi}(\dots)$  – функция стандартного нормального распределения (функция Лапласа);  $\eta_j, \tau_j$  – элементы параметров усеченного нормального распределения. В случае реализации модели управления запасами с фиксированной партией поставки  $\eta_j = H_{ropj}$ ;  $\tau_j = T_{sj}$ . В случае реализации модели управления запасами с фиксированным ритмом поставки  $\eta_j = H_{0maxj}$ ;  $\tau_j = T_{sj} + R_j$ . Описание компонент вышеприведенного выражения представлено в п. 1.3.3, 1.3.4, 1.3.6, 1.3.7, 2.1.1 табл. 1, а также в п. 2.1, 2.2 данной таблицы.

Структура оптимизационной модели определяется следующими выражениями [31]:

– в обобщенном виде:

$$\left\{ C_{\Sigma}(\{P_{0j}\}) \rightarrow \min; \right. \tag{1}$$

$$\left. P_{0minj} \leq P_{0j} \leq P_{0maxj}, j = 1, 2, \dots, n; \right. \tag{2}$$

$$\left. U_j(P_{0j}) \geq U_{minj}, j = 1, 2, \dots, n; \right. \tag{3}$$

$$\left. H'_{max}(\{P_{0j}\}) \leq H'_{maxlim}; \right. \tag{4}$$

– в развернутом виде:

$$\left\{ \sum_{j=1}^n (C_{hj} + C_{dj}) \cdot L_j(P_{0j}) \rightarrow \min; \right. \tag{5}$$

$$\left. P_{0minj} \leq P_{0j} \leq P_{0maxj}, j = 1, 2, \dots, n; \right. \tag{6}$$

$$\left. U_j(P_{0j}) \geq U_{minj}, j = 1, 2, \dots, n; \right. \tag{7}$$

$$\left. \sum_{j=1}^n H'_{maxj}(P_{0j}) \leq H'_{maxlim}. \right. \tag{8}$$

<sup>3</sup> Макаров В.М. (2007) *Логистика. Управление запасами в логистических системах*, учебное пособие, 3-е изд., стер., СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 98. DOI: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/si20-1197>



Особенностью разработанной модели является ее нелинейная математическая структура, обусловленная необходимостью описания вероятностных зависимостей, а также ограничений по уровню сервиса и условий дефицита запаса или переполнения емкости складского объекта, определяющая целесообразность использования алгоритмов нелинейной оптимизации, доступных в современных программных средах оптимизационного моделирования. Наиболее эффективные алгоритмы для реализации модели базируются на методе обобщенного понижающего градиента, демонстрирующем высокие показатели точности и сходимости в отношении наличия гладких (дифференцируемых) функций, а также на методах эволюционного развития – стохастических методах глобального поиска, эффективных для многомерных задач со сложной структурой ограничений и множественными локальными экстремумами.

### Результаты и обсуждение

Разработанная оптимизационная модель была реализована на практическом примере – для решения задачи обоснования характеристик системы управления запасами материальных ресурсов, используемых в деятельности предприятий строительной отрасли, – как для случая реализации модели управления запасами с фиксированной партией поставки, так и для случая реализации модели с фиксированным ритмом поставки. Построение оптимизационной модели производилось с использованием Microsoft Excel, реализация модели осуществлялась с использованием генетического алгоритма, доступного в надстройке «Поиск решения».

Исходные данные и соответствующие им результаты реализации оптимизационной модели представлены в табл. 3. Длительность учетного периода составляла  $T = 30$  ед., максимальный интервал времени поставки грузов на склад –  $T_{s \max} = 10$  ед. Резервируемая емкость складского объекта была принята равной  $H'_{\max \lim} = 1400$  м<sup>3</sup>. Одна денежная единица (д.е.) принималась равной 100 руб.

