

# УПРАВЛЕНИЕ ЗАПАСОМ СКОРОПОРТЯЩЕГОСЯ СЫРЬЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ ПРИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СБОЯХ

**И. А. ИПАТЬЕВА**

*Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Россия*

**Цель исследования:** провести анализ особенностей управления скоропортящимся сырьем на производственном предприятии, установить ключевые факторы, влияющие на эффективность управления запасом, и в соответствии с ними адаптировать классическую модель определения оптимальной партии поставки. **Методология исследования:** эмпирическое исследование факторов проведено с помощью критического анализа научной литературы; формализация модели реализована посредством применения математических методов моделирования рациональных систем в соответствии с алгоритмом формулирования оптимизационных моделей, преобразованным для скоропортящегося сырья. **Результаты исследования:** выявлены ключевые темы модификаций модели для производственных предприятий; сформулирована искомая модель; проведен численный эксперимент и установлена чувствительность параметров модели, результаты которой могут быть применены для совершенствования стратегий управления запасами в других отраслях народного хозяйства. **Оригинальность и вклад автора:** в исследовании впервые в России представлена адаптированная модель определения оптимальной партии поставки, учитывающая одновременно такие параметры, как подверженность запаса процессам ухудшения качества, вероятность возникновения сбоев и поломок на этапе снабжения, возможность возникновения дефицита в рамках сценариев с отложенным удовлетворением и с применением стратегии принятия предприятием данного риска.

*Ключевые слова:* производственное предприятие, дефицит, сбои, потери, запас скоропортящегося сырья, модель EOQ, оптимальная партия поставки.

*JEL:* C61, D51, D81.

---

Адрес организации: Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Шаболовка, 26–28, Москва, 119049, Россия.

© И. А. Ипатьева, 2023

<https://doi.org/10.21638/spbu18.2023.103>

## ВВЕДЕНИЕ

В современной экономике и теории логистики в рамках мирового сообщества сформировалось понимание, что в условиях непрерывно модифицирующихся рыночных отношений вопросы снабжения и управления запасами занимают одну из ведущих ролей в управлении цепями поставок. Преобразования, которые наблюдаются в мировой экономике в течение последних лет, определяются непредвиденным характером, существенными экономическими, политическими и социальными изменениями, оказывающими влияние на колебания отраслевой структуры, а также на целостность логистических цепей поставок.

Эффективность и надежность организации процессов снабжения необходимыми ресурсами выступают основными элементами, ответственными за бесперебойное функционирование предприятий. Осуществляя свою деятельность в условиях современной динамичной рыночной среды, организации заинтересованы в совершенствовании параметров эффективности, надежности и рентабельности, для повышения которых перспективным направлением является обращение к логистическим концепциям.

Применение логистических методов на этапе снабжения позволяет наиболее рационально интегрировать входящие внешние и внутренние потоки, осуществлять операции по непрерывному обеспечению производства необходимыми ресурсами с минимально возможными затратами при оптимальном уровне адаптации внутренней среды к внешним факторам.

Наиболее зависимыми от стабильности и надежности цепей поставок являются предприятия, работающие с сырьем, имеющим малые сроки годности (в частности, пищевое производство), что сопровождается высокими рисками потерь при нарушении целостности логистической цепи. При этом рыночная потребность в скоропортящейся продукции неуклонно растет.

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), среднегодовой прирост объемов мирового производства продовольственных продуктов составляет 2,2% и в 2020 г. достиг 5,3 млрд т.<sup>1</sup> При этом от 5 до 15% скоропортящегося продукта оказываются не потребленными своевременно и утилизируются.

Возможность моделирования сценариев организации процессов снабжения предприятий пищевой отрасли с учетом необходимых критериев и ограничений, приближающих теоретическую модель к практическим ситуациям, позволяет более эффективно осуществлять контроль входящих и исходящих потоков скоропортящегося сырья. Потребность в эффективном манипулировании фактором времени и жесткие ограничения сроков возможно использования запасов формируют тенденцию по отказу от их содержания на высоком уровне. Риски потерь, связанные с убылью и потерей сырьем потребительских свойств, для многих производств формируют потребность в эффективных моделях управления, позволяющих избавиться от неопределенности при создании заказа на поддержание запасов и обеспечение непрерывной работы производственных линий.

Актуальность темы исследования определяется потребностью производственных предприятий, работающих со скоропортящимся сырьем, в совершенствовании моделей управления запасами путем их уточнения с помощью введения необходимых ограничений и соответствующих критериев функциональных функций.

Цель статьи — разработка адаптированной модели определения оптимальной партии поставки, учитывающей ограничения по срокам хранения сырья, допустимости возникновения дефицита и ве-

<sup>1</sup> Продукты животноводства и сельскохозяйственных культур Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций. [Электронный ресурс]. <https://www.fao.org/faostat/> (дата обращения: 12.07.2022).

роятности сбоя на этапе снабжения для повышения эффективности управления скоропортящимися запасами в цепи поставок производственных предприятий.

Научная новизна исследования заключается в совершенствовании подходов к определению параметров моделей управления запасами производства с учетом специфики сырья, временных ограничений, допустимости дефицита и возможного возникновения сбоя на одном из этапов, что позволяет минимизировать затраты, связанные с потерей скоропортящимся сырьем своих свойств.

Статья имеет следующую структуру. В первом разделе проводится анализ теоретических исследований, направленных на модификацию и адаптацию модели определения оптимальной партии поставки для скоропортящегося сырья, выявляются ключевые направления и применяемые критериальные функции, определяются ограничения адаптируемой модели. Во втором — описывается применяемая в исследовании методология и формулируется алгоритм создания оптимизационных моделей для скоропортящегося сырья. В третьем разделе реализуется формализация адаптируемой в соответствии с выявленными ранее ограничениями модели ЕОQ, а также представлен численный эксперимент для двух сценариев управления дефицитом. В завершении работы приводятся выводы исследования.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В теории управления запасами производственного предприятия базовыми являются модель определения оптимальной партии заказа Харриса–Уилсона (ЕОQ), которая регулирует объем и затраты на организацию заказа на пополнение запаса для закупаемых материалов, и модель оптимального объема производства Тафта (ЕРQ), ориентированная на управ-

ление объемом производимой продукции. Обе модели основаны на предположениях о неизменном спросе и постоянных затратах.

В рамках исследования рассматриваются модели ЕОQ для производственного предприятия, которые модифицируются, исходя из того, что параметры спроса, уровня затрат, а также срока хранения запаса являются переменными.

Все модели ЕОQ могут быть сгруппированы с учетом различных параметров. Основываясь на классификации авторов работы [Alfares, Hesham, 2019], которые анализировали модификации моделей ЕРQ и ЕОQ, учитывающих особенности производственных предприятий, выделяются две адаптации в соответствии со стоимостью владения запасом, выступающей одним из ключевых параметров при работе со скоропортящимся сырьем.

Стоимость владения запасом при группировке моделей может рассматриваться с двух позиций. Во-первых, представлены модели, отражающие изменение стоимости владения запасом. Ряд исследователей описывает модели, в которых стоимость владения является возрастающей функцией зависимости от времени хранения запаса и от его типа. Это в значительной степени объясняется уменьшением стоимости хранимого запаса на протяжении времени. Например, в [LeeDye, 2012] разработана модель для скоропортящегося запаса, в рамках которой стоимость хранения выделяется как переменная уравнения, влияющая на скорость ухудшения качества запаса. В данной работе основной акцент сконцентрирован на том, что, повышая инвестиции в технологии сохранения продукта и тем самым увеличивая стоимость его хранения, удастся продлить срок его возможного использования.

Во-вторых, имеются модели, подразделяемые в соответствии с функцией изменения стоимости владения запасом, как это указано, например, в [Alfares, Hesham, 2019]. Наиболее распространенной функцией, описывающей стоимость хранения

запаса, является линейная. Одной из первых работ, в которой описывается модифицированная модель для скоропортящихся запасов с зависящим от времени спросом и стоимостью хранения запаса, выраженной линейно возрастающей функцией, является [Giri, Goswami, Chaudhuri, 1996]. Исследования, основанные на гипотезе о том, что стоимость владения выступает линейной функцией времени хранения запаса, продолжены в [Roy, 2008], где в модель включен фактор зависящего от запасов спроса. Иные модификации классической модели EOQ предложены в [Mishra, Singh, Kumar, 2013; Choudhury et al., 2015; Giri, Bardhan, 2016; Sharma, Singh, Singh, 2018].

Нелинейная зависимость описывается следующими исследователями: в [Goh, 1994] стоимость затрат на хранение выражена в виде полиномиальной функции; в [Giri, Chaudhuri, 1998] в модель включен фактор малого срока хранения запаса; в [Mahata, Goswami, 2009] сформулирована модель, учитывающая спрос, зависящий от запасов, и случайный срок жизни запаса; в [Tripathi, 2018] приведена модель с нелинейной зависимостью стоимости хранения запаса и величины спроса.

В случае со скоропортящимся запасом также выделяют классификацию по двум ключевым критериям — типу спроса на запас и сроку его хранения [Goyal, Giri, 2001; Bakker, Riezebos, Teunter, 2012]. Среди совокупности таких моделей наиболее часто встречаются те, которые учитывают постоянный спрос и фиксированный срок возможного использования запаса (см., напр.: [Acevedo-Ojeda, Contreras, Chen, 2020; Sepehri, 2021; Yang, 2021]). В наиболее сложных и редко исследуемых аналитических моделях сочетаются случайный срок жизни запаса и непостоянный спрос [Ali et al., 2021; Mondal et al., 2021; Nguyen, Chen, 2020].

При этом спрос может зависеть от различных факторов. Так, в [Feng et al., 2022] описывается спрос, зависящий от возраста запаса и его стоимости. Авторы работы

[Kuppulakshmi, Sugapriya, Pillai, 2021] анализируют зависимость спроса от остаточного уровня запаса. Кроме того, спрос может иметь зависимость: от кредитного периода [Tiwari et al., 2018], рекламы и расходов на продвижение [Avinadav et al., 2017], углеродного следа и инвестиций в технологии сохранения [Mohammadi et al., 2019; Rani, Ali, Agarwal, 2019], уровня инфляции [Paul, Rajapakshe, Mallik, 2019] и т. д.

Исследование модификаций моделей EOQ демонстрирует, что ключевым параметром при формулировании модели являются также заданные критериальные функции. Под критериальными функциями понимаются различные нелинейные ограничения и параметры, которые не могут быть учтены в классическом виде модели EOQ, при этом в соответствии с ними она оптимизируется. Одним из таких параметров является производственный аспект применения модели. Различные исследователи выделяют до 20 классов, согласованных с определенной целевой функцией, которые могут быть совмещены в одной модели.

В рамках исследования был проведен анализ 160 публикаций, размещенных в базах научного цитирования Web of Science и Scopus, где приводятся результаты модификаций и адаптаций классической модели EOQ для скоропортящегося запаса за 2016–2021 гг. [Ипатьева, Эльяшевич, 2022]. Выявленные параметры оптимизации и их частота применения отражены на рис. 1.

