

Научная статья

УДК 658.012.4

<https://doi.org/10.35266/2949-3455-2024-4-5>



Математическая модель оптимизации организационных процессов предприятия с дискретным производством

Сергей Олегович Крамаров^{1✉}, Александр Николаевич Кузьминов²,
Наталья Александровна Рутта³, Людмила Викторовна Сахарова⁴

¹Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

^{2, 3, 4}Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), Ростов-на-Дону,
Россия

¹maoovo@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>

²mr.azs@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9835-7598>

³rutic79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2521-2486>

⁴l_sakharova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4897-4926>

Аннотация. Разработанная математическая модель позволяет оптимизировать организационные процессы предприятия с дискретным производством, используя математический аппарат линейного программирования, а также его реализацию в виде готового программного решения на основе генератора AMPL. Модель имеет четкую архитектуру: с одной стороны, опирается на классический аппарат методов оптимизации, не нуждающийся в дополнительной валидации; с другой стороны – использует для реализации язык AMPL как оптимальное по простоте использования, удобству и практичности программное обеспечение, позволяющее использовать готовые наборы решателей. Основным результатом исследования является моделирование производственной цепочки предприятия дискретного типа, включающей производство, транспортировку, хранение, распределение и доставку продукции потребителям, направленное на минимизацию производственных затрат при соблюдении технологических требований. Модель апробирована на производственной цепочке предприятия Ростовской области по производству снеков, имеющего два завода – в Морозовске и Константиновске – и поставляющего свою продукцию в 11 районов области. Построенная модель может быть положена в основу пользовательского программного комплекса, направленного на поддержку малого и среднего предпринимательства.

Ключевые слова: оптимизация цепочки поставок, методы оптимизации, линейное программирование

Для цитирования: Крамаров С. О., Кузьминов А. Н., Рутта Н. А., Сахарова Л. В. Математическая модель оптимизации организационных процессов предприятия с дискретным производством // Вестник Сургутского государственного университета. 2024. Т. 12, № 4. С. 61–76. <https://doi.org/10.35266/2949-3455-2024-4-5>.

Original article

Mathematical model of organizational process optimization for discrete production enterprise

Sergey O. Kramarov^{1✉}, Aleksandr N. Kuzminov², Natalya A. Rutta³, Lyudmila V. Sakharova⁴

¹Surgut State University, Surgut, Russia

^{2, 3, 4}Rostov State University of Economics, Rostov-on-Don, Russia

¹maoovo@yandex.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>

²mr.azs@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9835-7598>

³rutic79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2521-2486>

⁴l_sakharova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4897-4926>

Abstract. The article presents a mathematical model for optimizing the organizational processes of an enterprise with discrete production. The model is developed using the mathematical apparatus of linear programming and implemented as a ready-made software solution based on the AMPL generator. The model has a clear architecture: on the one hand, it utilizes the classical apparatus of optimization methods that do not require additional validation; on the other hand, it uses the AMPL language for implementation as the optimal software in terms of ease of use, convenience and practicality, allowing the use of ready-made sets of solvers. The main result of the study is the modeling of the production chain of a discrete production enterprise, including production, transportation, storage, distribution and delivery of products to consumers, aimed at minimizing production costs while complying with technological requirements. The production chain of a snacks enterprise in the Rostov Oblast was used to test the model. This enterprise has two plants in Morozovsk and Konstantinovsk and supplies its products to eleven districts of the oblast. The constructed model serves as a foundation for a user software package designed to support small and medium enterprises.

Keywords: supply chain optimization, optimization approach, linear programming

For citation: Kramarov S. O., Kuzminov A. N., Rutta N. A., Sakharova L. V. Mathematical model of organizational process optimization for discrete production enterprise. *Surgut State University Journal*. 2024;12(4):61–76. <https://doi.org/10.35266/2949-3455-2024-4-5>.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство проблем в изучаемой области связано с потребностью в инструментах, поддерживающих принятие решений о размещении новых промышленных объектов и управлении уже существующими [1]. Необходимость в подобных инструментах возникает в отношении производственных предприятий, складов, центров снабжения, когда встает вопрос об их реструктуризации, перемещении либо окончательной ликвидации.

Наиболее типичной является логистическая проблема, когда необходимо одновременно разместить два или более объекта или добавить объект, когда хотя бы один объект уже существует [2]. В случае, когда объектов больше, количество возможных конфигураций становится огромным и ситуация трудно-обозримой [3].

Существует множество проблем, присущих цепочкам поставок, не разработанных должным образом каждым из участников цепочки [4]. Большинство из них возникают из-за неудачного расположения промышленного объекта, что может повлиять на другие области планирования цепочки, такие как политика инвентаризации или транспортировка продукции. Об этой ситуации свидетельствует чрезмерное использование запасов, увеличение затрат на логистику, увеличение долгосрочных капитальных вложений и снижение уровня обслуживания клиентов [5].

Цепочка поставок объединяет производственную цепочку поставщика, производства, транспортировки, хранения, распределения и конечного потребителя. Направление цепочки поставок отвечает за синхронизацию требований потребителя с потоком материалов поставщиков, это для того, чтобы получить баланс, который отражается в вопросах снижения удельных затрат, снижения запасов, сокращения возвратов и отказов, чтобы улучшить обслуживание клиентов и повысить гибкость (объем доставки) [6, 7]. Цепочки поставок включают в себя множество звеньев, и их конкретный состав зависит от отрасли, продукта и стратегии компании. Можно выделить несколько основных звеньев, которые чаще всего присутствуют:

Поставщики сырья и материалов – начальное звено, обеспечивающее исходные материалы для производства. Это могут быть как производители сырья (например, рудники для добычи металлов), так и поставщики готовых компонентов (например, производители микросхем для электроники).