Помимо выполнения базового вычислительного эксперимента (с использованием значений исходных данных, указанных в табл. 3) с применением оптимизационной модели была выполнена процедура анализа чувствительности значения целевой функции – общих суммарных затрат (п. 3.7 табл. 2) – в оптимальном решении к изменению комбинации значений математического ожидания случайной величины суточного объема потребления (п. 1.3.3 табл. 1). В дополнение к комбинации значений вышеупомянутого элемента исходных данных (далее – базовой комбинации), указанной в табл. 3, были рассмотрены восемь альтернативных комбинаций, для которых значение математического ожидания суточного объема потребления для каждого вида материального ресурса было изменено на  $-30\%$ ,  $-20\%$ ,  $-10\%$ ,  $+10\%$ ,  $+20\%$ ,  $+30\%$ ,  $+40\%$ ,  $+50\%$  от соответствующего значения в составе базовой комбинации. Результаты выполнения процедуры анализа чувствительности представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2а, общие суммарные затраты для модели с фиксированной партией поставки возрастают при увеличении значений математического ожидания суточного объема потребления. При этом для модели с фиксированным ритмом поставки (рис. 2б) при увеличении значений математического ожидания суточного объема потребления значения суммарных затрат снижаются в интервале от минимальных значений до значений базовой комбинации, после чего монотонно возрастают.

Ввиду того, что интенсивность возрастания общих суммарных затрат в оптимальном решении для случая реализации модели с фиксированным ритмом поставки затраты происходит с меньшей интенсивностью в сравнении со случаем реализации модели с фиксированным ритмом поставки, можно сделать вывод, что модель управления запасами с фиксированным ритмом поставки является более предпочтительной для рассматриваемого складского объекта.

Таблица 3. Исходные данные и результаты реализации оптимизационной модели на практическом примере  
 Table 3. Input data and results of the optimization model's implementation on a practical case