Исходя из целей исследования, отдельное внимание уделяется моделям, которые оптимизируют модель EOQ для скоропортящегося запаса в рамках логистической системы производственного предприятия. Как видно из рис. 1, адаптированные для производственных предприятий и учитывающие малые сроки хранения запаса параметры оптимизации представлены менее чем в 6% исследований. Все выявленные модели показаны в табл. 1 и охарактеризованы далее.



Рис. 1. Параметры оптимизации модели EOQ для скоропортящегося запаса, %, 2016–2021 гг. Составлено по: [Ипатьева, Эльяшевич, 2022, с.177–231].

Таблица 1

### Производственные модифицированные модели EOQ для скоропортящегося запаса

№ модели	Критериальная функция	Тип спроса	Фактор зависимости спроса	Срок жизни запаса	Описание	Источник
1	Двухэтапность цепочек поставок	Детерминированный	<ul style="list-style-type: none"> <li>Цена и возраст запаса</li> <li>Усилия при продаже</li> </ul>	Фиксированный	Розничный торговец и производитель используют контракт о распределении доходов, права на принятие решений об инвестициях в продажу и политике пополнения запаса	[Avinadav, 2020]
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ценообразование</li> <li>Возможность обращения к кредитованию</li> <li>Трехэтапность цепочек поставок</li> </ul>	Детерминированный	Цена и возраст запаса	Фиксированный	Модель учитывает трехэтапное кредитование, когда производителю необходимо определить оптимальную цену продажи, время производства и время цикла пополнения, чтобы максимизировать текущую стоимость общей годовой прибыли с использованием анализа дисконтированного денежного потока	[Chang et al., 2019]

Продолжение таблицы 1

№ модели	Критериальная функция	Тип спроса	Фактор зависимости спроса	Срок жизни запаса	Описание	Источник
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ценообразование</li> <li>• Возможность обращения к кредитованию</li> </ul>	Детерминированный	Цена и возраст запаса	Фиксированный	Интегрированная модель «Производитель — поставщик — покупатель», которая включает оценку количественных потерь запаса, их совокупное воздействие на уровень промышленного загрязнения	[Choudhury, De, Mahata, 2021]
4	Предварительное производство	Детерминированный	Наличие запаса	Фиксированный	В рамках модели применяется система очередей, сокращающая время ожидания заказа для клиентов и наращивающая спрос	[Hanukov et al., 2021]
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Двухэшелонность цепочек поставок</li> <li>• Перепроизводство и накопление излишков на складах</li> </ul>	Стохастический	Возраст запаса	Фиксированный	Модель двухэшелонной замкнутой цепочки поставок (CLSC), в которой учитываются объемы нового и восстановленного запаса, возникающего в результате возвратов	[Mawandiya et al., 2020]
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Потерянные продажи и дефицит</li> <li>• Многономенклатурность</li> </ul>	Детерминированный, стохастический	Возраст запаса	Фиксированный	Двухцелевая многопродуктовая модель, учитывающая частичный дефицит (потерянные или отсроченные продажи)	[Mirkhorsandi, Pasandideh, 2020]
7	Потерянные продажи и дефицит	Детерминированный, стохастический	Изменяется во времени	Случайный	Модель управления производственным запасом, учитывающая несовершенство производства и одновременное ухудшение качества продукции, вероятность возникновения дефицита	[Rout et al., 2019]
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ценообразование</li> <li>• Возможность обращения к кредитованию</li> </ul>	Стохастический	Цена и возраст запаса	Фиксированный	Модель учитывает концепцию задержки платежей, когда розничный продавец пользуется постоянными предложениями кредитного периода от производителя, а также стратегию дисконтирования цен с целью привлечения потребителей	[Saren, Sarkar, Bachar, 2020]

Окончание таблицы 1

№ модели	Критериальная функция	Тип спроса	Фактор зависимости спроса	Срок жизни запаса	Описание	Источник
9	Потерянные продажи и дефицит	Детерминированный	Изменяется во времени (трапециевидно)	Фиксированный	Оптимизационная модель управления запасом с дефицитом, где темпы производства пропорциональны темпам спроса, а темпы ухудшения запаса пропорциональны времени	[Sayal, Singh, Aggarwal, 2018]
10	Двухэшелонность цепочек поставок	Детерминированный	Однородный/постоянный	Фиксированный	Производственно-инвентаризационная модель для двухэшелонной цепочки поставок с контролируемым вероятностным ухудшением качества запаса, учитывающая инвестиции в технологии его сохранения	[Ullah, Sarkar, Asghar, 2019]
11	Перепроизводство и накопление излишков на складах	Детерминированный	Однородный/постоянный	Фиксированный	Формируется модель, оптимизирующая периодическое перепроизводство и накопление излишков на складах с учетом затрат на утилизацию непотребленного запаса	[Vahdani, Sazvar, Govindan, 2021]

Наиболее распространены модели, включающие дифференцированные стратегии ценообразования, а также возможность использования торгового кредитования [Chang et al., 2019; Saren, Sarkar, Bachar, 2020; Choudhury, De, Mahata, 2021]. Представленные модели могут усложняться и детализироваться в контексте двух- и трехэшелонных цепей поставок [Ullah, Sarkar, Asghar, 2019; Avinadav, 2020; Mawandiya, Jha, Thakkar, 2020; Chang et al., 2019].

Лишь в некоторых исследованиях встречаются адаптационные модели, применяющие системы очередей для сокращения срока ожидания заказа [Hanukov et al., 2021]. Вероятность перепроизводства и наращивания излишков запаса рассматри-

вается в [Mawandiya, Jha, Thakkar, 2020; Vahdani, Sazvar, Govindan, 2021]. Отдельно описываются модели, допускающие вероятность возникновения дефицита и связанные с ним упущенные продажи [Sayal, Singh, Aggarwal, 2018; Rout et al., 2019; Mirkhorsandi, Pasandideh, 2020]. Модели, учитывающие особенности дефицита и не затрагивающие производственный аспект, приведены в исследованиях, авторы которых анализируют отсроченные продажи и задержки пополнения запаса (см., напр.: [Jani et al., 2021; Kurade, Latpate, 2021; Patriarca et al., 2021]), возможность формирования дополнительного заказа на поставку [Li et al., 2019; Zhang et al., 2016].

Вопросы дефицита, наряду с проблемами ценообразования и временной стоимостью денег, рассматриваются, например, в [Chakraborty, Jana, Roy, 2018; Udayakumar, Geetha, Sana, 2020; Barman, Das, De, 2021]. Исследователи оценивают эффект применения кредитных ресурсов и дифференцированных методов оплаты (см., напр.: [Jani et al., 2021; Kumar, Kumar, Meenu, 2020; Gupta, Tiwari, Jaggi, 2020; Udayakumar, Geetha, Sana, 2020]). Не меньшее внимание уделяется формулированию многопродуктовых [Barman, Das, De, 2021; Mirkhorsandi, Pasandideh, 2020; Pattnaik, Gahan, 2018] и многоскладских моделей [Kumar, Kumar, Meenu, 2020; Gupta, Tiwari, Jaggi, 2020; Chakraborty, Jana, Roy, 2018; Tiwari et al., 2016] с включенным фактором дефицита в рамках критериальной функции.

Среди причин возникновения дефицита исследователи называют возможность реализации риска поломок оборудования, транспортных средств, а также сбоев на различных этапах цепи поставок. Модели, учитывающие данные факторы, выступают одними из самых малочисленных, притом что фактор времени реализации заказа и поступления на производство для скоропортящегося запаса является ключевым. Сбои в рамках процесса в таком случае могут привести к ухудшению качества запаса или к его полной потере.

Вероятность сбоев и случайных поломок оборудования со стохастическим временем возобновления работоспособности цепи поставок проанализированы в [Hidayat, Kasanah, Yudhistira, 2016; Luong, Karim, 2017; Poursoltan, Seyedhosseini, Jabbarzadeh, 2020]. Модель, основанная на стратегиях упреждающего планирования для минимизации воздействия сбоев, разработана в [Suryawanshi, Dutta, 2021].

Следовательно, для скоропортящегося запаса важны такие параметры, как ограничения по срокам хранения запаса, возникновение сбоев и поломок на этапе снабжения, которое может являться причиной реализации риска накопления де-

фицита запаса и упущенных продаж. Изучение научной литературы демонстрирует, что данные факторы могут включаться в модифицированные модели в сочетании с иными параметрами, однако в доступных источниках не было найдено примеров их совместного применения. Существующие адаптации модели, учитывающие некоторые из трех выделенных параметров, для торговых предприятий не всегда применимы в контексте производств. С учетом сказанного целесообразно сформулировать модифицированную модель определения оптимальной партии поставки для производственных предприятий, работающих со скоропортящимся сырьем, учитывающую вероятность дефицита и сбоев на одном из этапов цепи поставок.

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные исследования в области изучения и разработки модифицированных моделей управления скоропортящимся запасом в значительной степени базируются на методах математического моделирования. Исходя из этого для достижения цели исследования применяется морфологический метод описания рациональных систем, результат которого зависит от полноты представления совокупных затрат.

Формализация модели осуществляется в соответствии с алгоритмом формулирования оптимизационных моделей, преобразованным для скоропортящегося сырья на основе разработок автора исследования [Лукинский и др., 2022] и отраженным на рис. 2.

Приведенный алгоритм содержит девять последовательных этапов. На первом этапе формирования базы данных определяются: характер спроса на запас; факторы его зависимости и изменения; параметры, устанавливающие расход и поступление запаса на предприятие; затраты

