 © Авторы статьи / Authors of the article

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ/AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTION

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.102 EDN: YALNUP

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КАК ЭЛЕМЕНТ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА КАБЕЛЬНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Научная статья

Черных О.Н.[1, *], Афанасьев А.В.[2]
[1] ORCID : 0000-0001-6275-5896;
[1] Самарский государственный экономический университет, Самара, Российская Федерация
[2] Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (chernykh_on[at]mail.ru)

Предложена: 12.07.2026; Принята: 13.11.2026; Опубликована: 17.11.2026

Аннотация

В статье обоснована актуальность применения имитационного моделирования для анализа производственно-логистических систем в кабельной промышленности. Разработана дискретно-событийная модель типового предприятия по выпуску кабелей с ПВХ-изоляцией, включающая шесть блоков: склад сырья, экструзию, свивку, отжиг, контроль качества и склад готовой продукции. Учтены случайные вариации времени обработки, отказов оборудования, доли брака и времени поставки. Для управления запасами применена (s, S)-политика. Результаты моделирования демонстрируют распределение уровня незавершенного производства и вероятности дефицита, что позволяет количественно оценить логистические риски. Показано, что, в отличие от существующих работ, сосредоточенных либо на оптимизации технологических параметров, либо на визуализации цифрового двойника, предлагаемая модель интегрирует управление запасами в контуре производственно-логистической системы и обеспечивает количественную оценку рисков переполнения буферов и дефицита. Сделан вывод, что имитационный подход превосходит аналитические методы в условиях нестационарных возмущений.

Ключевые слова: имитационное моделирование, кабельное производство, экструзия ПВХ, управление запасами, незавершенное производство, дискретно-событийная модель, логистические риски.

A SIMULATION MODEL AS A COMPONENT OF THE DIGITAL TWIN OF A CABLE PRODUCTION AND LOGISTICS SYSTEM

Research article

Chernykh O.N.[1, *], Afanasev A.V.[2]
[1] ORCID : 0000-0001-6275-5896;
[1] Samara State University of Economics, Samara, Russian Federation
[2] Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (chernykh_on[at]mail.ru)

Suggested: 12.07.2026; Accepted: 13.11.2026; Published: 17.11.2026

Abstract

The article substantiates the relevance of using simulation modelling to analyse production and logistics systems in the cable industry. A discrete-event model of a typical enterprise producing PVC-insulated cables has been developed, consisting of six units: raw materials warehouse, extrusion, twisting, annealing, quality control and finished products warehouse. Random variations in processing time, equipment failures, the defect rate and delivery times have been taken into account. An (s, S) policy has been applied for inventory control. The simulation results demonstrate the distribution of work-in-progress levels and the probability of shortages, which allows for a quantitative assessment of logistical risks. It is shown that, unlike existing studies which focus either on optimising process parameters or on visualising a digital twin, the suggested model integrates inventory management into the production-logistics system loop and provides a quantitative assessment of the risks of buffer overflows and shortages. It is concluded that the simulation-based approach outperforms analytical methods under conditions of non-stationary disturbances.

Keywords: simulation modelling, cable manufacturing, PVC extrusion, inventory management, work in progress, discrete-event model, logistics risks.

Введение

Производство кабельно-проводниковой продукции является системообразующим звеном электротехнической промышленности, обеспечивающим функционирование ключевых отраслей экономики — от генерации и транспортировки электроэнергии до строительства, транспортной инфраструктуры и телекоммуникаций [1, С. 12-15]. Технологический процесс изготовления кабелей представляет собой сложную многостадийную систему, отличающуюся высокой материалоёмкостью и значительной инерционностью. Типовая производственная цепочка включает операции волочения токопроводящей жилы, наложения изоляции (преимущественно экструзией полимеров,

 © Авторы статьи / Authors of the article

например, ПВХ-пластиката), скрутку изолированных жил, наложение защитной оболочки, термообработку (отжиг) и финальный контроль качества.

Актуальность исследования обусловлена тем, что реальные производственные системы функционируют в условиях высокой неопределённости. На практике менеджеры сталкиваются с труднопрогнозируемыми возмущениями: вариабельностью времени обработки партий из-за микроколебаний скорости оборудования, внеплановыми простоями, стохастическим характером выхода брака, а также нестабильностью сроков поставки сырья. Дополнительным дестабилизирующим фактором выступает инерционность системы: даже после устранения причины сбоя требуется определённое время для возврата параметров процесса к номинальным значениям. В этих условиях традиционные аналитические подходы, включая классические модели теории массового обслуживания (например, одноканальная СМО M/M/1) или детерминированные модели управления запасами Уилсона, оперируют усреднёнными стационарными характеристиками [2, С. 412-418]. Они принципиально не позволяют количественно оценить риски переполнения межоперационных складов, частоту возникновения дефицита готовой продукции или вероятность срыва сроков поставки из-за случайного брака и логистических задержек, что подтверждает необходимость применения более гибких инструментов анализа.