| Индекс вида материального ресурса | Наименование вида груза                                 | Единица измерения объема потребления | Объем, занимаемый единицей объема потребления | Параметры вероятностного распределения случайного объема потребления |                      | Объем партии поставки | Ритм поставки | Длительность поставки партии ресурса | Случайные затраты на хранение (ЕИ/ед.) | Случайные потери от дефицита (ЕИ/ед.) | Миним. вероятность покрытия спроса (уровень сервиса) | Вероятность отсутствия пополнения резерва склада | Вероятности отсутствия дефицита для модели |                |
|-----------------------------------|---|--------------------------------------|---|--|----------------------|-----------------------|---------------|--------------------------------------|--|---------------------------------------|--|--|--|----------------|
|                                   |   |                                      |   | Матем. ожидание  | Среднекв. отклонение |                       |               |                                      |  |                                       |  |  | Фикс. партия                               | Фикс. ритм     |
| $j$                               | —   | $ЕИ_j$                               | $v_j$   | $M_{0j}$   | $s_{0j}$             | $S_j$                 | $R_j$         | $T_{sj}$                             | $c_{hj}$                               | $c_{dj}$                              | $U_{min,j}$  | $P_{ej}$   | $P_{0j}^{opt}$                             | $P_{0j}^{opt}$ |
| —                                 | —   | —                                    | м <sup>3</sup> /ЕИ <sub>j</sub>               | ЕИ/ед.   | ЕИ/ед.               | ЕИ <sub>j</sub>       | ед.           | ед.                                  | д.е./ (ЕИ/ед.)                         | д.е./ (ЕИ/ед.)                        | —  | —  | —  | —              |
| 1                                 | Цементно-песчаная смесь Клауф (паллет 1200×1000×450 мм) | ед.                                  | 16,65   | 27,75  | 5,63                 | 115                   | 7             | 4                                    | 3,43                                   | 2,56                                  | 0,8  | 0,903  | 0,4021                                     | 0,3650         |
| 2                                 | Утеплитель ТЕХНОНИКОЛЬ (рулоны 1800×500×500 мм)         | ед.                                  | 5,634   | 9,39   | 1,39                 | 43                    | 10            | 5                                    | 7,6                                    | 7,85                                  | 0,8  | 0,977  | 0,4110                                     | 0,3649         |
| 3                                 | Керамогранит (паллет 1200×1000×400 мм)                  | ед.                                  | 13,254  | 22,09  | 2,7                  | 136                   | 13            | 6                                    | 7                                      | 4,85                                  | 0,8  | 0,936  | 0,3820                                     | 0,3521         |
| 4                                 | Металлопрофиль (связка 2700×250×250 мм)                 | ед.                                  | 4,374   | 7,29   | 2,15                 | 43                    | 9             | 4                                    | 3,64                                   | 6,51                                  | 0,8  | 0,999  | 0,4685                                     | 0,3960         |
| 5                                 | Пополочные панели (паллет 1200×1000×1500 мм)            | ед.                                  | 13,02   | 21,7   | 2,59                 | 103                   | 6             | 4                                    | 5,67                                   | 3,08                                  | 0,8  | 0,95   | 0,3967                                     | 0,3602         |
| 6                                 | Плиточный клей Bergauf Granit (паллет 1200×800×400 мм)  | ед.                                  | 14,718  | 24,53  | 7,05                 | 132                   | 12            | 7                                    | 7,39                                   | 2,44                                  | 0,8  | 0,963  | 0,3588                                     | 0,3464         |
| 7                                 | Штукатурка Xêber Vêtonit (паллет 1200×800×450 мм)       | ед.                                  | 5,556   | 9,26   | 1,31                 | 38                    | 9             | 5                                    | 2,13                                   | 4,71                                  | 0,8  | 0,974  | 0,4791                                     | 0,3968         |
| 8                                 | Стеклопанели в сборе (паллет 2200×2000×500 мм)          | ед.                                  | 2,562   | 4,27   | 0,5                  | 30                    | 11            | 6                                    | 5,8                                    | 8,65                                  | 0,8  | 0,953  | 0,4299                                     | 0,3720         |
| 9                                 | Мебельная фурнитура (паллет 1200×800×1000 мм)           | ед.                                  | 10,488  | 17,48  | 4,06                 | 61                    | 8             | 4                                    | 9,53                                   | 9,89                                  | 0,8  | 0,955  | 0,4235                                     | 0,3734         |
| 10                                | Плинтус половой (связка 2000×400×400 мм)                | ед.                                  | 15,984  | 26,64  | 7,99                 | 184                   | 14            | 8                                    | 8,56                                   | 5,13                                  | 0,8  | 0,962  | 0,3719                                     | 0,3523         |

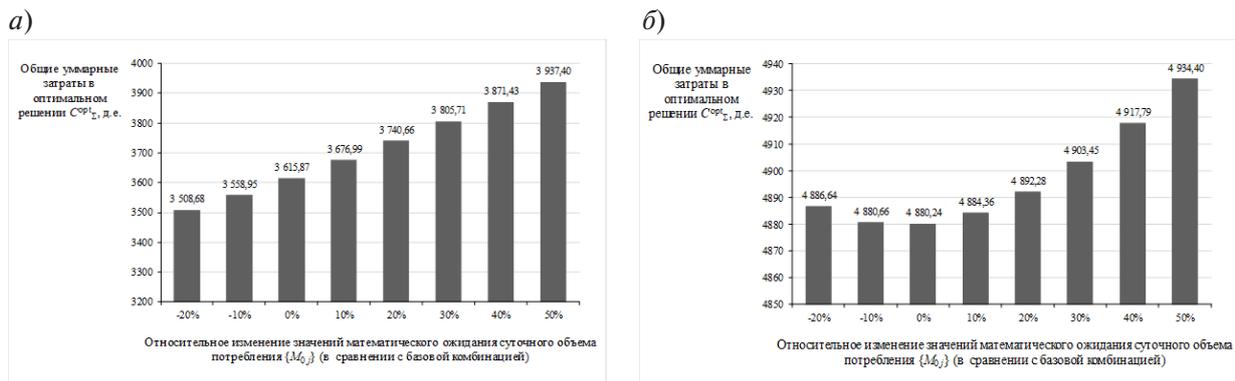


Рис. 2. Зависимость общих суммарных затрат от относительного изменения значений математического ожидания суточного объема потребления для случая реализации модели управления запасами:

а) с фиксированной партией поставки; б) с фиксированным ритмом поставки

Fig. 2. Dependence of total aggregate costs on the relative change in the values of the mean value for the daily consumption volume in the case of implementing the inventory management model: a) with a fixed delivery batch; b) with a fixed delivery rhythm

## Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

- выполнен обзор и анализ научных трудов, посвященных обоснованию характеристик системы управления запасами материальных ресурсов в рамках промышленных предприятий; определены недостатки существующих научных разработок, обуславливающие относительно невысокую практическую значимость результатов решения вышеописанной задачи;
- разработана оптимизационная модель обоснования характеристик системы управления запасами материальных ресурсов с учетом следующих категорий рисков: риска возникновения дефицита одной или нескольких номенклатурных позиций запасов материальных ресурсов; риска превышения максимально допустимого уровня запаса материальных ресурсов для одной или нескольких номенклатурных позиций;
- произведена реализация разработанной оптимизационной модели на практическом примере; полученные результаты подтвердили высокую прикладную ценность разработанного инструментального средства.

### Направления дальнейших исследований

На дальнейших этапах исследования предполагается модификация разработанной оптимизационной модели для случая соответствия случайной величины суточного объема потребления каждого вида материального ресурса, хранимого в рамках складского объекта, альтернативному (отличному от нормального) закону вероятностного распределения, а также выполнение сравнительного анализа альтернативных вычислительных алгоритмов для реализации оптимизационной модели с точки зрения показателей сходимости и точности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хоботов Е.Н., Аверьянова Е.Е. (2023) Задачи и методы управления запасами в иерархической системе складов. *Автоматика и телемеханика*, 12, 64–79. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0005231023120061>
2. Бром А.Е., Сидельников И.Д. (2018) Оптимизация многономенклатурного запаса в системах материально-технического обеспечения машиностроительной продукции гражданского назначения. *Современные наукоемкие технологии*, 3, 19–24.