Производители преобразуют сырье и материалы в готовые продукты или промежуточные товары. Это может быть как собственное производство компании, так и привлечение сторонних производителей (outsourcing).

Поставщики компонентов и запчастей: даже если компания сама производит основной

продукт, ей часто нужны компоненты и запчасти от других поставщиков.

Склады и логистические центры: здесь происходит хранение и управление запасами, а также сортировка и подготовка товаров к дальнейшей доставке.

Транспортные компании отвечают за физическую доставку товаров на всех этапах цепочки поставок – от поставщиков сырья до конечных потребителей. Это включает в себя различные виды транспорта: автомобильный, железнодорожный, морской, воздушный.

Дистрибьюторы и оптовики закупают товары у производителей оптом и перепродают их розничным продавцам.

Розничные продавцы – конечное звено, которое продает товары непосредственно потребителям. Это могут быть как физические магазины, так и онлайн-платформы.

Потребители (клиенты) – конечные пользователи товаров и услуг.

Дополнительные звенья (в зависимости от контекста): сервисные компании (предоставляют услуги, связанные с обслуживанием, ремонтом и утилизацией товаров); финансовые учреждения (обеспечивают финансирование на разных этапах цепочки поставок); таможенные органы (осуществляют контроль за перемещением товаров через границы); регуляторные органы (устанавливают стандарты и правила, касающиеся безопасности, качества и экологических аспектов); информационные и технологические компании (предоставляют программное обеспечение и другие технологии, необходимые для управления цепочкой поставок).

Основная цель цепочек поставок – удовлетворить клиента и в процессе этого получить прибыль, т. е. максимизировать общую созданную стоимость. Прибыль, создаваемая цепочкой поставок, представляет собой разницу между стоимостью конечного продукта для покупателя и затратами на выполнение запроса клиента [8, 9].

Основные элементы цепочки поставок – это: продукты (в переработке, транспортировке, хранении); потребители или клиенты; провайдеры; производственные предприятия;

дистрибьюторские центры; оптовые дистрибьюторы; розничные торговцы или оптовые торговцы; логистические операторы; транспортные системы или виды транспорта; информационные системы; зеленая логистика и т. д. [10].

Информационные системы цепочки поставок являются предметом исследования для многих авторов [11, 12]. Существует несколько интегрированных информационных систем, таких как SAP и ORACLE, называемых ERP (Планирование ресурсов предприятия), которые предоставляют и интегрируют информацию по всей цепочке поставок через ключевые модули, такие как закупки и поставщики, финансовый и бухгалтерский учет, человеческие ресурсы, планирование производства, планирование транспортировки и операции (Системы управления транспортом TMC), системы управления складом (Системы управления складом WMS), модули прогнозов и запасов, модуль управления связями с клиентами (Управление взаимоотношениями с клиентами CRM), среди прочих возможных.

К типичным операциям относятся [13–15]: администрирование портфеля продуктов и услуг, контроль производства, кейтеринг, распределение. Чтобы понять, как компания может повысить производительность цепочки поставок с точки зрения оперативности и эффективности, необходимо изучить движущие силы поведения компании: объекты, запасы, распределение, информация, закупки и ценообразование [16]. Для успешного управления цепочкой поставок требуются решения, связанные с потоком информации, продуктов и средств [17–20].

Математическое моделирование как инструмент оптимизации управления предприятием. Методы оптимизации есть адекватный инструмент для проектирования сети, в котором при принятии решения важно учитывать многие логистические аспекты, связанные с количеством, расположением и размером складов в логистической сети [21, 22]. Задачи оптимизации возникают, когда необходимо принять решение о том, чтобы оптимальным

образом распределить ограниченные ресурсы на действия, которые конкурируют друг с другом за них, для достижения наилучших результатов [23].

При оптимизации цепочек поставок обычно применяется линейное программирование [24]. В случае, когда вся цепочка еще не существует и, например, определяется новое местоположение завода или одного или нескольких распределительных центров, генерируются целочисленно-смешанные задачи линейной оптимизации [25].

В источнике [26] разработано математическое моделирование детерминистического производства и распределения, применяемое к компании по поставкам медицинских товаров для оптимизации всей цепочки поставок. Как отмечает Шапиро [27]: «Модели оптимизации являются необходимыми и желательными инструментами для определения эффективных решений в цепочке поставок. Это единственные инструменты, способные комплексно анализировать сложные взаимодействия решений, принимаемых по всей цепочке поставок компании».

Это свидетельствует о том, что линейное программирование является важным аспектом создания оптимизационных моделей. Математические концепции должны быть развиты и адаптированы к бизнес-теме таким образом, чтобы они позволяли экономить время и проводить анализ различных сценариев с целью принятия решений с минимальной вероятностью ошибки.

Этапы проектирования математической модели следующие [13, 28–32]: 1) определение интересующей проблемы и сбор соответствующих данных; 2) формулировка математической модели, которая представляет проблему; 3) разработка процедуры на основе программного обеспечения для получения решения проблемы из модели; 4) анализ результатов.

Цель настоящего исследования – математическое моделирование организационных процессов предприятия с дискретным производством, направленного на их оптимизацию и использующего как инструмент линейное программирование, а также числовые ряды

данных, всесторонне характеризующие работу предприятия в течение заданного года.

Объект моделирования – производственная цепочка предприятия дискретного типа, включающая производство, транспортировку, хранение, распределение и доставку продукции потребителям.

Предмет моделирования – производственная цепочка предприятия Ростовской области по производству снеков, имеющего два завода – в Морозовске и Константиновске – и поставляющего свою продукцию в 11 районов области.