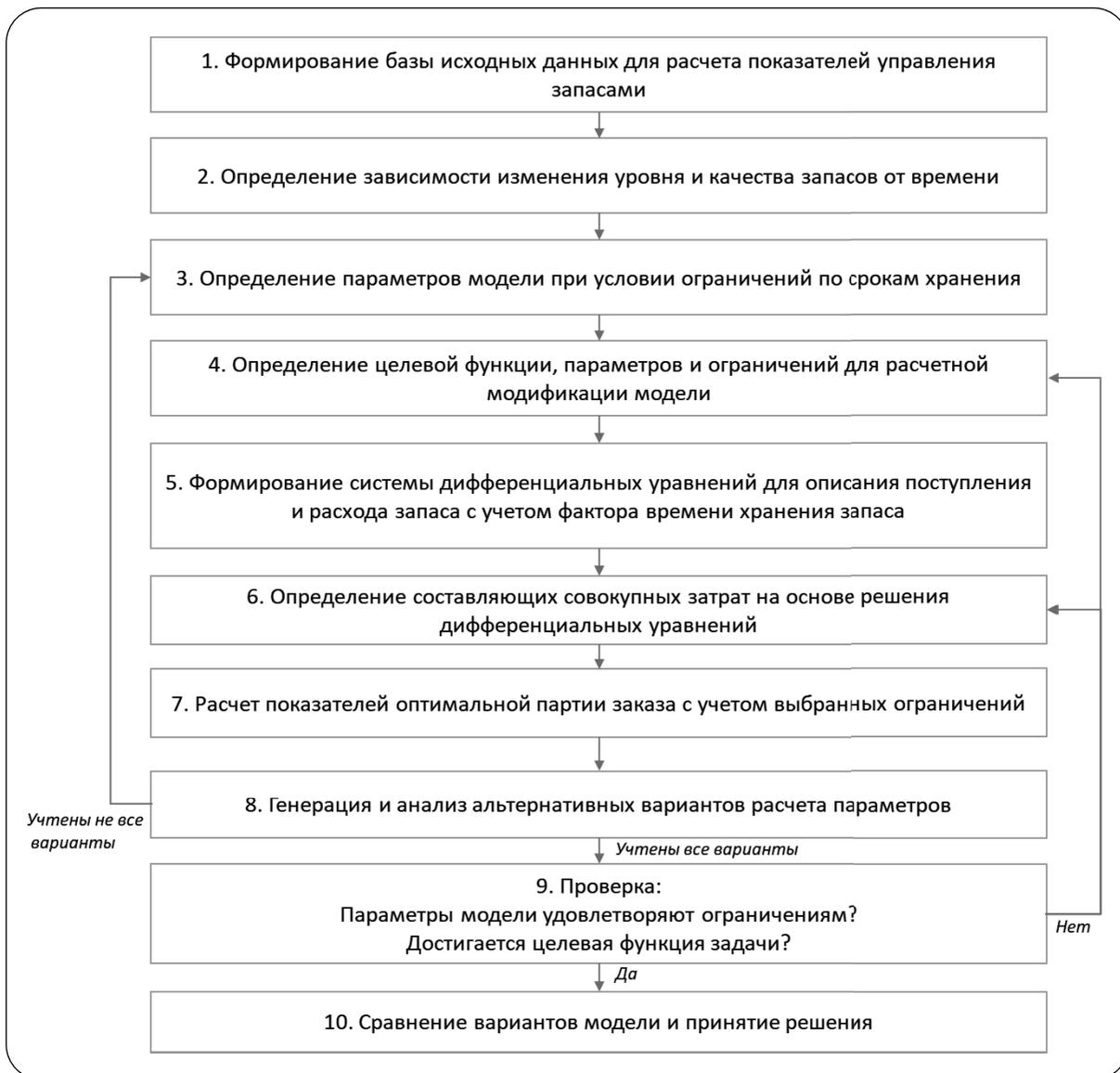


Рис. 2. Алгоритм формулирования оптимизационных моделей для скоропортящегося сырья  
Составлено по: [Лукинский и др., 2022].

на его содержание и пополнение. Данные показатели выражаются в виде средних значений за определенный период.

На втором этапе конкретизируется тип зависимости срока хранения и динамики ухудшения физического состояния скоропортящегося запаса от фактора времени. Это отражается в виде описания увеличения потерь запаса в соответствии

с функциями распределения, соответствующими выявленной в результате анализа зависимости.

Третий этап — установление ограничений, включаемых в адаптированную модель, которое осуществляется на основе анализа научных исследований, в которых рассматриваются вопросы модификаций модели определения оптимальной партии

поставки в зависимости от различных условий внешней и внутренней среды предприятия. Для этого проводятся поиск и отбор публикаций по тематике снабжения и закупок на производственных предприятиях в известных базах научного цитирования (Web of Science, Scopus). Поиск моделей, используемых при работе со скоропортящимися материалами, проводился по связкам двух конкретных ключевых слов: «perish\* AND inventory», «deteriorate\* AND inventory», «shelf life AND inventory», «spoil\* AND inventory», «outdate\* AND inventory».

Согласно анализу, вопросы оптимизации потерь в рамках цепи поставок производственных предприятий затрагивают менее 6% исследований. При этом практически отсутствуют модели, учитывающие время использования производственного запаса совместно с оценкой сценариев возникновения дефицита и его последствий. Соответственно, в рамках настоящей работы определены следующие нелинейные ограничения для оптимизации модели: срок хранения запаса; вероятность возникновения сбоев или поломок на этапе снабжения; допустимость накопления дефицита и стратегии работы с ним (удовлетворение дефицита при последующей поставке или принятие риска потерянных продаж). Основываясь на указанных параметрах постановки задачи, формулируется целевая функция.

На четвертом — седьмом этапах реализуется разработка модифицированной модели. Движение запаса в рамках цикла описывается с помощью дифференциальных уравнений, определяются несколько вариантов расчета составляющих совокупных затрат, формулируется уточненная в соответствии с заданными параметрами модель EOQ.

Восьмой этап призван определить соответствие полученного решения заданным параметрам, охватить большинство возможных решений поставленной задачи, для чего в алгоритме используется принцип обратной связи.

На девятом этапе проводится сравнение полученных альтернативных вариантов и происходит принятие решения на основе критерия минимизации совокупных логистических затрат, оцениваемых с помощью численного эксперимента. Представленный алгоритм демонстрирует последовательное решение ключевых задач и сочетает в себе основные принципы системного подхода. Указанная схема позволяет реализовать принципы стратегического менеджмента при построении адаптированных моделей управления запасом и достигнуть заданной целевой функции.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Предпосылки адаптационной модели

В значительной степени разработка моделей управления запасами основывается на повышении точности прогнозирования потребности в сырье [Эльяшевич, 2020а], а также на концепции оптимизации, предполагающей целесообразность их содержания в оптимальном размере, определяемом по критерию минимума совокупных затрат.

При работе со скоропортящимися запасами наиболее рациональным является применение концепции минимизации, основанной на понимании того, что высокий уровень их концентрации имеет ряд негативных последствий, среди которых можно выделить увеличение текущих затрат и себестоимости, связанных с ухудшением качества запаса, а также снижением прибыли на инвестированный капитал [Эльяшевич, 2020б; Сергеев, Эльяшевич, 2020].

Ключевую роль в теории управления запасами играет модель определения оптимальной партии поставки EOQ (Economic order quantity). В классическом варианте модель Харриса–Уилсона представляет

собой аналитическую зависимость, позволяющую установить оптимальную партию единичной поставки, где в качестве критерия оптимизации принимается минимум совокупных затрат на выполнение заказа и на хранение запаса [Лукинский и др., 2022].

Однако среди допущений классического вида модели присутствует невозможность рассмотреть и учесть виды ограничений и нелинейных параметров. В практике производственных предприятий возникает необходимость регулировать грузоподъемность транспортного средства, предельную величину заказа, складскую площадь, где будет размещен поступающий заказ, частоту поставок, возможность использовать отложенные схемы платежей и т.д. [Лукинский и др., 2022]. В случае со скоропортящимся сырьем производственных предприятий следует включить дополнительные параметры, учитывающие требования по срокам допустимого хранения сырья до момента его потребления на производстве, времени реализации цикла, вероятность возникновения дефицита при отсутствии или недостаточности страхового запаса.

Основываясь на том, что теоретическая модель EOQ не всегда отражает необходимые параметры для ее приближения к реальности, в работе формулируется модель определения оптимальной партии поставки скоропортящегося сырья для производственного предприятия в условиях возникновения сбоя или поломки в цепи поставок в одном из периодов, в результате чего образуется дефицит.

При создании адаптированной модели выносятся предположения, что скоропортящийся запас имеет непрерывный тренд ухудшения качества, одинаковый на разных этапах хранения, транспортировки и т.д., причем поставки осуществляются не мгновенно.

Используемые обозначения таковы:

$D$  — объем спроса на запас, подверженный непрерывной потере потребительских свойств, т;

$q$  — размер единичного заказа, т;  
 $C_r$  — суммарные затраты за период, руб.;  
 $C_h$  — стоимость хранения единицы запаса, руб./т;  
 $C_s$  — затраты, связанные с закупкой и организацией заказа, руб.;  
 $C_p$  — затраты на пополнение запаса в расчете на каждую поставку, руб.;  
 $C_y$  — затраты, связанные с потерей потребительских свойств запасом, руб./т;  
 $C_d$  — стоимость дефицита, руб./т;  
 $T$  — цикл пополнения запаса, дни;  
 $Q(t)$  — объем поступления запаса в период времени  $t$ , т;  
 $\theta(t)$  — распределение времени ( $t$ ) истощения запаса, час;  
 $\lambda$  — интенсивность расхода запаса, т;  
 $C_\psi$  — стоимость утилизации непотребленного запаса, руб.

### **Формализация и учет процессов потери потребительских свойств скоропортящегося сырья в модели определения оптимального размера заказа**

Для скоропортящегося сырья, помимо обладания рядом специфических требований по условиям хранения и транспортировки, характерна тенденция к снижению качества, уменьшению объема и количества запаса с момента производства. Физическое истощение в различных источниках может оцениваться на основе определения среднего срока хранения сырья в процентом или натуральном выражении [Лукинский, Плетнева, 2010].

Для скоропортящегося сырья функция убыли запаса вследствие ухудшения потребительских свойств представляет собой экспоненциальную зависимость потерь  $Q_y$  от времени  $T$ . При определении наиболее подходящего распределения при постановке задачи необходимо учесть ряд параметров.

Во-первых, в зависимости от влияния различных факторов (задержек в пути, нарушения холодовой цепи, объема про-

изводственного заказа и др.) объем потерь скоропортящегося запаса до момента его потребления на производстве может динамично меняться в разные периоды времени. Во-вторых, распределение должно описывать непрерывное изменение объема запаса, а не только события с характеристиками, заданными в изолированных точках. Это позволит не только определить эффективность модели с точки зрения понимания того, будет запас потреблен или испорчен, но и отразить динамику ухудшения запаса и установить время до возникновения сбоя. Исходя из этого можно вести речь о том, что дискретные распределения не соответствуют необходимым параметрам, и обращаться к группе непрерывных распределений.

Среди непрерывных распределений наиболее подходящими для описания продолжительности жизни запаса или работки системы до отказа (сбоя) являются распределения экстремальных значений, Гомперца и Вейбулла. Среди них распределение Вейбулла наиболее соответствует статистическим параметрам жизни скоропортящегося сырья, учитывает неравномерность возникновения событий, влияющих на конечный результат, а также позволяет определить надежность цепи поставок.

Исходя из этого в настоящем исследовании величина потерь описывается функцией двухпараметрического распределения Вейбулла. В задаче подразумевается, что интенсивность снижения качества запаса не меняется при его перемещении во время транспортировки или хранения на складе. Это связано с тем, что при перемещении скоропортящегося запаса необходимо соблюдение установленных режимов температуры и важности, нарушение которых, приводящее к ускорению возникновения потерь, будет классифицироваться в модели как сбой и описываться соответственно.

Таким образом, распределение времени возможного использования запаса определяется зависимостью:

$$\theta(t) = \alpha\beta t^{\beta-1}, \quad (1)$$

где  $t$  — временной период,  $\alpha, \beta$  — параметры распределения с заданными значениями в промежутках  $0 < \alpha < 1$ ,  $\beta \geq 1$ .

В случае если  $\alpha$  определяется значениями меньше 1, то функция будет описывать отказы системы на этапе реализации поставки скоропортящейся продукции, связанные с внутренними факторами (задержки на одном из этапов процесса, например при погрузке/разгрузке, поломка оборудования, влияющего на увеличение сроков цикла заказа на пополнение запаса, и т.д.). Если  $\alpha$  имеет значения, равные 1, то функция будет принимать вид экспоненциального распределения и описывать сбой в результате воздействия внешних факторов.