Объектом исследования является производственный процесс изготовления кабельно-проводниковой продукции как стохастическая динамическая система. Предметом выступают закономерности влияния случайных возмущений и инерционных задержек на показатели эффективности поточного производства (ритмичность, загрузка оборудования, уровни незавершённого производства и готовой продукции).

Цель работы заключается в разработке имитационной модели производственной системы, позволяющей оценивать её поведение в условиях неопределённости и формировать обоснованные управленческие решения для минимизации производственных рисков.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести системный анализ технологического процесса и выделить критические точки возникновения стохастических возмущений и инерционных задержек.
2. Обосновать выбор инструментальной среды имитационного моделирования и разработать концептуальную модель системы.
3. Построить компьютерную модель, воспроизводящую динамику движения материальных потоков с учётом случайных факторов.
4. Реализовать сценарный анализ для оценки влияния вариативности входных параметров на выходные показатели.
5. Разработать практические рекомендации по управлению производственными запасами и минимизации простоев на основе результатов моделирования.

Научная новизна работы состоит в развитии методики имитационного моделирования применительно к кабельно-проводниковому производству, отличающейся комплексным учётом взаимосвязанных случайных факторов (технологические вариации, отказы оборудования, качество сырья) и запаздываний в контуре управления, что позволяет перейти от точечных оценок к распределениям вероятностей ключевых показателей.

Теоретическая значимость заключается в углублении научных представлений о динамике многостадийных инерционных систем с обратными связями и в адаптации методов дискретно-событийного моделирования для решения задач операционного менеджмента в условиях высокой неопределённости.

Практическая значимость работы определяется тем, что разработанная имитационная модель даёт менеджеру не единственное «среднее» значение, а целые распределения выходных показателей, что позволяет не просто планировать производственный график, но и количественно оценивать риски, связанные с неопределённостью [3, С. 105-112], [4, С. 74-81]. Полученные результаты могут быть использованы на предприятиях кабельной отрасли для оптимизации нормативов незавершённого производства, обоснования страховых запасов сырья и снижения потерь от внеплановых простоев.

Методы и принципы исследования

В основе исследования лежит метод дискретно-событийного моделирования (DES). Состояние системы изменяется только в моменты наступления событий (окончание обработки, отказ станка, поступление заявки), что ускоряет вычисления по сравнению с непрерывным шаговым методом [5, С. 206-210]. Агрегированной единицей материального потока принята «бухта готовой продукции» или килограммы материального потока.

Модель включает шесть основных блоков, соединённых последовательно (рис. 1):