Задачи моделирования:

- анализ ситуации на предприятии, сбор данных, выявление определяющих условий работы предприятия, оптимизируемых параметров и производственных ограничений;

- разработка математической модели предприятия на основе задачи линейного программирования, математическая формализация требований к производству и логистике предприятия;

- реализация модели на основе генератора AMPL (язык моделирования для математического программирования, веб-сайт [33]), удобного решателя с мощным программным аппаратом, что очень важно для моделирования и решения реальных задач;

- анализ полученных численных результатов, их интерпретация, формирование списка практических выводов.

В настоящем исследовании используется модель линейного программирования, с помощью которой решается проблема оптимизации производства и логистики предприятия для достижения устойчивой работы предприятия при минимальных затратах. Модель построена на сетевой структуре, которая учитывает заводы, распределительные центры и доставку продукции клиентам. Потоки готовой продукции моделируются по всей цепочке поставок с явной детализацией затрат на производство, транспортировку готовой продукции и управление запасами. Модель включает в себя оптимизацию цепочки путем назначения количества распределяемой продукции для каждого района сети при соблюдении

ряда ограничений, включающих: мощность заводов и распределительных центров, удовлетворение значений спроса по продуктам и по районам, баланс материальных потоков на заводах, баланс товарных потоков в распределительных центрах и условие неотрицательности переменных решений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи. Компания, на которой основывалось исследование, относится к сектору массового потребления снеков. В настоящее время у нее есть два производственных предприятия, расположенных в Морозовске и Константиновске Ростовской области, на которых производятся различные линии продукции, распространяющиеся через торговые агентства в разных регионах страны. Оба завода имеют общее производство линии экструдированных продуктов, которые распространяются в основном в районы севера Ростовской области. Ассортимент: чипсы (пеллет), луковые колечки (пеллет), сухарики (пшенично-ржаные), арахис соленый, фисташки, семечки, кукурузные палочки, кукурузные колечки и др.

Структура затрат. В структуре затрат в цепочке поставок снеков можно выделить следующие компоненты [34, 35]:

1. Стоимость приобретения или производства учитывает прямые или косвенные затраты на оплату труда, прямые или косвенные материальные затраты, общехозяйственные расходы (выраженные в денежной единице на единицу продукции).

2. Стоимость заказа. Административные и офисные расходы, связанные с процессом заказа на поставку, отправкой, обработкой заказа, транспортными расходами или стоимостью запуска партии продукции в случае производства (выраженные в денежной единице на заказ).

3. Стоимость хранения. Деньги, связанные с запасами, стоимость складских помещений, стоимость обработки, стоимость страхования, устаревание, ухудшение качества, стоимость ведения учета запасов (выраженные в денежной единице / единице измерения / единице времени).

4. Стоимость недопоставки/дефицита учитывает все потери, связанные с отсутствием товара или услуги: упущенная прибыль, затраты на экстренные закупки, штрафы за нарушение контрактов, потерю репутации и потенциальную потерю клиентов.

5. Типичная структура затрат на производство закусок состоит из сырья (MP), прямого труда (MOD), упаковочного материала (ME) и производственных накладных расходов (CIF). В CIF мы видим расходы на техническое обслуживание (Mto), косвенную рабочую силу (MOI), коммунальные услуги, такие как вода, энергия, газ и другие, затраты на уборку, расходы на безопасность [36].

Инвентарь инкапсулирует деньги, и неправильное управление им может повлиять на финансовое положение компаний. Иметь слишком много запасов так же проблематично, как и слишком мало. Слишком много подразумевает ненужные дополнительные расходы, связанные с хранением, страхованием, налогами и теми, которые связаны с износом или устареванием товаров, которые хранятся на складе. Эти затраты растут с увеличением запасов. Однако есть и другие, которые уменьшаются при увеличении запасов.

Проблема, которую нужно решить. Каждая организация стремится к достижению и поддержанию конкурентоспособности, удовлетворению своих клиентов, минимизации своих затрат и увеличению прибыльности, для этого ей необходимы инструменты, позволяющие своевременно и адекватно принимать решения, направленные на снижение совокупных затрат, встречающихся в процессах закупки сырья, производства и распространения. Принятие этих решений становится трудным из-за размера и сложности компаний и большого количества переменных, с которыми они работают, особенно когда у них есть несколько продуктов, сырья, производственных предприятий и клиентов.

В рамках настоящего исследования предполагалось, что завод, находящийся в Морозовске, имеет ограниченную мощность. В настоящее время мощность этого завода

составляет 113 215 коробок готовой продукции, 80 % которой реализуется в северных районах области. Мощность завода в Константиновске составляет 39 600 коробок в месяц. Средний спрос в месяц составляет 91 200 коробок.

Для компании жизненно важно знать эффект добавления затрат на производство, распределение, запасы, а также валовую прибыль, полученную для каждого из продуктов в соответствии с географическим положением клиентов. Необходимо определить, сколько, на каком заводе и каких продуктов необходимо производить, чтобы удовлетворить спрос потребителей, сводя к минимуму затраты, не забывая при этом о других факторах, таких как эффективность и мощность каждого из заводов.

Цель этой математической модели – ответить на поставленные вопросы, минимизировав соответствующие общие затраты и оптимизировав цепочку поставок. Анализ результатов будет включать, среди нескольких факторов, возможность инвестирования в завод в Морозовске для расширения его мощностей и, таким образом, повышения рентабельности производства без необходимости производства на заводе в Константиновске.

Вопросы можно сформулировать следующим образом:

- Какие и сколько продуктов должны быть произведены на каждом заводе?
- Какое распределение спроса должно быть у распределительных центров?
- Следует ли увеличить мощность заводов и как именно с учетом уровня эффективности и производительности каждого из производственных предприятий и географического положения районов?