На рис. 3 показана зависимость потерь запаса от периода его хранения, описанная с помощью распределения Вейбулла. Аппроксимация демонстрирует, что уменьшение параметра  $\alpha$  приводит к более равномерному распределению вероятных потерь и позволяет сформировать систему стабильно-непрерывного потребления.

Одна из ключевых задач в моделях управления скоропортящимся сырьем — минимизация затрат, связанных с потерей его потребительских свойств. В данную группу могут входить затраты на закупку и хранение части запаса, перешедшей в категорию неликвидных, затраты на их ликвидацию и возмещение. На этапе постановки задачи и определения критерияльных функций (иначе говоря, нелинейных ограничений, применяемых для оптимизации классической модели) была сформулирована целевая функция, минимизирующая суммарные затраты в области  $q > 0$ :

$$C_r = \frac{2C_p D}{q} + C_h q + D \cdot C_s + C_y \cdot D \cdot \alpha\beta t^{-1} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $C_r$  — суммарные затраты за период, руб.;  $q$  — размер единичного заказа, т;

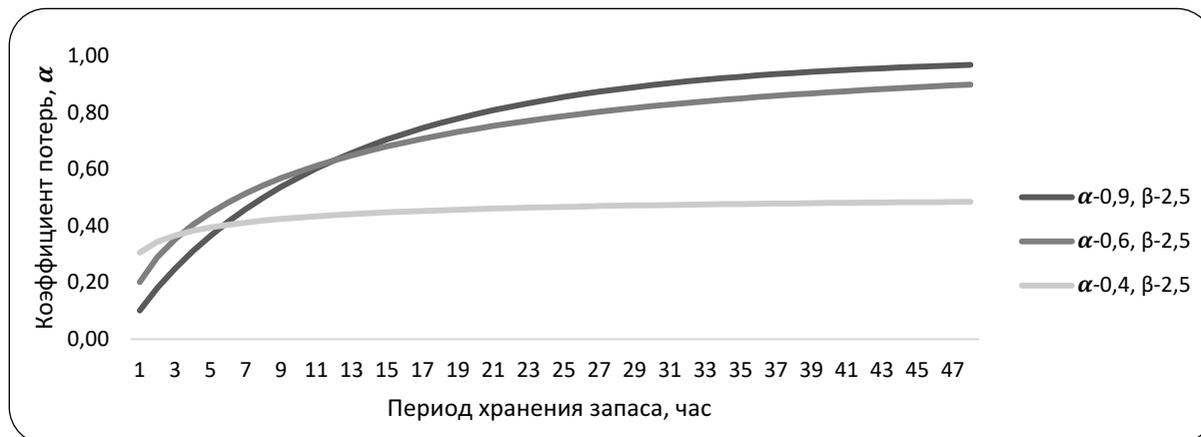


Рис. 3. Аппроксимация экспоненциальной зависимости потерь от времени хранения запаса

$C_h$  — стоимость хранения единицы запаса, руб./т;  $C_s$  — затраты, связанные с закупкой и организацией заказа, руб.;  $C_p$  — затраты на пополнение запаса в расчете на каждую поставку, руб.;  $C_y$  — затраты, связанные с потерей потребительских свойств запасом, руб./т;  $t$  — время цикла, дни.

Затраты на поставку ( $C_p$ ), закупку ( $C_s$ ) и хранение ( $C_h$ ) будут включать две составляющие — стоимость запаса, потребленного до момента ухудшения его качества  $Q_T$ , и стоимость запаса, который не был потреблен современно и был испорчен  $Q_T$ . Иными словами,  $C_s = C_s(Q_T) + C_s(Q_T)$ . Аналогичная зависимость будет справедлива для  $C_p$  и  $C_h$ .

Затраты, возникающие в результате потери запасом своих первоначальных свойств, имеют зависимость от полноты обеспечения потребности производства. Если предприятие стремится не допустить дефицит, то учитывает риски возможных потерь и заказывает партии в большем объеме, чем рассчитанный классическим методом  $\theta Q(t)$ , на величину той части, которая может быть испорчена. В данном случае  $C_y$  включают в себя затраты на управление непотребленным запасом. Если предприятие принимает риск возникновения дефицита и не берет в расчет динамику потери потребительских свойств

запасом при определении оптимального размера заказа, то он равен классическому ЕОQ.

Для учета потерь, связанных со снижением потребительских свойств запасом, введен коэффициент  $\psi(q)$ , отражающий затраты на организацию утилизации непотребленной части запаса, подвергнувшейся снижению качества, определяемый как отношение затрат на утилизацию единицы запаса к ее стоимости. Данный коэффициент определяется на промежутке  $0 \leq \psi \leq 1$ , если затраты на утилизацию непотребленного запаса не превышают его стоимость, и  $\psi > 1$  — в обратном случае.

Опираясь на выводы В.Харриса [Harris, 1913], в исследовании доказано, что экономичный размер заказа для данной целевой функции определяется формулой:

$$q = \sqrt{\frac{2DC_p}{C_h + C_s\alpha\beta t^{\beta-1}\psi_i}}. \quad (3)$$

Полученная аналитическая модель отличается от классической уточнением функции затрат до издержек на управление непотребленным запасом, что выражается в величине коэффициентов  $\theta(t)$  и  $\psi_i$  и подразумевает наличие слагаемого  $C_s\alpha\beta t^{\beta-1}\psi_i$  в знаменателе подкоренного выражения.

### Модель планирования дефицита производственного запаса без покрытия в следующем периоде

Рассмотрим первый сценарий управления скоропортящимся запасом, при котором накопленные в течение периода дефицита требования не удовлетворяются при последующей поставке. В таком случае объем оптимального заказа соответствует формуле (3), но при этом требуется оценить стоимость дефицита. Поскольку мягкие издержки, которые включают репутационные издержки, потерю лояльности постоянных клиентов и сокращение рыночного сегмента потребителей, упущенные объемы потенциальных продаж, не могут быть оценены в момент возникновения ввиду продолжительности их формирования, постольку в модели оцениваются только жесткие издержки.

В работе [Лукинский и др., 2022] доказано, что при наличии дефицита с покрытием из дополнительных источников величина оптимальной партии заказа увеличивается на величину

$$q_d = \sqrt{\frac{C_d + C_h}{C_d}}.$$

Тогда размер ЕОQ можно представить в следующем виде:

$$q = \sqrt{\frac{2DC_p(C_d + C_h)}{C_h C_d + C_s \alpha \beta t^{\beta-1} \psi_i}}. \quad (4)$$

Методология решения поставленной задачи предполагает описание динамики движения скоропортящегося запаса в рамках цикла. Это возможно реализовать, представив описание каждого этапа цикла с помощью дифференциальных уравнений. Также необходимо учитывать, что в случае со скоропортящимся сырьем наиболее важным является фактор времени, от которого зависит степень свежести и качества запаса. Основываясь на этом, далее приводится уточнение составляющих затрат в уравнении (4), выраженных через время.

Модель для скоропортящегося запаса включает период поступления сырья  $T_0 \leq t \leq T_1$  с интенсивностью  $(T)$ . Исходя из того, что запас обладает свойством неизбежного снижения качества на протяжении всего срока использования, данный период также учитывает коэффициент потери запасом потребительских свойств  $\theta(t)$ . Динамика движения запаса за один цикл отражена на рис. 4, где определены основные этапы, включающие поступление заказа, расход ( $T_1 \leq t \leq T_2$ ) и накопление дефицита ( $T_2 \leq t \leq T_3$ ).

Определим, что цикл начинается при  $t = 0$  и завершается в момент времени  $t = T$ . Объем поступления определяется как  $(T) - D$ , тогда при  $(T) - D \leq 0$  возникает дефицит в размере  $S$ . Поскольку было установлено, что для скоропортящегося запаса основным фактором является скорость реализации этапов цикла, то выразим функцию затрат через время.

Период поставки запаса на предприятие  $T_1$  предполагается фиксированной величиной, в то время как период потребления  $T_2$  зависит от вероятности возникновения дефицита и определяется как

$$T_2 = \sqrt{\frac{2C_p}{DC_h C_s \alpha \beta t^{\beta-1}}}. \text{ Величина } T \text{ отражает}$$

совокупное время реализации цикла, и для него справедлива зависимость  $T = T_1 + T_2$ .

Определим объем поступления за рассматриваемый период:

$$\frac{dQ(t)}{dt} + \theta Q(t) = \lambda(T) - D_1, \quad T_0 \leq t \leq T_1. \quad (5)$$

Получим результат дифференцирования функции:

$$Q(t) = (\lambda(T) - D_1) \cdot \left[ t + \frac{\alpha t^{\beta+1}}{\beta + 1} \right] \cdot e^{-\alpha t^\beta}. \quad (6)$$

Далее определим объем производственного спроса на скоропортящийся запас в период  $T_2$ :

$$\frac{dQ(t)}{dt} + \theta Q(t) = -D_1, \quad T_1 \leq t \leq T_2. \quad (7)$$

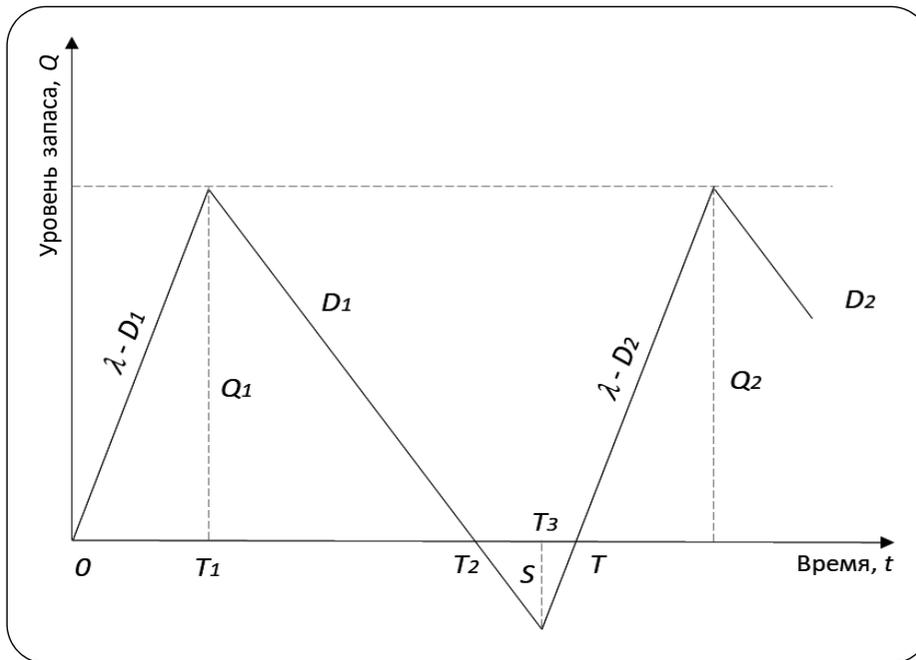


Рис. 4. Цикл движения скоропортящегося запаса с возникновением дефицита без покрытия в следующем периоде

Примечания:  $\lambda(T) - D$  — объем поступления запаса;  $D_1, D_2$  — объем спроса в рамках циклов;  $S$  — накопленный дефицит;  $0 \leq t \leq T_1$  — период поступления запаса;  $T_1 \leq t \leq T_2$  — период расхода запаса;  $T_2 \leq t \leq T_3$  — период накопления дефицита;  $t = T$  — завершение первого цикла.