3. Волокитина В.М., Гедич Т.Г. (2015) Обоснование модели управления запасами материально-технических ресурсов на угледобывающем предприятии. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 11 (106), 176–180.
4. Дятлова В.О., Сыройжко В.В. (2021) Модели и методы управления запасами предприятия. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*, 3–1 (54), 40–42. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-3-1-40-42>
5. Валитов Ш.М. (2005) Модели управления запасами промышленного предприятия. *Вестник Казанского государственного финансово-экономического института*, 1 (1), 36–40.
6. Языков М.С. (2008) Анализ моделей и методов управления запасами. *Экономический вестник Ростовского государственного университета*, 6 (4–4), 75–80.
7. Николаева Ю.Д., Давидян Н.А., Агаджанова К.Э. (2017) Модели управления запасами. *Синтез науки и общества в решении глобальных проблем современности*, 1, 159–161.
8. Заруднев Д.И., Болтенко Ю.А. (2013) Оценка эффективности функционирования моделей управления запасами в условиях неопределенности. *Формирование транспортно-логистической инфраструктуры. Стратегическое направление повышения конкурентоспособности транспортного комплекса России*, 25–33.
9. Буренок К.Н. (2020) Совершенствование системы управления запасами строительных компаний. *Актуальные теоретические и прикладные вопросы управления социально-экономическими системами*, 1, 101–105.
10. Кузубов А.А. (2017) Особенности системы управление запасами в логистической системе предприятия. *АНИ: экономика и управление*, 6 (4 (21)), 137–140.
11. Скворода Е.В. (2017) Методический подход к проектированию стратегии управления производственными запасами на промышленных предприятиях. *Труды БГТУ. Серия 5: Экономика и управление*, 2 (202), 104–108.
12. Бородавко Р.Ю. (2018) К вопросу о совершенствовании процессов складской логистики на предприятии. *Форум молодых ученых*, 12 (28), 639–643.
13. Капустин Е.В., Шкуркин А.С. (2019) Оптимизация параметров стохастической модели управления запасами. *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*, 46, 56–63. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988605/46/7>
14. Прокофьева О.С., Юшук Я.В. (2017) Оптимизационная модель управления материальными запасами на производственном предприятии. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 21 (7), 158–163. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-158-163>
15. Пацула О.В. (2018) Динамическое программирование в нелинейных моделях управления материально-производственными запасами предприятия. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*, 9, 175–179. DOI: <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2018-10038>
16. Белоусова Е.П. (2022) Оптимальное управление дискретным распределением запасов. *Регион: системы, экономика, управление*, 3 (58), 147–153. DOI: <https://doi.org/10.22394/1997-4469-2022-58-3-147-153>
17. Silver E.A., Pyke D.F., Peterson R. (1998) *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley.
18. Мандель А.С. (2011) Управление многономенклатурными запасами в условиях неопределенности и нестационарности. Ч. I. Нормативная модель. *Проблемы управления*, 6, 47–51.
19. Мандель А.С. (2012) Управление многономенклатурными запасами в условиях неопределенности и нестационарности. Ч. II. Создание страховых запасов. *Проблемы управления*, 1, 42–46.
20. Радаев А.Е., Левенцов В.А., Кобзев В.В. (2017) Оптимизационные модели обоснования характеристик системы управления многономенклатурными запасами на промышленном предприятии. *Логистика и управление цепями поставок*, 3 (80), 4–20.
21. Свиридова О.А. (2011) Детерминированная и стохастическая модели минимизации издержек в системах управления запасами. *Логистика*, 4, 28–30.
22. Косоруков О.А., Свиридова О.А. (2012) Учет неопределенности спроса при оптимизации системы управления запасами. *Логистика*, 6, 12–13.
23. Rossi R., Prestwich S., Tarım Ş.A., Hnich B. (2007) Replenishment Planning for Stochastic Inventory Systems with Shortage Cost. In: *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems* (eds. P. Van Hentenryck, L. Wolsey), 4510, 229–243. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-72397-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72397-4_17)



24. Косоруков О.А., Свиридова О.А. (2012). Стохастическая непрерывная модель управления запасами. *Вестник РЭУ*, 4, 91–95.
25. Домбровский В.В., Чаусова Е.В. (2000) Математическая модель управления запасами при случайном сезонном спросе и ненадежных поставщиках. *Вестник Томского государственного университета*, 271, 141–146.
26. Карлова М.Ю. (2011) Разработка обобщенной математической модели управления материальными запасами. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 7 (3), 89–91.
27. Казаков А.Л., Лемперт А.А., Бао Т.Ф. (2012) Математическая модель управления запасами (поставками) с учетом запаздывания. *Вестник ИрГТУ*, 4 (63), 131–137.
28. Грылева И.В. (2014) Условия применения статических детерминированных и вероятностных математических моделей управления запасами. *Мир науки*, 4, art. no. 28EMN414.
29. Гасратов М.Г. (2007) Математическая модель управления материальными запасами в случае ценовой конкуренции. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*, 3, 9–17.
30. Доможирова И.В. (2013) Использование экономико-математических моделей в управлении товарными запасами организации. *Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки*, 2–1, 165–171.
31. Булатникова П.А., Радаев А.Е. (2024) Инструментальные средства обоснования характеристик системы управления запасами строительных материалов с учетом различных категорий рисков. *Неделя науки ИСИ*, 2, 142–144.