Как уже было сказано, исследуемая компания имеет два производственных предприятия со следующими мощностями для расширенной линии:

Завод 1: Константиновск. Установленная мощность: 411 тонн в месяц. Используемая мощность: 66,4 %

Завод 2: Морозовск. Установленная мощность: 120 тонн в месяц. Используемая мощность: 98 %

Основным сырьем, поставляемым для этого процесса, является дробленая кукуруза, которая требует специальной обработки от помола до использования в производственном процессе. Эти два завода совместно производят ряд продуктов, которые в основном продаются в северных районах области. Расширенные продукты характеризуются малым объемом и, следовательно, оказывают большое влияние на издержки сбыта. Компания поставляет свою продукцию 11 торговых районов, среди которых: Белокалитвинский, Тацинский, Морозовский, Милютинский, Кашарский, Боковский, Шолоховский, Верхнедонской, Чертковский, Миллеровский, Тарасовский.

Система дистрибуции осуществляется из распределительных центров обоих заводов, с завода в Константиновске они отправляются в трех типах транспортных средств (грузовики до 3 тонн, 3–5 тонн и 5–10 тонн), а из Морозовска – только в грузовиках 3–5 тонн. В связи с тем что товары имеют очень низкое соотношение объем/вес, контракты на перевозку заключаются по маршруту, а не по весу. Согласно политике компании грузовик должен быть загружен более чем на 98 %, чтобы оптимизировать расходы.

Необходимо определить, сколько единиц каждого продукта должно производиться на каждом заводе каждый месяц и сколько единиц должно ежемесячно отгружаться с каждого склада в каждый район, чтобы минимизировать соответствующие общие затраты.

Поскольку стоимость запасов и складские мощности ограничены, необходимо ежемесячно отслеживать количество каждого продукта, хранящегося на каждом заводе. Следовательно, модель линейного программирования имеет три типа переменных решения: 1) объемы производства; 2) количество запасов; 3) отгруженное количество.

Компания управляет производственной системой в соответствии со своей технологической картой, которая начинается с проектирования и разработки продуктов. Когда продукты разработаны в соответствии с требованиями заказчика, запрос отправляется в процесс снабжения, который отвечает за управление

поставками на каждый из заводов. Затем осуществляется производственный процесс по созданию продуктов, которые хранятся на складах, чтобы логистика распределения могла удовлетворить спрос коммерческого управления.

Сбор данных проводился внутри компании с помощью прямых интервью с участниками производственного процесса, в результате чего были сформулированы таблицы данных для модели (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Затраты на перевозку

Торговые районы	Морозовск-1	Морозовск-2	Константиновск
Белокалитвинский	1,775	2,075	2,667
Тацинский	1,967	2,267	3,000
Морозовский	2,567	2,867	2,833
Милютинский	1,833	2,133	1,750
Кашарский	2,333	2,633	1,417
Боковский	1,085	1,385	1,800
Шолоховский	1,085	1,385	1,800
Верхнедонской	1,967	2,267	3,083
Чертковский	0,300	0,000	1,750
Миллеровский	2,567	2,867	2,833
Тарасовский	0,300	0,600	1,750

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

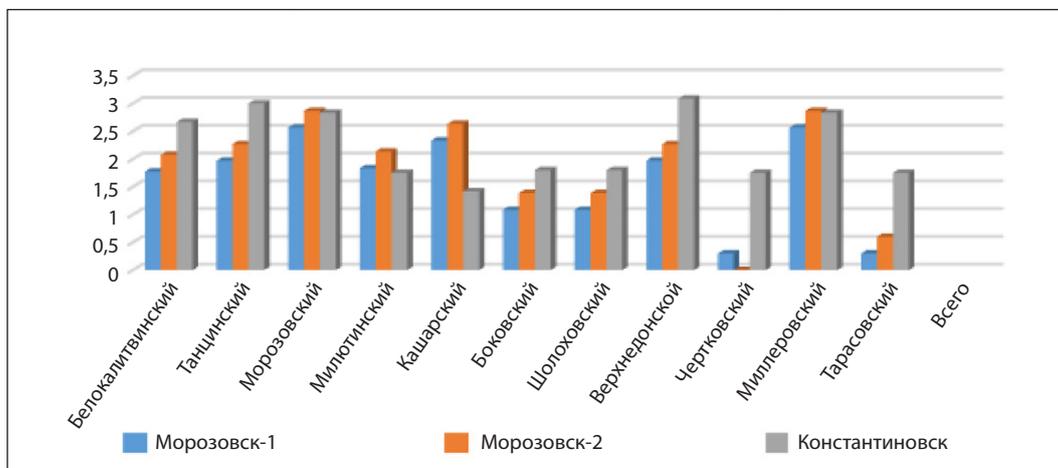


Рис. 1. Затраты на перевозку

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Математическая модель и программная реализация

Математическая модель. Формула, установленная для определения общих затрат, была следующей:

$$CTR = Z \times CPN + XY \times CPN + XZ \times CPN + Z \times CFI + XY \times CF + XZ \times CFE + Y \times CINV,$$

где Z = количество единиц продукции, отправленных с завода на склад;

XY = количество единиц продукции, отправленных с завода в районы;

XZ = количество единиц продукции, отправленных со склада в районы;

Y = количество единиц продукции, хранящихся на складе;

CPN = стоимость производства единицы продукции;

$CINV$ = стоимость хранения единицы продукции;

CFE = стоимость внешней перевозки единицы продукции;

CFI = стоимость внутренней перевозки единицы продукции;

CF = стоимость перевозки с завода в район единицы продукции.

Общая стоимость производства продукции = $XY \times CPN + XZ \times CPN$.