 © Авторы статьи / Authors of the article

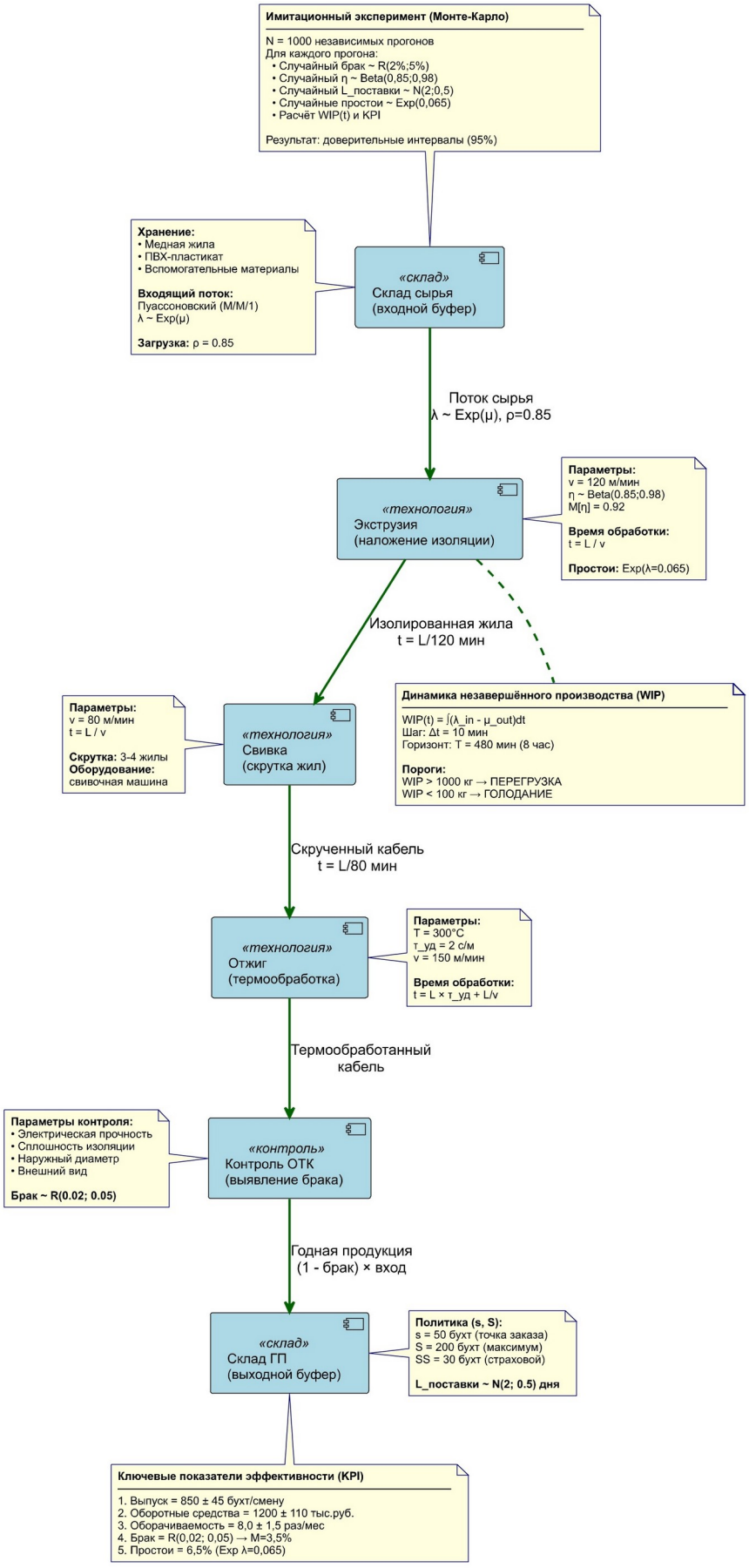

Рисунок 1 - Имитационная модель производственно-логистической системы КПП – шесть основных блоков

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.102.1

 © Авторы статьи / Authors of the article

1) Склад сырья (входной буфер). Хранятся медная проволока и ПВХ-пластикат в гранулах. Ёмкость склада в базовой версии считается неограниченной. Входящий поток заявок моделируется как пуассоновский (случайный) поток с интенсивностью λ, интервалы между поступлениями имеют экспоненциальное распределение [6, С. 298-305].

2) Экструзия (наложение изоляции). Червячная экструзионная линия включает экструдер, формующую головку, охлаждающую ванну и приёмное устройство. Паспортная скорость — 120 м/мин. Реальная скорость снижается из-за замены фильтров и регулировки температуры, что учитывается коэффициентом использования оборудования — случайной величиной с математическим ожиданием 0,85.

3) Свивка (скрутка изолированных жил). Несколько жил скручиваются вокруг сердечника на свивочной машине. Скорость свивки (80 м/мин) ниже скорости экструзии из-за сложной кинематики. Простои возникают при обрывах проволоки и замене катушек.

4) Отжиг (термообработка готового кабеля). Применяется для снятия внутренних напряжений в медных жилах. Кабель протягивается через трубчатую печь при температуре ~300°C. Полное время обработки партии складывается из постоянной составляющей (разогрев печи) и переменной, пропорциональной длине кабеля, где удельное время составляет 2 секунды на метр длины.

5) Контроль ОТК. Проверяется электрическая прочность, сплошность изоляции, наружный диаметр и внешний вид. Контроль — 100% неразрушающий. Брак безвозвратно удаляется из потока, его доля – случайная величина с равномерным распределением от 2% до 5% от объёма партии.

6) Склад готовой продукции (выходной буфер). Реализована (s, S)-политика управления запасами (min-max). Пока фактический запас выше порогового уровня s, пополнение не заказывается. Как только запас опускается ниже s, размещается заказ в количестве, доводящем запас до максимального уровня S. Время выполнения заказа — случайная величина.