## REFERENCES

1. Khobotov E.N., Aver'yanova E.E. (2023) Zadachi i metody upravleniya zapasami v ierarkhicheskoy sisteme skladov [Tasks and methods of inventory management in a hierarchical warehouse system]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemetry]*, 12, 64–79. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0005231023120061>
2. Brom A.E., Sidelnikov I.D. (2018) Optimization of multinomenclature stock in the systems of material and technical support of civil engineering machinery. *Modern high technologies*, 3, 19–24.
3. Volokitina V.M., Gedich T.G. (2015) Justification of material and technical resources management model at a coal mining enterprise. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 11 (106), 176–180.
4. Dyatlova V.O., Syroizhko V.V. (2021) Models and methods of enterprise inventory management. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 3–1 (54), 40–42. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-3-1-40-42>
5. Valitov Sh.M. (2005) Modeli upravleniia zapasami promyshlennogo predpriiatiia [Models of inventory management of industrial enterprise]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo finansovo-ekonomicheskogo instituta [Bulletin of Kazan State Financial and Economic Institute]*, 1 (1), 36–40.
6. Iazykov M.S. (2008) Analiz modelei i metodov upravleniia zapasami [Analysis of inventory management models and methods]. *Ekonomicheskii vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta [Economic Bulletin of Rostov State University]*, 6 (4–4), 75–80.
7. Nikolaeva Iu.D., Davidian N.A., Agadzhanova K.E. (2017) Modeli upravleniia zapasami [Inventory Management Models]. *Sintez nauki i obshchestva v reshenii global'nykh problem sovremennosti [Synthesis of science and society in solving global problems of our time]*, 1, 159–161.
8. Zarudnev D.I., Boltenko I.U.A. (2013) Otsenka effektivnosti funktsionirovaniia modelei upravleniia zapasami v usloviakh neopredelennosti [Evaluation of the efficiency of inventory management models under uncertainty]. *Formirovanie transportno-logisticheskoi infrastruktury. Strategicheskoe napravlenie povysheniia konkurentosposobnosti transportnogo kompleksa Rossii [Formation of transport and logistics infrastructure. Strategic direction for increasing the competitiveness of the transport complex of Russia]*, 25–33.
9. Burenok K.N. (2020) Improvement of the inventory management system of construction companies. *Aktual'nye teoreticheskie i prikladnye voprosy upravleniia sotsial'no-ekonomicheskimi sistemami [Current theoretical and applied issues of management of socio-economic systems]*, 1, 101–105.