Общая стоимость перевозки продукции = $Z \times CFI + XY \times CF + XZ \times CFE$.

Общая стоимость хранения продукции = $Y \times CINV$.

Структурирование математической модели. Данные, использованные в сценарии анализа, были собраны с учетом двух производственных предприятий. Специально были рассмотрены типы поставщиков по местонахождению и годовому объему, расположение складов и распределительных центров, транспортные расходы и постоянные затраты на складах.

Характеристики модели. Схематично модель можно представить так, как показано на рис. 2.

Общие характеристики моделируемой системы

Модель рассчитана на период планирования 7 месяцев.

Рассматриваются несколько продуктов.

В качестве переменной решения рассматривается количество продукции, которое должно быть произведено на каждом из заводов и распределено по каждому из районов.

Включены ограничения емкости, запасов и спроса.

Целевая функция включает в себя сумму всех затрат, связанных с цепью.

Районы могут получать продукты от любого из двух складов.

Не моделируются распределительные потоки от заводов к конечным потребителям.

Возможный переток продукции между заводами не предполагается.

Окончательный запас определяется для того, чтобы гарантировать поставку продукции и избежать ее отсутствия на складе.

Поскольку это скоропортящиеся продукты, учитывается срок их полезного использования.

Формулировка модели

Параметры и переменные для этой модели определяются с учетом затрат на хранение на складе, производственных затрат на заводах и фрахта, связанного с распределением.

Параметры

$CA P_i$ = производственная мощность i -го завода;

Количество товаров: $j = 9$.

Количество производственных предприятий = 2.

Количество районов: $k = 11$.

Количество месяцев: $l = 7$.

Количество распределительных центров $m = 2$.

Инвентарная политика: 2 дня.

Мощность производственных предприятий:

Константиновск: 39 600 коробок/мес.

Морозовск: 113 215 коробок/мес.

Тип используемых грузовиков: Простые грузовики вместимостью 600 ящиков.

Всего переменных: 3150.

Всего ограничений: 885.

Целевая функция: 1.

Рис. 2. Характеристики модели

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

CPN_{ij} = стоимость производства единицы j -го продукта на i -м заводе;

DEM_{jkl} = спрос на j -й продукт в k -м районе в течение месяца;

$CINV_{jm}$ = стоимость хранения запасов j -го продукта в m -м распределительном центре;

$CAPCEN_m$ = максимальная вместимость запасов m -го распределительного центра;

CFI_{im} = стоимость перевозки от i -го завода до m -го распределительного центра;

CF_{ik} = стоимость перевозки от i -го завода до k -го района;

CFE_{mk} = стоимость перевозки из m -го распределительного центра m -й район;

$INVCEROC_{jm}$ = начальный запас j -го продукта j в m -м распределительном центре;

$INFINAL_j$ = окончательная инвентаризация j -го продукта j в последнем месяце (декабрь).

Переменные решения

Y_{jml} = количество единиц j -го товара, хранящегося в m -м распределительном центре в течение месяца;

Z_{jml} = количество единиц j -го товара, отгруженного из m -го распределительного центра в течение месяца;

XY_{jlik} = количество единиц j -го товара, отгруженного с i -го завода в течение месяца для k -го района;

XZ_{zmlk} = количество единиц j -го товара, отгруженного из m -го распределительного центра в течение месяца для k -го района.

Переменные решения представляют собой контролируемые переменные, которыми может управлять компания и которые прямо или косвенно решают задачу. В сформулированной модели компания может решить, сколько единиц продукции производить и отгружать на каждом из заводов, так же как будет происходить распределение потоков от склада к каждому из районов. Затем модель отвечает за поиск значений этих переменных, обеспечивающих минимальные общие затраты на производство, хранение и распространение.

Вербальная формулировка модели выглядит следующим образом:

Минимизировать: Общая стоимость производства + Стоимость запасов + Затраты на распространение.

Общая стоимость производства = количество произведенных коробок, помноженная на себестоимость единицы продукции.

Стоимость запасов = количество хранимых коробок, умноженное на стоимость единицы хранения.

Затраты на перевозку = количество отгруженных коробок, помноженное на стоимость перевозки за коробку.

Были определены следующие ограничения: мощность завода, удовлетворение спроса каждого района, максимальный запас, финальная инвентаризация, ограничения баланса, отправки.

Математическая модель в алгебраической записи

Ниже представлена целевая функция и ограничения в алгебраической записи.

$$\begin{aligned} & \sum_{ijkl} XY_{ijkl} \times CPN_{ij} + \sum_{jml} Y_{jml} \times CINV_{jm} + \\ & + \sum_{jml} Z_{jml} \times CFI_{im} + \sum_{jilk} XY_{jilk} \times CF_{ik} + \\ & + \sum_{jlmki} XZ_{jlmki} \times CFE_{mk} + \sum_{jlmki} XZ_{jlmki} \times CPN_{jl}. \end{aligned}$$

Показанная целевая функция представляет собой сумму производственных затрат на каждом заводе (первая сумма), затрат на хранение запасов (вторая сумма), транспортных грузов от заводов до складов (третья сумма), грузов от заводов до районов (четвертая сумма), транспортные грузы из центров в районы (пятая сумма), себестоимость произведенных и отгруженных единиц (шестая сумма).