Между этапами образуются очереди (заделы), описываемые переменной WIP (незавершённое производство). Время обслуживания на экструдере и свивке зависит от длины партии и флюктуирующей скорости. Время безотказной работы оборудования подчиняется экспоненциальному закону [7, С. 37-39].

Основные результаты

В ходе имитационного эксперимента за период, эквивалентный 30 календарным дням (720 часов), с периодом прогрева 24 часа получены следующие результаты.

1. Распределение WIP. Среднее значение незавершённого производства перед свивкой составило 15,6 бухт со стандартным отклонением 4,2 бухты. Максимальное значение достигло 28 бухт. При ёмкости склада 25 бухт вероятность переполнения составила 0,12. Распределение скошено вправо, что указывает на редкие, но значительные скопления заделов после длительных простоев экструдера. Этот результат согласуется с наблюдением T.A. Kurniawan и соавторов о доминирующей роли свивочного участка в формировании очередей, однако в нашем случае пики WIP генерируются корреляцией отказов экструдера и последующей неравномерностью подачи на свивку [12].

2. Эффективность (s, S)-политики. При s = 50 бухт и S = 150 бухт средний уровень запаса готовой продукции составил 112 бухт. Вероятность дефицита за период моделирования — 0,04. Среднее время выполнения заказа — 8,5 часов, однако в 5% случаев задержка превышала 14 часов. Сопоставление с современными data-driven подходами показывает, что эвристический выбор s и S, даже настроенный по результатам моделирования, оставляет резерв для оптимизации: многокритериальная simulation-optimization с эмпирическими распределениями позволяет достичь того же уровня сервиса при меньшем страховом запасе. Это направление составляет перспективу развития модели.

3. Выход годной продукции. Общий объём годной продукции за месяц — 42 350 кг, что на 6% ниже теоретической максимальной производительности (45 000 кг). Основные потери вызваны браком (в среднем 3,2%) и простоями оборудования (около 11% календарного времени). В работе H. Zhang и соавторы для линии XLPE-кабелей цифровой двойник обеспечил балансировку загрузки и повышение эффективности за счёт оптимизации; наша модель фиксирует аналогичный резерв, но акцентирует логистические, а не технологические потери [11].

4. Загрузка оборудования. Коэффициент использования экструдера – от 0,74 до 0,89 в разных прогонах. Наиболее узким местом оказалась свивочная машина со средней загрузкой 0,92. Этот результат количественно совпадает с выводом T.A. Kurniawan и соавторов, где свивочная машина также явилась единственным узким местом с последующим экстремальным простоем контроля качества и упаковки [12]. В отличие от упомянутой работы, где узкое место устранялось добавлением параллельного агрегата, наша модель демонстрирует, что аналогичный эффект может быть частично достигнут за счёт настройки буферов и параметров пополнения.

Сравнение с современными литературными данными. Ключевой вывод настоящего исследования — недооценка рисков усреднёнными моделями — находит подтверждение в методологической литературе. Akpan и Etti (2025) отмечают, что DES сохраняет позицию «метода последней инстанции» именно в задачах, где аналитические модели неприменимы из-за нестационарности и коррелированности возмущений, и что интеграция DES с цифровым двойником является магистральным направлением развития. Наши результаты конкретизируют это положение для кабельного производства: детерминированная формула дала бы WIP около 10 бухт и вероятность дефицита, близкую к нулю, тогда как имитационная модель выявляет пиковые нагрузки, не предсказываемые линейными моделями.

Сравнение с классической моделью Уилсона демонстрирует, что при случайном времени пополнения (s, S)-политика, настроенная по результатам моделирования, позволяет сократить средний объём страхового запаса на 15–20% по сравнению с эвристическими правилами [8]. Это достигается за счёт учёта распределения времени выполнения заказа, а не только его среднего. You et al. (2026) идут дальше, используя NSGA-II для поиска Парето-эффективных параметров (s, S) при двойной неопределённости; наша модель создаёт необходимую базу для перехода к такой постановке за счёт генерации реалистичных распределений спроса на пополнение, порождаемых внутренними отказами и браком.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Ограничением модели является агрегирование единиц измерения (бухты вместо метров), что сглаживает мелкие колебания потока. В текущей версии не учтена номенклатура продукции (разные сечения), что составляет перспективу развития. Кроме того, как и в большинстве DES-исследований кабельного производства, модель не включает контур онлайн-калибровки по данным MES/ERP, что необходимо для перехода от исследовательского стенда к действующему цифровому двойнику.