Результат дифференцирования функции таков:

$$Q(t) = -D_1 \left[ \left( t - T_2 \right) + \frac{\alpha}{\beta + 1} \right] \times e^{-\alpha t^\beta} \cdot (8)$$

Объем спроса в период дефицита, когда основной запас был потреблен, определяется так:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = -D_1, T_3 \leq t \leq T. (9)$$

Результат дифференцирования функции имеет вид:

$$Q(t) = -D_1 \cdot (T_2 - t). (10)$$

Таким образом, максимальный запас в первом периоде будет равен:

$$Q(T) = (\lambda(T) - D_1) \cdot \left[ T_1 + \frac{\alpha T_1^{\beta+1}}{\beta + 1} \right] \cdot e^{-\alpha T_1^\beta}. (11)$$

Ранее было установлено, что суммарные затраты (12) состоят из стоимости закупки заказа, его поставки, хранения, стоимости ухудшения качества запаса и утилизации. В данной модели также включены затраты, связанные с возникновением дефицита:

$$C_r = C_p + C_s + C_h + C_y + C_d + C_\psi. (12)$$

Определим составляющие совокупных затрат за период. Затраты на закупку и организацию заказа примут вид:

$$C_s(t) = C_s \cdot D_1. (13)$$

Стоимость поставки заказа за период  $T_0 \leq t \leq T$  будет определяться так:

$$C_p(t) = \frac{C_p}{T}. (14)$$

Затраты на хранение запаса включают период  $T_0 \leq t \leq T_2$ . Поскольку по условиям

задачи  $\alpha$  принимает малые значения, то при дальнейшем решении уравнения второго порядка и выше не учитываются:

$$\begin{aligned}
 C_h(t) &= \frac{C_h}{T} \left[ \int_{T_0}^{T_1} Q(t) dt + \int_{T_1}^{T_2} Q(t) dt \right] = \\
 &= \frac{C_h}{T} \left[ \int_{T_0}^{T_1} (\lambda - D_1) \cdot \left( t + \frac{\alpha t^{\beta+1}}{\beta+1} \right) e^{-\alpha t^\beta} dt + \right. \\
 &\quad \left. + \int_{T_1}^{T_2} D_1 \cdot \left[ \frac{(t - T_2) + \frac{\alpha}{\beta+1}}{(t^{\beta+1} - T_2^{\beta+1})} \cdot e^{-\alpha t^\beta} \right] dt = \right. \\
 &\quad \left[ (\lambda - D_1) \cdot \left( \frac{T_1^2}{2} - \frac{\alpha \beta T_1^{\beta+2}}{(\beta+1)(\beta+2)} \right) + \right. \\
 &\quad \left. \frac{(T_2 - T_1)^2}{2} - \frac{\alpha}{(\beta+1)(\beta+2)} \cdot (T_2^{\beta+2} - T_1^{\beta+2}) - \right. \\
 &\quad \left. + D_1 \left[ -\frac{\alpha}{\beta+1} \cdot (T_2^{\beta+1} T_1 - T_2 T_1^{\beta+1}) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{\alpha}{\beta+2} \cdot (T_2^{\beta+2} - T_1^{\beta+2}) \right] \right]. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Затраты, связанные со снижением качества запаса с течением времени, определяются для двух временных периодов — этапа пополнения  $T_0 \leq t \leq T_1$  и потребления  $T_1 \leq t \leq T_2$ :

$$\begin{aligned}
 C_y(t) &= \frac{C_s}{T} \left[ \int_0^{T_1} \theta(t) Q(t) dt + \right. \\
 &\quad \left. + \int_{T_1}^{T_2} \theta(t) Q(t) dt \right] = \\
 &= \frac{C_s}{T} \left[ \int_0^{T_1} \alpha \beta t^\beta \left[ -D_1 \cdot \left( \frac{(T) -}{t + \frac{\alpha t^{\beta+1}}{\beta+1}} \right) \cdot e^{-\alpha t^\beta} \right] dt + \right. \\
 &\quad \left. + \int_{T_1}^{T_2} \alpha \beta t^\beta \left[ -D_1 \cdot \left[ \frac{(t - T_2) + \frac{\alpha}{\beta+1}}{(t^{\beta+1} - T_2^{\beta+1})} \cdot e^{-\alpha t^\beta} \right] \right] dt = \right.
 \end{aligned}$$

$$= \frac{C_s}{T} \left[ \frac{\alpha \beta}{\beta+1} \cdot T_1^{\beta+1} + D_1 \cdot \left[ \frac{\alpha}{\beta+1} \cdot T_1^{\beta+1} - \frac{\alpha \beta}{\beta+1} \cdot T_0^{\beta+1} - \alpha T_1 T_0^\beta \right] \right]. \quad (16)$$

Стоимость дефицита рассчитывается для периода  $T_2 \leq t \leq T$  и включает периоды как отсутствия запаса, так и новой поставки:

$$\begin{aligned}
 C_d(t) &= \frac{C_d}{T} \left[ \int_{T_2}^{T_3} Q(t) dt + \int_{T_3}^T Q(t) dt \right] = \\
 &= \frac{C_d}{T} \left[ \int_{T_2}^{T_3} [-D_1 \cdot (T_2 - t)] dt + \int_{T_3}^T (\lambda - D_1) \cdot (T - t) dt = \right. \\
 &= \frac{C_d}{2\lambda T} \left[ -D_1 \cdot (\lambda - D_1) \cdot (T - T_2)^2 \right]. \quad (17)
 \end{aligned}$$

В рамках данной модели оптимизируемой величиной выступают суммарные затраты, которые минимизируются при сокращении длительности цикла. Таким образом, достигается целевая функция  $C_r(T, T_2) \rightarrow \min$ .

### Модель планирования дефицита производственного запаса с покрытием в следующем периоде

Второй сценарий предполагает, что спрос является неизменным, но клиент готов ожидать заказ, и накопленный за это время дефицит должен быть возмещен при следующей поставке.

Однако в условиях динамичного конкурентного рынка при невозможности выполнить заказ часть клиентов предпочтет обратиться к иному поставщику, ориентируясь на показатель скорости получения продукта. Исходя из этого предполагается, что не все клиенты предприятия готовы дожидаться новой поставки сырья и на ее момент спрос сохраняется не в полном объеме, который определяется коэффициентом  $D(\eta)$ , где  $\eta$  — время ожидания

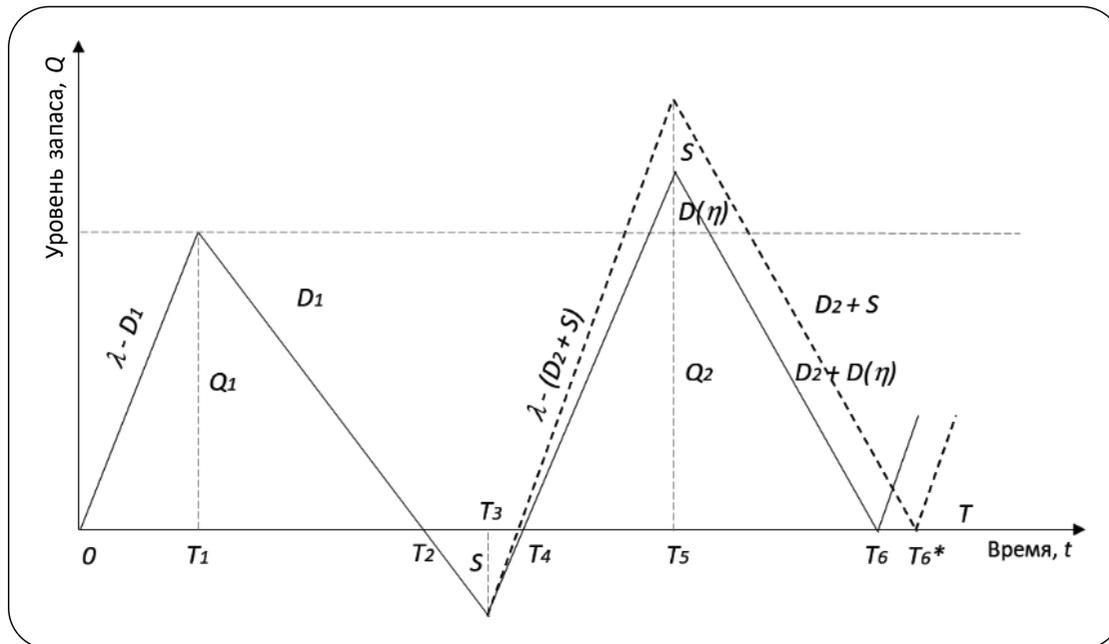


Рис. 5. Цикл движения скоропортящегося запаса с возникновением дефицита с полным или частичным покрытием в следующем периоде

Примечания: пунктирными линиями обозначен потенциальный объем поставки, если  $k_0 = 1$ ;  $\lambda(T) - D$  — объем поступления запаса;  $D_1, D_2, D(\eta)$  — объем спроса в рамках циклов;  $S$  — накопленный дефицит;  $0 \leq t \leq T_1$  — период поступления запаса;  $T_1 \leq t \leq T_2$  — период расхода запаса;  $T_2 \leq t \leq T_3$  — период накопления дефицита;  $t = T$  — завершение первого цикла.

клиента. Потерянный спрос в таком случае выражается как  $1 - D(\eta)$ .

Некоторые исследователи определяют скорость сокращения числа клиентов, готовых дождаться восполнения дефицита, в соответствии с экспоненциальной функцией. Принимая во внимание особенности рынка скоропортящегося сырья, готовность клиентов ожидать новой поставки рассматривается как снижающаяся линейная зависимость от возрастания времени ожидания.

В таком случае коэффициент уменьшения ожидающих клиентов определяется уравнением:

$$D(\eta) = \frac{k_0}{1 + k_1 \eta}, \quad (18)$$

где  $k_0$  — статистическая вероятность готовых ожидать клиентов;  $k_1 = 1 - k_0$ ,  $0 < k_0 < 1$ ,  $0 < k_1 < 1$ .

На рис. 5 отражено движение запаса для второго сценария. Из графика видно, что период поступления нового заказа для обоих случаев идентичен ( $T_5$ ), однако объем отличается на величину потерянного спроса ( $S(1 - D(\eta))$ ), в результате чего сокращается протекание второго цикла и момент повторного заказа для последующих периодов наступает раньше ( $T_6 < T_6^*$ ).