Ограничения

Ограничение производственной мощности. Сумма отгрузок продукции j с каждого завода i в районы t плюс продукция j , отправленная с заводов i в районы k , должна быть меньше или равна мощности каждого завода i .

$$\sum_m Z_{imlj} + \sum_i XY_{iklj} \leq CAP_i \forall i.$$

Удовлетворение спроса каждого района. Все поставки должны быть больше или равны потребности каждого района. Это ограничение означает, что количество единиц, отгруженных каждого продукта j из каждого распределительного центра m в каждый район k в месяце l , плюс количество единиц каждого продукта j , отгруженных с завода i в район k в каждом месяце l , должно быть больше или равно спросу каждого района k в месяц l на каждый продукт j .

$$\sum_m XZ_{jmk} + \sum_i XY_{jik} \geq DEM_{jkl} \quad \forall jkl.$$

Максимальный запас. Общий запас всех единиц готовой продукции j , хранящихся в каждом распределительном центре, должен быть меньше или равен максимальной вместимости запасов каждого распределительного центра m .

$$\sum_j Y_{jml} \leq CAPCEN_m \quad \forall m.$$

Окончательная инвентаризация. Запас каждого продукта на складе должен быть больше или равен окончательному определенному запасу.

$$\sum_m Y_{jlm} \geq INVFINAL_j \quad \forall j.$$

Остатки продукции в распределительных центрах:

$$INVCERO + \sum_i Z_{jiml} - \sum_k XZ_{jmk} - Y_{jml} = 0;$$

$$INV_{jml-1} + \sum_i Z_{jiml-1} - \sum_k XZ_{jmk-1} - Y_{jml-1} = 0.$$

Ограничения указывают, что поток, поступающий на каждый склад со всех заводов, должен быть равен потоку, направляемому ко всем потребителям товара.

Отправка со склада. Все, что отправляется со склада во все районы K , должно быть, по крайней мере, тем, что было там в конце месяца ($l-1$). В конце месяца в распределительном

центре не может храниться ни один продукт, которому больше месяца.

$$\sum_k XZ_{jmk} \geq Y_{jml} \quad \forall j, m, l.$$

Отправка с завода. Минимальное количество коробок для отправки с заводов в районы – 600 штук. ОТПРАВКИ = 600 коробок.

Численная реализация модели в AMPL

В качестве инструментального средства для реализации проекта выбран язык AMPL как оптимальное по простоте использования, удобству и практичности программное обеспечение, позволяющее использовать готовые наборы решателей [37–40]. Решателями (solvers) называют алгоритмы для обработки моделей и чисел, которые вычисляют оптимальное решение.

AMPL – это язык для алгебраического моделирования и математического программирования: машиночитаемый язык для выражения задач оптимизации, таких как линейное программирование в алгебраической нотации.

AMPL включает в себя:

1. Язык моделирования – с помощью которого происходит описание и разработка математических моделей, данных оптимизации, переменных, целей и ограничений.

2. Командный язык – для просмотра моделей и анализа результатов.

3. Язык сценариев – для сбора и обработки данных, а также для реализации различных схем исследований оптимизации.

Все языковые блоки AMPL используют одни и те же концепции и синтаксис для максимально упрощенного описания разрабатываемых сложных и комплексных моделей и приложений. Модель была запущена в интернете в NEOS-сервер, используя решатель Gurobi с входом AMPL. Был выбран набор решателей целочисленного линейного программирования GURIBI с линейными ограничениями. На сайте NEOS-сервер вводятся модель, данные и файл результатов, Программа выдает ответ за считанные секунды. На основе собранной информации была предложена планово-распределительная модель, позволяющая смоделировать текущую деятельность компании.

Командный файл и выходной файл в AMPL. Файл скрипта в AMPL используется, чтобы сообщить системе, как мы хотим, чтобы результаты были представлены, и какие из них мы хотим иметь на выходе. Для этой работы сценарий AMPL изображен на рис. 3.

Валидация модели

Валидация – это процесс проверки того, что результаты, предоставляемые моделью для выходных переменных и параметров, не сильно отличаются от результатов, измеренных в реальности.

Существуют различные индексы, которые позволяют количественно оценить степень соответствия между измеренными данными и результатами модели. Если модель построена правильно, можно провести анализ чувствительности, чтобы определить, какие параметры следует измерять с большей точностью и большим пространственным разрешением. В этом случае мы будем измерять изменчивость реальных данных, установ-

ленных компанией, по сравнению с данными ящиков, распределенных в предлагаемой модели. В следующей таблице приведены результаты, полученные в соответствии с фактическим распределением за январь – апрель, и данные, полученные при вводе этих фактических данных в модель.

Проверка состояла в том, чтобы взять реальные данные о единицах, отправленных в период с января по апрель этого года, и включить их в модель AMPL. Фактические значения были предоставлены компанией.

Результаты показывают (табл. 2), что существенных отличий от реальной модели нет. Что касается количества распределенных коробок, разница составляет 4 364 коробки, что представляет собой отклонение на 0,94 % по отношению к количеству, отправленному в течение установленных месяцев. В случае затрат представлены очень низкие вариации, коэффициент вариации составляет 0,66 %, что указывает на надежность модели выше 99 %.

```
option show_stats 1;
option solution_precision 0;
option omit_zero_rows 1;
option omit_zero_cols 1;
option display_precision 6;
option display_round 0;
option display_width 100;
```

solve;

Рис. 3. Сценарий AMPL

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 2

Сравнение фактического распределения с моделью

	Месяц	Кол-во ящиков	Стоимость продукции	Расходы на перевозку	Расходы на хранение
Реальное распределение	январь	129 761	1 225 653 572	184 219 800	101 566 962
	февраль	140 547	1 345 035 760	216 642 344	110 803 495
	март	101 673	918 617 957	144 463 173	77 811 789
	апрель	92 241	886 119 145	127 305 595	75 297 374
	всего	464 222	4 375 426 434	672 630 912	365 479 619
Процентное соотношение	–	81 %	12 %	–	–
Модель	всего	468 586	4 357 015 890	669 800 673	363 941 785

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Еще одним важным моментом для проверки модели является проверка того, что все ограничения полностью выполняются.