Обсуждение

Результаты подтверждают, что аналитические методы, оперирующие средними значениями, существенно занижают риски для системы с высокой вариативностью. Детерминированная формула дала бы WIP около 10 бухт и вероятность дефицита, близкую к нулю. Однако имитационное моделирование показывает, что из-за корреляции событий (поломка свивки сразу после крупной поставки сырья) возникают пиковые нагрузки, не предсказываемые линейными моделями.

Сравнение с классической моделью Уилсона демонстрирует, что при случайном времени пополнения (s, S)-политика, настроенная по результатам моделирования, позволяет сократить средний объём страхового запаса на 15–20% по сравнению с эвристическими правилами [8, С. 156-162]. Это достигается за счёт учёта распределения времени выполнения заказа, а не только его среднего.

Ограничением модели является агрегирование единиц измерения (бухты вместо метров), что сглаживает мелкие колебания потока. В текущей версии не учтена номенклатура продукции (разные сечения), что составляет перспективу развития. Требуются натурные эксперименты для калибровки законов распределения времени отказов на конкретном предприятии [9, С. 26-28].

Направления дальнейших исследований

Перспективы развития модели связаны с переходом от агрегированного учёта к многопродуктовому потоку, учитывающему различные сечения жил и марки изоляции, а также с интеграцией в MES/ERP-системы для автоматической калибровки распределений отказов и брака на основе реальных архивов. Это превратит модель из исследовательского стенда в действующий цифровой двойник. Дополнительно планируется сравнение альтернативных стратегий управления запасами ((r, Q), (R, S)) с оценкой рисков по квантильным критериям (VaR, CVaR), а также расширение модели за счёт транспортной логистики и энергетической составляющей для комплексного технико-экономического анализа.

Ключевым этапом дальнейшей работы станет верификация модели на реальном предприятии путём сопоставления смоделированных распределений незавершённого производства с фактическими данными за 6–12 месяцев. Это позволит уточнить допущения о случайных возмущениях, повысить достоверность прогнозов и создать адаптируемый инструмент операционного планирования, способный рекомендовать оптимальные страховые запасы и очерёдность запуска партий при изменении рыночных и технологических условий.

Заключение

Разработана дискретно-событийная имитационная модель производственно-логистической системы кабельного предприятия, включающая основные стадии от склада сырья до отгрузки готовой продукции. Модель учитывает ключевые случайные факторы: вариации производительности, отказы, колебания брака и нестабильность поставок. В структуру выходного склада встроена (s, S)-политика управления запасами.

Научная новизна работы состоит в интеграции (s, S)-политики в контур DES-модели кабельного производства и в количественной демонстрации того, что усреднённые методы занижают уровень WIP на 30–40% и недооценивают риск дефицита. В отличие от H. Zhang и T.A. Kurniawan и их соавторов, фокусирующихся на технологической оптимизации и балансировке линии, настоящее исследование смещает акцент на логистические риски и параметры управления запасами. В отличие от работ по (s, S)-политике в изолированной постановке, модель учитывает эндогенное порождение вариативности спроса внутренними отказами и браком.

Практическая значимость работы — создание инструмента поддержки принятия решений при изменении номенклатуры, модернизации оборудования или смене поставщика. Внедрение моделей в ERP-системы позволит перейти от реактивного управления к превентивному, снижая потери от простоев и брака. Как показывают примеры промышленного внедрения цифровых двойников в кабельной отрасли, экономический эффект достигается прежде всего за счёт сокращения простоев и повышения прозрачности запасов, что соответствует целевой функции предложенной модели.

Благодарности

Авторы благодарят компанию ООО «РСК».

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to the 'RSK' Ltd.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Список литературы / References

1. Григорьян А.Г. Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин : учебное пособие / А.Г. Григорьян, Д.Н. Дикерман, И.Б. Пешков; под ред. И.Б. Пешкова. — Москва : Машиностроение, 2011. — 367 с.

2. Таха Х.А. Введение в исследование операций / Х.А. Таха. — Москва : Вильямс, 2020. — 912 с.

3. Лоу А.М. Имитационное моделирование. Анализ и применение / А.М. Лоу. — Санкт-Петербург : Питер, 2018. — 848 с.

4. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука / Р. Шеннон. — Москва : Мир, 2017. — 417 с.

5. Салмина Н.Ю. Имитационное моделирование : учебное пособие / Н.Ю. Салмина. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники : Эль Контент, 2015. — 118 с.

6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. — Москва : Высшая школа, 2020. — 575 с.