Принимая во внимание периоды наличия дефицита и наличия запаса, необходимость организации увеличенного заказа, целевая функция может быть задана в следующем виде:

$$\frac{C_p}{T_5 - T_3} + \frac{C_h D_2}{2} \cdot \frac{T_6 - T_5}{T} + C_s \cdot (D_2 + S) + \frac{C_d S}{2} \cdot \frac{T_5 - T_3}{T} + C_y (Q_{T_6} - Q_{T_4}) \rightarrow \min. \quad (19)$$

Тогда оптимальная партия поставки, учитывающая параметры отложенного

спроса и динамику ухудшения качества запаса, будет описана в такой модели:

$$q = \sqrt{\frac{2DC_p C_d}{C_h(C_h + C_d) + C_s \alpha \beta t^{\beta-1} \psi_i}}. \quad (20)$$

При этом спрос будет представлен как совокупность потребности производства в период  $T_4 \leq t \leq T_6$  и размера дефицита, уменьшенного на потерянный спрос  $1 - D(\eta)$ .

Стоимостные параметры, составляющие модифицируемой зависимости, определения оптимальной партии поставки (20), могут быть уточнены с применением параметра времени, сокращение которого позволяет минимизировать суммарные затраты на реализацию цикла пополнения скоропортящегося запаса. Тогда объем поступления запаса на втором этапе цикла будет определяться так:

$$Q(t) = \left[ \lambda(T) - \left( D_2 + S \frac{k_0}{1 + k_1 \eta} \right) \right] \times \left[ t + \frac{\alpha t^{\beta+1}}{\beta + 1} \right] \cdot e^{-\alpha t^\beta}. \quad (21)$$

При этом объем производственного спроса в период  $T_2$  будет определяться зависимостью:

$$Q(t) = - \left( D_2 + S \frac{k_0}{1 + k_1 \eta} \right) \times \left[ (t - T_6) + \frac{\alpha}{\beta + 1} \cdot (t^{\beta+1} - T_6^{\beta+1}) \right] e^{-\alpha t^\beta}. \quad (22)$$

Максимальный запас будет достигнут в момент времени  $T_5$ , когда завершится его транспортировка на производственное предприятие:

$$Q(T) = \left[ \lambda(T) - \left( D_2 + S \frac{k_0}{1 + k_1 \eta} \right) \right] \times \left[ T_5 + \frac{\alpha T_5^{\beta+1}}{\beta + 1} \right] \cdot e^{-\alpha T_5^\beta}. \quad (23)$$

На основе полученных закономерностей далее определим изменения в составляющих совокупных затрат за единицу вре-

мени во втором сценарии. Поскольку часть заказа в размере  $S \cdot (1 - D(\eta))$  будет потреблена непосредственно при поступлении для покрытия дефицита, затраты на хранение останутся неизменны. Затраты на пополнение запаса за единицу времени также будут принимать прежний вид, поскольку выносится предположение, что они не зависят от объема заказа. Затраты на закупку будут увеличены на величину дефицита и примут вид  $C_s(t) = C_s \cdot (D_2 + S \cdot (1 - D(\eta)))$ . Затраты, связанные с потерей потребительских свойств сырья, возрастут в связи с увеличением поставляемой партии, а размер заказа будет включать две составляющие:  $Q(t) = Q_D(t) + Q_S(t)$ . Стоимость дефицита снизится благодаря изменению структуры ее составляющих. Если в первом сценарии потери от дефицита включали в себя полную упущенную прибыль с продаж, то во втором потери от дефицита включают упущенную прибыль с продаж в меньшем объеме в результате потери спроса  $D(\eta)$  и затраты, связанные с несвоевременностью обеспечения спроса в размере  $1 - D(\eta)$ .

### Применение адаптированной модели управления запасами в условиях возникновения сбоев

Современное состояние цепей поставок производственных предприятий (географический дисбаланс, развитие производственных мощностей, неоднородность развития логистической инфраструктуры), особенности скоропортящегося сырья (малые сроки хранения, высокие требования предприятий по свежести запаса), а также высокая конкуренция на рынке свидетельствуют о необходимости формирования методов принятия решений в условиях неопределенности и рисков возникновения сбоев при управлении скоропортящимися запасами. Исходя из этого в работе проводится численный эксперимент применения сформулированных ранее моделей в рамках ряда сценариев, которые позво-

ляют учитывать возможные потери с определенной вероятностью возникновения сбоев при допущении дефицита.

В модели в качестве неопределенных принимаются параметры: объем потребления за период —  $D$ , величина дефицита —  $S$ , затраты, связанные с ухудшением качества запаса, —  $C_y$ , а также вероятность отказов в цепи поставок  $\alpha$ , поскольку фактор сбоев оказывает наибольшее влияние на возникновение и размер потерь.

Для каждого из анализируемых параметров учитываются два сценария: с запланированным дефицитом скоропортящегося запаса без покрытия в следующем периоде (первый) и с запланированным

дефицитом с покрытием в следующем периоде (второй). Для каждого сценария задаются условия вероятности возникновения сбоев и отказов на промежутке  $0,001 < \alpha < 0,035$ . Он позволяет оценить динамику темпов ухудшения качества запаса в зависимости от их уровня и совокупных затрат. Исходные значения параметров модели представлены в табл. 2.

Основываясь на представлении, что функции затрат отражают результат, в котором параметры модели являются стратегическими решениями, целесообразно выявить влияние изменения параметров модели на заданное оптимальное решение.

Приведенные сценарии демонстрирует чувствительность параметров оптималь-

Таблица 2

## Основные параметры анализируемой модели: сценарии 1 и 2

Параметр	Описание параметра	Сценарий 1	Сценарий 2
$D$	Потребление скоропортящегося сырья за период, л	95 000	95 000
$\lambda$	Интенсивность поступления сырья, л	75 000	75 000
$C_h$	Затраты на хранение единицы запаса, руб./л	5,15	5,15
$C_s$	Затраты на закупку скоропортящегося сырья и организацию заказа, руб./л	39,95	39,95
$C_p$	Затраты на пополнение запаса в расчете на каждую поставку, руб.	15 000	15 000
$C_d$	Стоимость дефицита за единицу запаса, руб./л	12,85	7,95
$\psi$	Понижающий коэффициент, отражающий затраты на утилизацию единицы испорченного запаса, руб./л	0,97	0,97
$\beta$	Коэффициент масштаба, используемый при определении параметров распределения Вейбулла	2	2
$k_0, k_1$	Коэффициент сохранения числа клиентов, готовых ожидать новую поставку	–	0,85
$\eta$	Время ожидания клиентом новой поставки при возникновении дефицита, час.	–	0,75
$T_1$	Время поставки партии запаса на производство, дни	0,20	0,20

*Примечание:* прочерк обозначает, что в рамках сценария 1 не учитывается вероятность сохранения отложенного спроса, поскольку дефицит не покрывается при последующих поставках, поэтому параметры  $\eta$  и  $k_0, k_1$  не могут быть заданы.

Таблица 3

**Изменение скорости снижения качества сырья: зависимость от уровня запасов и суммарных затрат**

Сценарий	$T$	$T_1$	$T_2$	$\alpha$	$q$	$C_s$	$C_p$	$C_h$	$C_y$	$C_d$	$C_\psi$	$C_r$
Сценарий 1	0,74	0,20	0,54	0,001	548,40	3795,30	20,30	20,50	0,01	8,81	0,11	3845,00
	0,61	0,20	0,41	0,01	499,80	3795,30	24,50	19,60	0,17	10,65	0,11	3850,30
	0,50	0,20	0,30	0,03	436,70	3795,30	30,20	12,00	0,61	13,12	0,11	3851,30
Сценарий 2	0,74	0,20	0,54	0,001	120,0	4560,50	20,20	39,10	0,016	5,41	0,137	4625,30
	0,61	0,20	0,41	0,01	199,5	4560,50	23,60	23,40	0,191	6,33	0,137	4614,10
	0,50	0,20	0,30	0,03	330,4	4560,50	28,60	14,70	0,695	7,67	0,137	4612,20

Примечания:  $T_1, T_2, \dots, T_n, T$  — время выполнения этапа цикла.

ного объема заказа ( $q$ ), периодов ( $T_1, T_2, \dots, T_n$ ) и времени цикла ( $T$ ) от увеличения значения параметра, отражающего уровень риска ( $\alpha$ ). Эти параметры показывают тенденцию к снижению, в то время как стоимость дефицита ( $C_d$ ) и суммарные затраты ( $C_r$ ) увеличиваются. В то же время на рост стоимости дефицита ( $C_d$ ) и совокупных затрат ( $C_r$ ) влияет увеличение стоимости заказа единицы продукции ( $C_s$ ), объема заказа ( $q$ ) а также времени цикла ( $T$ ). На снижение оптимального объема заказа ( $q$ ) и времени цикла и периодов ( $T_1, T_2, \dots, T_n, T$ ) оказывает воздействие увеличение стоимости хранения единицы запаса на складе ( $C_h$ ).

Результаты решения задачи определения оптимальной партии заказа для сценария с разным уровнем дефицита скоропортящегося запаса приведены в табл. 3.

Условие принятия риска потерянных продаж вследствие возникновения дефицита скоропортящегося запаса приводит к максимизации стоимости дефицита ( $C_d$ ) и оптимальной партии поставки ( $q$ ), в сравнении с другими сценариями. При этом минимизируются стоимость закупки сырья ( $C_s$ ) и затраты на его хранение ( $C_h$ ).

Полное покрытие дефицита запаса в следующем периоде позволяет сократить стоимость дефицита ( $C_d$ ), однако увеличивает стоимость хранения ( $C_h$ ), затраты,

связанные с потерей потребительских свойств запасом ( $C_y$ ) и утилизацией ( $\psi$ ). Суммарные затраты ( $C_r$ ) отмечаются как более высокие в сравнении первым сценарием. Однако необходимо понимать, что покрытие дефицита определяет более высокий уровень логистического сервиса, снижение которого оказывает влияние на потерю лояльности клиентов. Стоимость мягких издержек не оценивается в данной модели, однако в перспективе может принести более высокий негативный эффект в первом сценарии.

Влияние вероятности возникновения сбоев для всех анализируемых моделей отражается в росте суммарных затрат в среднем на 0,03% при увеличении параметра  $\alpha$  на 0,001.

Для практического применения в рамках производственных предприятий в целях планирования полученные результаты предполагают возможность спрогнозировать объемы потерь скоропортящегося запаса вследствие ухудшения его качества, основываясь на знании темпов производственного потребления, вероятности возникновения сбоев и нарушений цепи поставок на каком-либо из этапов. Исходя из статистики потерь скоропортящегося запаса на примере сырого молока применение адаптированных моделей позволило бы сохранить за первые три квартала 2022 г. порядка 18,5% от общего

произведенного на территории России объема, оказавшегося не потребленным своевременно<sup>2</sup>.

Кроме того, применение рассматриваемых в работе модифицированных моделей дает возможность спрогнозировать потенциальный объем дефицита и сформировать стратегии реагирования на его накопление, соответствующие целям и задачам предприятия, а именно — запланировать частичное или полное покрытие дефицита в последующих периодах или продолжать деятельность в условиях принятия риска без дальнейшего удовлетворения спроса.

Таким образом, совершенствование теоретических моделей определения оптимальной партии поставки в соответствии с заявленными параметрами в практике планирования производственных предприятий позволяет более эффективно прогнозировать и распределять объем необходимых инвестиций на управление запасом.

## ВЫВОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ современных тенденций непрерывно модифицирующихся рыночных отношений, логистических концепций снабжения и управления запасами производственных предприятий, а также особенностей скоропортящегося сырья выявил потребность в совершенствовании моделей управления запасами с малыми сроками хранения.

Основываясь на этом, в исследовании формализована основная особенность скоропортящегося запаса — непрерывное ухудшение органолептических, физико-химических, потребительских свойств, начиная с момента его производства. Получена формула определения оптимального размера заказа на базе модификации модели Харриса–Уилсона, учитывающая

такие параметры, как подверженность запаса процессам ухудшения качества, вероятность возникновения сбоев и поломок на этапе снабжения, возможность возникновения дефицита в рамках сценариев с отложенным удовлетворением и с применением стратегии принятия предприятием данного риска.

В завершении исследования проведен численный эксперимент и определена чувствительность параметров модели, результаты которой могут быть применены для совершенствования стратегий управления запасами в других отраслях народного хозяйства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования управления скоропортящимся запасом демонстрируют необходимость совершенствования и адаптации существующих моделей и методов путем их модификации в соответствии с особенностями используемых сырья и материалов, а также видом предприятия.

Анализ скоропортящегося сырья как запаса позволил определить его наиболее важные характеристики. Данный вид запаса имеет непрерывную динамику потери потребительских свойств, которая может быть выражена линейно возрастающей функцией, что выделяет как наиболее важные факторы при работе с ним время перемещения и хранения до момента потребления, а также надежность логистической системы, возникновение сбоев в которой способно привести к частичной или полной потере запаса. Это позволяет вести речь о том, что управление скоропортящимся запасом требует включения дополнительных оптимизационных параметров в модель определения оптимальной партии поставки.

Рассмотрение публикаций научных периодических изданий продемонстрировало заинтересованность практиков и исследователей в формировании адаптированных

<sup>2</sup> Nielsen Retail Audit Report 2022. [Электронный ресурс]. <https://nielseniq.com/global/ru/insights/> (дата обращения: 15.01.2023).

моделей управления скоропортящимся запасом, в частности модели ЕОQ. Все выявленные исследования классифицируются в соответствии с критериальными функциями, анализ которых позволил определить наиболее изученные (модели, учитывающие факторы ценообразования, применения дифференцированных форм оплаты и т. д.), а также требующие проведения дополнительных исследований.

Таким образом, был получен вывод о том, что управление скоропортящимся запасом с учетом производственного аспекта затрагивается в незначительном количестве исследований. При этом работ, одновременно применяющих такие критериальные функции, как накопление дефицита и вероятность возникновения сбоев на этапе перемещения запаса от поставщика до производственных линий, практически не представлено.

Основываясь на выявленных особенностях скоропортящегося запаса, а также на анализе современных теоретических разработок в качестве принимаемых ограничений адаптационной модели, были выделены параметры оптимизации — вероятность возникновения сбоев на этапе снабжения производственного предприятия, стратегия управления дефицитом.

Приведенная в работе адаптационная модель ЕОQ учитывает такие факторы,

как ограниченные сроки хранения запаса, производственный аспект, и два сценария управления дефицитом — принятие риска и полное его покрытие при последующих поставках. Рассмотренные сценарии анализируются при неопределенных параметрах (размера дефицита и стоимости управления непригодным запасом), заданных начальными величинами. Однако в рамках практического применения модели эти величины могут быть уточнены и представлены в виде группы сценариев (с низким, умеренным и высоким уровнем) в зависимости от поставленной задачи и особенностей логистической цепи предприятия.

Дальнейшие направления анализа могут быть связаны с расширением и уточнением возможных критериальных функций модифицируемых моделей определения оптимальной партии заказа в соответствии с заданными параметрами. Исследование продемонстрировало, что на современном этапе в научных публикациях охвачены не все востребованные направления и сохраняется ряд направлений, таких как управление скоропортящимся запасом в рамках производственного предприятия с учетом одновременного возникновения дефицита и применения отложенных платежей и т. д., требующих адаптации классической модели ЕОQ.

## ЛИТЕРАТУРА НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

- Ипатьева И. А., Эльяшевич И. П. 2022. Модели и методы управления запасами скоропортящихся сырья и материалов: обзор публикаций с 2016 по 2021 г. *Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика* (3): 177–231.
- Лукинский В. С., Лукинский В. В., Плетнева Н. Г., Воробьева Н. И., Маевский А. Г. 2022. *Управление запасами в цепях поставок в 2 ч. Часть 1. Учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры*. Рук.: В. С. Лукинский; под общ. ред.: В. С. Лукинский. М.: Юрайт.
- Лукинский В. С., Плетнева Н. Г. 2010. *Проблемы формирования прикладной теоретической модели управления запасами в цепях поставок*. Рук.: В. С. Лукинский; под общ. ред.: В. С. Лукинский. М.: Юрайт.
- Лукинский В. С., Воробьева Н. И., Маевский А. Г. 2022. *Управление запасами в цепях поставок в 2 ч. Часть 2. Учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры*. Рук.: В. С. Лукинский; под общ. ред.: В. С. Лукинский. М.: Юрайт.
- Лукинский В. С., Плетнева Н. Г. 2010. *Проблемы формирования прикладной теоретической модели управления запасами в цепях поставок*. Рук.: В. С. Лукинский; под общ. ред.: В. С. Лукинский. М.: Юрайт.

рии логистики и управления цепями поставок. Под общ. и научн. ред. В. С. Лукинскогo и Н. Г. Плетневоy: Монография. СПб.: СПбГИЭУ.

Продукты животноводства и сельскохозяйственных культур Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций. [Электронный ресурс]. <https://www.fao.org/faostat/> (дата обращения: 12.07.2022).

Сергеев В. И., Эльяшевич И. П. 2020. *Логистика снабжения: учебник для вузов*. М.: Юрайт.

Эльяшевич И. П. 2020а. *Управление логистическими затратами в материально-техническом снабжении производственных и торговых компаний. Развитие экономических систем в цифровой экономике: маркетинг, сфера услуг, логистика*, 186–202. М.: Русайнс.

Эльяшевич И. 2020б. Методы корреляционного анализа при планировании потребности в запасах и управлении поставщиками. *Логистика и управление цепями поставок* (2): 58–64.

## REFERENCES IN LATIN ALPHABET

Acevedo-Ojeda A., Contreras I., Chen M. 2020. Two-level lot-sizing with raw-material perishability and deterioration. *Journal of the Operational Research Society* **71** (3): 417–432.

Alfares H. K., Ghaithan A. M. 2019. EOQ and EPQ production-inventory models with variable holding cost: State-of-the-art review. *Arabian Journal for Science and Engineering* **44**: 1737–1755.

Ali S. S., Barman H., Kaur R., Tomaskova H., Roy S. K. 2021. Multi-product multi echelon measurements of perishable supply chain: Fuzzy non-linear programming approach. *Mathematics* **9** (17): 2093. <https://doi.org/10.3390/math9172093>

Avinadav T. 2020. The effect of decision rights allocation on a supply chain of perishable products under a revenue-sharing contract. *International Journal of Production Economics* **225**: 107587. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107587>

Avinadav T., Chernonog T., Lahav Y., Spiegel U. 2017. Dynamic pricing and promotion expenditures in an EOQ model of perishable products. *Annals of Operations Research* **248** (1–2): 75–91.

Bakker M., Riezebos J., Teunter R. H. 2012. Review of inventory systems with deterioration since 2001. *European Journal of Operational Research* **221** (2): 275–284.

Barman A., Das R., De P. K. 2021. Optimal pricing, replenishment scheduling, and preservation technology investment policy for multi-item deteriorating inventory model under shortages. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing* **12** (05): 2150039. <https://doi.org/10.1142/S1793962321500392>

Chakraborty D., Jana D. K., Roy T. K. 2018. Two-warehouse partial backlogging inventory model with ramp type demand rate, three-parameter Weibull distribution deterioration under inflation and permissible delay in payments. *Computers & Industrial Engineering* **123**: 157–179.

Chang C. T., Ouyang L. Y., Teng J. T., Lai, K. K., Cárdenas-Barrón L. E. 2019. Manufacturer's pricing and lot-sizing decisions for perishable goods under various payment terms by a discounted cash flow analysis. *International Journal of Production Economics* **218**: 83–95.

Choudhury K., Karmakar B., Das M., Datta T. K. 2015. An inventory model for deteriorating items with stock-dependent demand, time-varying holding cost and shortages. *Opsearch* **52**: 55–74.

Choudhury M., De S. K., Mahata G. C. 2021. Pollution-sensitive integrated production-inventory management for deteriorating items with quality loss and quantity loss

- with expiration date. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics* 1–23.
- Feng L., Wang W.C., Teng J.T., Cárdenas-Barrón L.E. 2022. Pricing and lot-sizing decision for fresh goods when demand depends on unit price, displaying stocks and product age under generalized payments. *European Journal of Operational Research* **296** (3): 940–952.
- Giri B.C., Bardhan S. 2016. Coordinating a two-echelon supply chain with price and inventory level dependent demand, time dependent holding cost, and partial backlogging. *International Journal of Mathematics in Operational Research* **8** (4): 406–423.
- Giri B.C., Goswami A., Chaudhuri K.S. 1996. An EOQ model for deteriorating items with time varying demand and costs. *Journal of the Operational Research Society* **47** (11): 1398–1405.
- Giri B.C., Chaudhuri K.S. 1998. Deterministic models of perishable inventory with stock-dependent demand rate and nonlinear holding cost. *European Journal of Operational Research* **105** (3): 467–474.
- Goh M. 1994. EOQ models with general demand and holding cost functions. *European Journal of Operational Research* **73** (1): 50–54.
- Goyal S.K., Giri B.C. 2001. Recent trends in modeling of deteriorating inventory. *European Journal of Operational Research* **134** (1): 1–16.
- Gupta M., Tiwari S., Jaggi C.K. 2020. Retailer's ordering policies for time-varying deteriorating items with partial backlogging and permissible delay in payments in a two-warehouse environment. *Annals of Operations Research* **295** (1): 139–161.
- Hanukov G., Avinadav T., Chernonog T., Yechiali U. 2021. A multi-server system with inventory of preliminary services and stock-dependent demand. *International Journal of Production Research* **59** (14): 4384–4402.
- Harris F.W. 1913. How many parts to make at once. *Factory, the Magazine of Management* **10**: 135–136.
- Hidayat Y.A., Kasanah A.R., Yudhistira T. 2016. The application of EOQ and lead time crashing cost models in material with limited lifetime (Case study: CN-235 Aircraft at PT Dirgantara Indonesia). In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 114, No. 1, p.012077). IOP Publishing.
- Jani M.Y., Betheja M.R., Chaudhari U., & Sarkar B. 2021. Optimal investment in preservation technology for variable demand under trade-credit and shortages. *Mathematics* **9** (11): 1301. <https://doi.org/10.3390/math9111301>
- Kumar K., Kumar S., Meenu. 2020. Inventory control policy with two-warehouse, various demand, shortages, trade credit and fuzzy environment revisited. *Achievements and Applications in the Mathematical Sciences* **19** (10): 987–1016.
- Kuppulakshmi V., Sugapriya C., Pillai N.D. 2021. An inventory model for fish marketing under uncertain lockdown situation and normal backordering situation. *Journal of Advances in Management Research*.
- Kurade S.S., Latpate R. 2021. Demand and deterioration of items per unit time inventory models with shortages using genetic algorithm. *Journal of Management Analytics* **8** (3): 502–529.
- Lee Y.P., Dye C.Y. 2012. An inventory model for deteriorating items under stock-dependent demand and controllable deterioration rate. *Computers & Industrial Engineering* **63** (2): 474–482.
- Li R., Liu Y., Teng J.T., Tsao Y.C. 2019. Optimal pricing, lot-sizing and backordering decisions when a seller demands an advance-cash-credit payment scheme. *European Journal of Operational Research* **278** (1): 283–295.
- Luong H., Karim R. 2017. An integrated production inventory model of deteriorating items subject to random machine breakdown with a stochastic repair time. *International Journal of Industrial Engineering Computations* **8** (2): 217–236.
- Mahata G.C., Goswami A. 2009. Fuzzy EOQ models for deteriorating items with stock dependent demand and non-linear holding