Производственная мощность. Производственная мощность определяется количеством коробок, отправленных с заводов в распределительные центры (Z) и с заводов в районы (XY). Эти количества зависят от текущей мощности каждого завода, поэтому сумма количества, отправляемого в распределительные центры и районы, не должна превышать эту мощность. Результаты показывают, что ограничение мощности выполнено.

Константиновск:

$$\sum_m Z_{imlj} + \sum_i XY_{iklj} \leq CAP = 39\ 600$$

$$11\ 268 + 0 = 11\ 268 \leq CAP.$$

Морозовск:

$$\sum_m Z_{imlj} + \sum_i XY_{iklj} \leq CAP = 113\ 215$$

$$3\ 599 + 102\ 030 = 105\ 628 < CAP.$$

Запасы. Для запасов у нас есть два связанных ограничения. Первый установлен, чтобы не хранить больше, чем текущая вместимость распределительных центров, а второй определяется минимальным количеством единиц в соответствии с политикой инвентаризации.

$$\sum_j Y_{jml} \leq CAPCEN_m \quad \forall m.$$

Константиновск:

$$\sum_j Y_{jml} \leq CAPCEN = 10\ 000$$

$$5\ 820 \leq CAPCEN.$$

Морозовск:

$$\sum_j Y_{jml} \leq CAPCEN = 8\ 000$$

$$3\ 591 \leq CAPCEN$$

$$\sum_m Y_{jlm} \geq INVFINAL_j \quad \forall j.$$

Спрос районов. Должен удовлетворяться единицами, отправляемыми с заводов (XY) и из распределительных центров (XZ).

$$\sum_m XZ_{jlmk} + \sum_i XY_{jlik} \geq DEM_{jkl} \quad \forall jkl.$$

Средний спрос в период с января по апрель составил 116 056 коробок.

$$15\ 117 + 102\ 030 = 117\ 147 \geq DEM_{jkl}.$$

Это соответствует ограничению спроса.

При текущем прогнозе на период с июня по декабрь, который составляет в среднем 91 274 ящика, мощности завода в Морозовске будет достаточно, чтобы удовлетворить спрос. Месяцем с самым высоким спросом является декабрь с 97 433 ящиками, что делает возможным производство на указанном заводе, чья текущая мощность составляет 113 215 ящиков.

Полученная целевая функция показала, что соответствующие общие затраты на эксплуатацию и распространение в течение семи исследуемых месяцев составляют: СТР (июнь – декабрь) = 7 601 578 720 (тыс. руб.).

Для оптимальной работы модель дает следующие результаты:

1. Производство: 99 % продуктов должно производиться на заводе в Морозовске.
2. Распределение: 92 % отгрузок должно осуществляться напрямую с завода в Морозовск в районы; 8 % отправок должно осуществляться через дистрибьютора.
3. Запасы: 99 % запасов управляются складом в Морозовске.

Таким образом, добьемся минимизации затрат на производственные процессы, запасы и дистрибуцию, оптимизируя ресурсы компании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель, позволяющая оптимизировать организационные процессы предприятия с дискретным производством, используя математический аппарат линейного программирования, а также его реализацию в виде готового программного

решения на основе генератора AMPL, оптимального по простоте использования, удобству и практичности программного обеспечения, позволяющего использовать готовые наборы решателей.

Основным результатом исследования является моделирование производственной цепочки предприятия дискретного типа, включающей производство, транспортировку, хранение, распределение и доставку продукции потребителям, направленное на минимизацию

производственных затрат при соблюдении технологических требований. Модель апробирована на производственной цепочке предприятия Ростовской области по производству снеков, имеющего два завода – в Морозовске и Константиновске – и поставляющего свою продукцию в 11 районов области. Построенная модель может быть положена в основу пользовательского программного комплекса, направленного на поддержку малого и среднего предпринимательства.

Список источников

1. Гилязова А. А., Шарапов А. Р. Современные проблемы процесса организации управления на производственном предприятии // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 22. С. 155–161.
2. Блинов А. О., Яшева Г. А. Реинжиниринг бизнес-процессов как управленческая инновация современных организаций: методологический аспект // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2014. № 26. С. 147–160.
3. Блинов А. О. Диагностика реинжиниринга бизнес-процессов современных организаций // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. 2014. № 2. С. 44–50.
4. Остроухова Н. Г. Реинжиниринг бизнес-процессов: взаимосвязь с инновационной деятельностью предприятия // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2015. № 3. С. 118–126.
5. Евдокимова А. Б., Ильин И. В. Реинжиниринг бизнес-процессов в организации как инструмент антикризисного управления // *π-Economy*. 2016. № 3. С. 190–201.
6. Рудь Е. П., Плучевская Э. В. Применение свр-метода к оценке эффективности реинжиниринга бизнес-процессов // Векторы благополучия: экономика и социум. 2018. № 1. С. 39–50.
7. Суворова С. Д., Куликова О. М. Формирование устойчивой цепочки поставок // Журнал прикладных исследований. 2022. № 1. С. 125–129. https://doi.org/10.47576/2712-7516_2022_1_2_125.
8. Куликова О. М., Суворова С. Д. Проектирование эффективной логистической цепочки поставок // Региональные проблемы преобразования экономики. 2021. № 4. С. 122–129. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2021-4-122-129>.
9. Суворова С. Д., Бойко И. А., Захаренко А. И. Проектирование цифровых логистических платформ в цепи поставок // Естественно-гуманитарные исследования. 2020. № 29. С. 321–325.
10. Ларин О. Н., Куприяновский В. П. Вопросы трансформации рынка транспортно-логистических услуг в условиях цифровизации экономики // In-