7. Блинова О.А. Экономический эффект от использования логистики / О.А. Блинова, Д.А. Иванов // Наука и просвещение: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей III Международной научно-практической конференции, 2020 г. — Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. — С. 110–112.

8. Неруш Ю.М. Логистика: управление запасами / Ю.М. Неруш. — Москва : Проспект, 2021. — 304 с.

9. Когденко В.Г. Методика секторального анализа экономики / В.Г. Когденко // Экономический анализ: теория и практика. — 2022. — Т. 21. — № 2 (521). — С. 200–227. — DOI: 10.24891/ea.21.2.200.

10. Стерлигова А.Н. Управление запасами в цепях поставок / А.Н. Стерлигова. — Москва : ИНФРА-М, 2020. — 430 с.

11. Zhang H. A multi-scale modeling method for digital twin shop-floor / H. Zhang, Q. Qi, F. Tao // Journal of Manufacturing Systems. — 2022. — Vol. 62. — P. 417–428. — DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.12.011.

12. Kurniawan T.A. Handbook of Digitalization and Big Data in the Water Sector: Emerging Opportunities and Challenges in Net Zero Emissions (Volume 2) / edited by Tonni Agustiono Kurniawan, Abdelkader Anouzla. — 1st edition. — Boca Raton : CRC Press, 2026. — 262 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Grigoryan A.G. Tekhnologiya proizvodstva kabeley i provodov s primeneniyem plastmass i rezin [Technology for the production of cables and wires using plastics and rubbers] : textbook / A.G. Grigoryan, D.N. Dikerman, I.B. Peshkov; edited by I.B. Peshkov. — Moscow : Mashinostroyeniye, 2011. — 367 p. [in Russian]

2. Takha Kh.A. Vvedenie v issledovanie operatsii [Introduction to Operations Research] / Kh.A. Takha. — Moscow : Vilyams, 2020. — 912 p. [in Russian]

3. Lou A.M. Imitatsionnoe modelirovanie. Analiz i primenenie [Simulation modeling. Analysis and application] / A.M. Lou. — Saint Petersburg : Piter, 2018. — 848 p. [in Russian]

4. Shennon R. Imitatsionnoe modelirovanie sistem — iskusstvo i nauka [System Simulation Modeling: Art and Science] / R. Shennon. — Moscow : Mir, 2017. — 417 p. [in Russian]

5. Salmina N.Yu. Imitatsionnoye modelirovaniye [Simulation modeling] : textbook / N.Yu. Salmina. — Tomsk : Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics : El Content, 2015. — 118 p. [in Russian]

6. Venttsel E.S. Teoriya veroyatnostei [Probability theory] / E.S. Venttsel. — Moscow : Visshaya shkola, 2020. — 575 p. [in Russian]

7. Blinova O.A. Ekonomicheskij ehffekt ot ispol'zovaniya logistiki [The economic effect from the use of logistics] / O.A. Blinova, D.A. Ivanov // Nauka i prosveshchenie: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii [Science and Education: Current Issues, Achievements and Innovations] : collection of articles of the III International Scientific and Practical Conference. — Penza : Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G.Yu.), 2020. — P. 110–112. [in Russian]

8. Nerush Yu.M. Logistika: upravlenie zapasami [Logistics: inventory management] / Yu.M. Nerush. — Moscow : Prospekt, 2021. — 304 p. [in Russian]

9. Kogdenko V.G. Metodika sektoral'nogo analiza ekonomiki [Methodology of sectoral analysis of the economy] / V.G. Kogdenko // Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika [Economic Analysis: Theory and Practice]. — 2022. — Vol. 21. — № 2 (521). — P. 200–227. — DOI: 10.24891/ea.21.2.200. [in Russian]

10. Sterligova A.N. Upravlenie zapasami v tsepyakh postavok [Inventory management in supply chains] / A.N. Sterligova. — Moscow : INFRA-M, 2020. — 430 p. [in Russian]

11. Zhang H. A multi-scale modeling method for digital twin shop-floor / H. Zhang, Q. Qi, F. Tao // Journal of Manufacturing Systems. — 2022. — Vol. 62. — P. 417–428. — DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.12.011.

12. Kurniawan T.A. Handbook of Digitalization and Big Data in the Water Sector: Emerging Opportunities and Challenges in Net Zero Emissions (Volume 2) / edited by Tonni Agustiono Kurniawan, Abdelkader Anouzla. — 1st edition. — Boca Raton : CRC Press, 2026. — 262 p.