10. Kuzubov A.A. (2017) System features inventory management in the logistics system business. *ASR: Economics and Management*, 6 (4 (21)), 137–140.
11. Skvoroda E.V. (2017) Methodical approach to designing the management strategy for manufacturing reserves in industrial enterprises. *Proceedings of BSTU. Issue 5: Economics and Management*, 2 (202), 104–108.
12. Borodavko R.Yu. (2018) To the question about perfection of the processes of warehouse logistics at the enterprise. *Forum molodykh uchenykh [Forum of young scientists]*, 12 (28), 639–643.
13. Kapustin E.V., Shkurkin A.S. (2019) Optimizatsiia parametrov stokhasticheskoi modeli upravleniia zapasami [Optimization of parameters of a stochastic inventory management model]. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 46, 56–63. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988605/46/7>
14. Prokofieva O.S., Yushchuk Ya.V. (2017) Optimization model of inventory management at an industrial enterprise. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 21 (7), 158–163. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-158-163>
15. Patsula O.V. (2018) Dynamic programming in nonlinear models of managing material production reserves. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 9, 175–179. DOI: <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2018-10038>
16. Belousova E.P. (2022) Optimal management of discrete inventory allocation. *Region: Systems, Economics, Management*, 3 (58), 147–153. DOI: <https://doi.org/10.22394/1997-4469-2022-58-3-147-153>
17. Silver E.A., Pyke D.F., Peterson R. (1998) *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley.
18. Mandel A.S. (2011) Multi-product (item) stock control in the context of uncertainty and nonstationarity. Part I: Deterministic model. *Problemy Upravleniya*, 6, 47–51.
19. Mandel A.S. (2012) Multi-product (item) stock control in the context of uncertainty and nonstationarity. Part II: Safety stock control. *Problemy Upravleniya*, 1, 42–46.
20. Radaev A.E., Leventsov V.A., Kobzev V.V. (2017) Optimization models for determination of characteristics for multi-item inventory control system within industrial enterprise. *Logistics and Supply Chain Management*, 3 (80), 4–20.
21. Sviridova O.A. (2011) Determinirovannaia i stokhasticheskaia modeli minimizatsii izderzhkek v sistemakh upravleniia zapasami [Deterministic and stochastic models of cost minimization in inventory management systems]. *Logistika [Logistics]*, 4, 28–30.
22. Kosorukov O.A., Sviridova O.A. (2012) Uchet neopredelennosti sprosa pri optimizatsii sistemy upravleniia zapasami [Taking into account demand uncertainty when optimizing inventory management systems]. *Logistika [Logistics]*, 6, 12–13.
23. Rossi R., Prestwich S., Tarım Ş.A., Hnich B. (2007) Replenishment Planning for Stochastic Inventory Systems with Shortage Cost. In: *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems* (eds. P. Van Hentenryck, L. Wolsey), 4510, 229–243. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-72397-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72397-4_17)
24. Kosorukov O.A., Sviridova O.A. (2012). Stokhasticheskaia nepreryvnaia model' upravleniia zapasami [Stochastic continuous inventory control model]. *Vestnik REU [Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics]*, 4, 91–95.
25. Dombrovskii V.V., CHausova E.V. (2000) Matematicheskaya model' upravleniia zapasami pri sluchainom sezonnom sprose i nenadezhnykh postavshchikakh [Mathematical model of inventory management under random seasonal demand and unreliable suppliers]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Tomsk State University]*, 271, 141–146.
26. Karlova M.Ju. (2011) Development of generalized mathematical model inventory management. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 7 (3), 89–91.
27. Kazakov A.L., Lempert A.A., Bao T.F. (2012) A mathematical model of inventory (supply) management with regard to delay. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 4 (63), 131–137.
28. Gryleva I. (2014) Application conditions of the static deterministic and stochastic lot size models. *World of Science*, 4, art. no. 28EMN414.
29. Gasratov M.G. (2007) Mathematical model of Inventory Management in case of price competition. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 3, 9–17.
30. Domozhirova I.V. (2013) Use of the economic-mathematical models in management of commodity stocks organizations. *Izvestiya Tula State University*, 2–1, 165–171.



31. Bulatnikova P.A., Radaev A.E. (2024) Instrumental'nye sredstva obosnovaniia kharakteristik sistemy upravleniia zapasami stroitel'nykh materialov s uchetom razlichnykh kategorii riskov [Instrumental means for substantiating the characteristics of a building materials inventory management system taking into account various risk categories]. *Nedelia nauki ISI [ISI Science Week]*, 2, 142–144.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS**

**БУЛАТНИКОВА Полина Андреевна**

E-mail: bulatnikovap10@gmail.com

**Polina A. BULATNIKOVA**

E-mail: bulatnikovap10@gmail.com

**РАДАЕВ Антон Евгеньевич**

E-mail: TW-inc@yandex.ru

**Anton E. RADAEV**

E-mail: TW-inc@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0840-6828>

*Поступила: 01.05.2025; Одобрена: 11.07.2025; Принята: 14.07.2025.*

*Submitted: 01.05.2025; Approved: 11.07.2025; Accepted: 14.07.2025.*