- costs. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences* **5** (2): 94–98.
- Mawandiya B.K., Jha J.K., Thakkar J.J. 2020. Optimal production-inventory policy for closed-loop supply chain with remanufacturing under random demand and return. *Operational Research* **20** (3): 1623–1664.
- Mirkhorsandi S.S., Pasandideh S.H.R. 2020. A bi-objective multi-product multi-constraint epq model in a stochastic environment and partial shortage. *Journal of Advanced Manufacturing Systems* **19** (03): 567–587.
- Mishra V.K., Singh L.S., Kumar R. 2013. An inventory model for deteriorating items with time-dependent demand and time-varying holding cost under partial backlogging. *Journal of Industrial Engineering International* **9**: 1–5.
- Mohammadi H., Ghazanfari M., Pishvae M.S., Teimoury E. 2019. Fresh-product supply chain coordination and waste reduction using a revenue-and-preservation-technology-investment-sharing contract: A real-life case study. *Journal of Cleaner Production* **213**: 262–282.
- Mondal B., Garai A., Mukhopadhyay A., Majumder S.K. 2021. Inventory policies for seasonal items with logistic-growth demand rate under fully permissible delay in payment: a neutrosophic optimization approach. *Soft Computing* **25** (5): 3725–3750.
- Nielsen Retail Audit Report 2022. [Electronic resource]. <https://nielseniq.com/global/ru/insights/> (accessed: 15.01.2023).
- Nguyen D.H., Chen H. 2020. An effective approach for optimization of a perishable inventory system with uncertainty in both demand and supply. *International Transactions in Operational Research*. <https://doi.org/10.1111/itor.12846>
- Patriarca R., Di Gravio G., Costantino F., & Tronci M. 2020. EOQ inventory model for perishable products under uncertainty. *Production Engineering* **14** (5): 601–612.
- Pattnaik M., & Gahan P. 2018. Impact of publicity effort and variable ordering cost in multi-product order quantity model of units lost sales due to deterioration. *Log-Forum* **14** (3): 407–424.
- Paul A., Rajapakshe T., Mallik S. 2019. Socially optimal contracting between a regional blood bank and hospitals. *Production and Operations Management* **28** (4): 908–932.
- Poursoltan L., Seyedhosseini S.M., Jabbarzadeh A. 2020. An extension to the economic production quantity problem with deteriorating products considering random machine breakdown and stochastic repair time. *International Journal of Engineering* **33** (8): 1567–1578.
- Rani S., Ali R., Agarwal A. 2019. Fuzzy inventory model for deteriorating items in a green supply chain with carbon concerned demand. *Opsearch* **56** (1): 91–122.
- Rout C., Kumar R.S., Chakraborty D., Goswami A. 2019. An EPQ model for deteriorating items with imperfect production, inspection errors, rework and shortages: A type-2 fuzzy approach. *Opsearch* **56** (3): 657–688.
- Roy A. 2008. An inventory model for deteriorating items with price dependent demand and time varying holding cost. *Advanced Modeling and Optimization* **10** (1): 25–37.
- Saren S., Sarkar B., Bachar R.K. 2020. Application of various price-discount policy for deteriorated products and delay-inpayments in an advanced inventory model. *Inventions* **5** (3): 50. <https://doi.org/10.3390/inventions5030050>
- Sayal A., Singh A.P., Aggarwal D. 2018. Crisp and fuzzy EOQ model for perishable items with ramp type demand under shortages. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences* **14** (1): 441–452.
- Sepehri A. 2021. Optimizing the replenishment cycle and selling price for an inventory model under carbon emission regulation and partially permissible delay in payment. *Process Integration and Optimization for Sustainability* **5**: 577–597.
- Sharma S., Singh S., Singh S.R. 2018. An inventory model for deteriorating items with expiry date and time varying holding cost. *International Journal of Procurement Management* **11** (5): 650–666.

- Suryawanshi P., Dutta P. 2021. Distribution planning problem of a supply chain of perishable products under disruptions and demand stochasticity. *International Journal of Productivity and Performance Management* **72** (1): 246–278.
- Tiwari S., Cárdenas-Barrón L. E., Goh M., Shaikh A. A. 2018. Joint pricing and inventory model for deteriorating items with expiration dates and partial backlogging under two-level partial trade credits in supply chain. *International Journal of Production Economics* **200**: 16–36.
- Tiwari S., Cárdenas-Barrón L. E., Khanna A., Jaggi C. K. 2016. Impact of trade credit and inflation on retailer's ordering policies for non-instantaneous deteriorating items in a two-warehouse environment. *International Journal of Production Economics* **176**: 154–169.
- Tripathi R. P. 2018. Deterministic inventory models with nonlinear time-dependent and stock-dependent holding cost under non-increasing time-sensitive demand. *International Journal of Economics and Business Research* **16** (3): 326–336.
- Udayakumar R., Geetha K. V., Sana S. S. 2021. Economic ordering policy for non-instantaneous deteriorating items with price and advertisement dependent demand and permissible delay in payment under inflation. *Mathematical Methods in the Applied Sciences* **44** (9): 7697–7721.
- Ullah M., Sarkar B., Asghar I. 2019. Effects of preservation technology investment on waste generation in a two-echelon supply chain model. *Mathematics* **7** (2): 189.
- Vahdani M., Sazvar Z., Govindan K. 2021. An integrated economic disposal and lot-sizing problem for perishable inventories with batch production and corrupt stock-dependent holding cost. *Annals of Operations Research* 1–33.
- Yang H. L. 2021. Retailer's ordering policy for demand depending on the expiration date with limited storage capacity under supplier credits linked to order quantity and discounted cash flow. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics* **8** (2): 136–153.
- Zhang R. Q., Wu Y. L., Fang W. G., Zhou W. H. 2016. Inventory model with partial back-ordering when backordered customers delay purchase after stockout-restoration. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2016/6425403>

## Translation of references in Russian into English

- Ipatyeva I. A., Elyashevich I. P. 2022. Models and methods for managing stocks of perishable raw materials and materials: a review of publications from 2016 to 2021. *Moscow University Bulletin. Series 6. Economics* (3): 177–231. (In Russian)
- Lukinskiy V. S., Lukinskiy V. V., Pletneva N. G., Vorobieva N. I., Maevisky A. G. 2022. *Inventory Management in Supply Chains at 2h Part 2*. Textbook and workshop for bachelor's and master's degrees. Leader: V. S. Lukinskiy; under total Ed.: V. S. Lukinskiy. Moscow: Yurait Publ. (In Russian)
- Lukinskiy V. S., Lukinskiy V. V., Pletneva N. G., Vorobieva N. I., Maevisky A. G. 2022. *Inventory Management in Supply Chains at 2 hrs. Part 1. Textbook and workshop for bachelor's and master's degrees*. Leader: V. S. Lukinskiy; under total Ed.: V. S. Lukinskiy. Moscow: Yurait Publ. (In Russian)
- Lukinskiy V. S., Pletneva N. G. 2010. *Problems of formation of the applied theory of logistics and supply chain management. Under total and scientific*. Monograph. V. S. Lukinskiy and N. G. Pletneva (eds). St. Petersburg: SPbGIEU Publ. (In Russian)
- Livestock and crop products. the Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Electronic resource]. <https://www.fao.org/faostat/> (accessed: 12.07.2022). (In Russian)

- Sergeev V.I., Elyashevich I.P. 2020. *Supply Logistics: A Textbook for Universities*. Moscow: Yurayt Publ. (In Russian)
- Elyashevich I.P. 2020a. *Management of logistics costs in the logistics of manufacturing and trading companies. Development of economic systems in the digital economy: marketing, services, logistics*, 186–202. Moscow: Rusajns Publ. (In Russian)
- Elyashevich I.P. 2020b. Correlation Analysis Methods in Inventory Planning and Supplier Management. *Logistics and Supply Chain Management* (2): 58–64. (In Russian)

*Статья поступила в редакцию  
8 февраля 2023 г.*

*Принята к публикации  
10 апреля 2023 г.*

---

## ***Perishable inventory management in manufacturing during logistics disruptions***

***I. A. Ipateva***

*Graduate School of Business, HSE University, Russia*

**Goal:** to analyze the features of the perishable raw materials management at a manufacturing enterprise, determine the key factors affecting the inventory management efficiency and, in accordance with them, adapt the classical model for determining the optimal delivery batch.

**Methodology:** an empirical study of the factors was carried out using a critical analysis of the scientific literature; model formalization was implemented using mathematical methods for modeling rational systems in accordance with the algorithm for formulating optimization models, converted for perishable raw materials. **Findings:** key themes of model modifications for manufacturing enterprises were identified; the required model is formulated; a numerical experiment was carried out and the sensitivity of the model parameters was revealed, the results of which can be applied to improve inventory management strategies in other sectors of the national economy. **Originality and contribution of the author:** for the first time in Russia, this study presents an adapted model for determining the optimal delivery lot, which simultaneously takes into account such parameters as the susceptibility of the stock to quality deterioration processes, the likelihood of failures and breakdowns at the supply stage, the possibility of shortages under scenarios with delayed full or partial satisfaction, as well as with the application of the strategy of acceptance of this risk by the enterprise.

**Keywords:** manufacturing, shortage, disruptions, losses, perishable stock, EOQ model, optimal delivery lot.

**For citation:** Ipateva I.A. 2023. Perishable inventory management in manufacturing during logistics disruptions. *Russian Management Journal* **21** (1): 39–65. <https://doi.org/10.21638/spbu18.2023.103> (In Russian)

**Для цитирования:** Ипатьева И.А. 2023. Управление запасом скоропортящегося сырья на производственном предприятии при логистических сбоях. *Российский журнал менеджмента* **21** (1): 39–65. <https://doi.org/10.21638/spbu18.2023.103>

*Initial Submission: February 8, 2023  
Final Version Accepted: April 10, 2023*