References

1. Gilyazova A. A., Sharapov A. R. Sovremennye problemy protsessa organizatsii upravleniya na proizvodstvennom predpriyatii. *Herald of Technological University*. 2012;15(22):155–161. (In Russ.).
2. Blinov A. O., Yaheva G. A. Business process reengineering as management innovation of modern organizations: methodological aspect. *Bulletin of Vitebsk State Technological University*. 2014;(26):147–160. (In Russ.).
3. Blinov A. O. Diagnosis of business processes reengineering of modern organizations. *Bulletin USPTU. Science, education, economy. Series economy*. 2014;(2):44–50. (In Russ.).
4. Ostroukhova N. G. Reengineering of business processes: the relationship to innovation of an enterprise. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics*. 2015;(3):118–126. (In Russ.).
5. Evdokimova A. B., Ilyin I. V. Business process reengineering as an instrument for crisis management. *π-Economy*. 2016;(3):190–201. (In Russ.).
6. Rud E. P., Pluchevskaya E. V. Business process reengineering effectiveness evaluation using CVP analysis. *Journal of Wellbeing Technologies*. 2018;(1):39–50. (In Russ.).
7. Suvorova S. D., Kulikova O. M. Building a sustainable supply chain. *Journal of Applied Research*. 2022;(1):125–129. https://doi.org/10.47576/2712-7516_2022_1_2_125. (In Russ.).
8. Kulikova O. M., Suvorova S. D. Designing an efficient logistics supply chain. *Regional problems of transforming the economy*. 2021;(4):122–129. <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2021-4-122-129>. (In Russ.).
9. Suvorova S. D., Boyko I. A., Zakharenko A. I. Designing digital logistics platforms in the supply chain. *Natural-Humanitarian Studies*. 2020;(29):321–325. (In Russ.).
10. Larin O. N., Kupriyanovsky V. P. On transformation of the market of transport and logistics services during the digitalization of the economy. *International Journal of Open Information Technologies*. 2018;6(3):95–101. (In Russ.).
11. Zinovieva O. G., Klevtsov D. V., Savin A. G. Supply chain management in the food industry as a factor

- ternational Journal of Open Information Technologies. 2018. Т. 6, № 3. С. 95–101.
11. Зиновьева О. Г., Клевцов Д. В., Савин А. Г. Управление цепочкой поставок в пищевой промышленности как фактор продовольственной безопасности // *International agricultural journal*. 2020. № 2. С. 1–12.
 12. Chopra S., Meindl P. Supply chain management, strategy planning and operation. 3d ed. Pearson Prentice Hall; 2008. 552 p.
 13. Одинцова Т. Н., Рыжова О. А., Кочерягина Н. В. Развитие моделей управления цепями поставок в розничной торговле // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право*. 2018. Т. 18, № 2. С. 155–161. <https://doi.org/10.18500/1994-2540-2018-18-2-155-161>.
 14. Кочерягина Н. В., Рыжова О. А. Теоретические аспекты развития интегрированных цепей поставок в сфере торговли // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право*. 2015. Т. 15, № 1. С. 42–49.
 15. Асмолова О. С. Управление цепями поставок в сетевой розничной торговле // *Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена*. 2008. № 60. С. 18–22.
 16. Хромовских Н. Т. Развитие принципов управления // *Известия Дальневосточного федерального университета*. 1998. № 4. С. 61–69.
 17. Попков М. В. Основные этапы принятия управленческих решений // *Мировая наука*. 2019. № 5. С. 571–576.
 18. Каракушян Д. В., Косников С. Н. Особенности принятия управленческих решений в системе государственного и муниципального управления // *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2019. № 6–1. С. 138–141. <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2019-10837>.
 19. Закиров Т. И. Основные аспекты принятия управленческих решений в строительном холдинге // *Проблемы экономики и юридической практики*. 2012. № 1. С. 277–278.
 20. Симионова Н. Е., Кириченко Д. А. Эффективность цепей поставок: подсистемы, процессы, показатели // *Экономика строительства*. 2021. № 2. С. 39–48.
 21. Картамышев Н. А. Методы оптимизации производства на промышленном предприятии // *StudNet*. 2022. Т. 5, № 6. С. 5648–5657.
 22. Гвоздинский А. Н., Батура Е. С. Применение методов оптимизации для задач принятия решений в системах управления деятельностью предприятия // *Радиоэлектроника и информатика*. 2014. № 4. С. 35–38.
 23. Hillier F. S., Liebermann G. J. Introduction to Operations Research. 9th ed. McGraw Hill; 2010. 978 p.
 24. Банзекуливахо Ж. М. Оптимизация управления цепями поставок // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Д. Экономические и юридические науки*. 2014. № 13. С. 61–65.
 25. Vidal-Holguin C. J. Inventory Management Fundamentals. University of Valle. Faculty of Engineering. Technical Publication. 2nd ed. 2005. p. 158–160.
 26. Atul P. K., Gajendra K. A. A robust optimisation model for aggregate and detailed planning of a multi-site procurement-production-distribution system. *International Journal of Production Research*. 2010;48(3):635–636. <https://doi.org/10.1080/00207540802471272>.
 12. Chopra S., Meindl P. Supply chain management, strategy planning and operation. 3d ed. Pearson Prentice Hall; 2008. 552 p. (In Spanish).
 13. Odintsova T. N., Ryzhova O. A., Kocheryagina N. V. Development of Models of Supply Chain Management in Retailing. *Izvestiya of Saratov University (N. S.). Economics. Management. Law*. 2018;18(2):155–161. <https://doi.org/10.18500/1994-2540-2018-18-2-155-161>. (In Russ.).
 14. Kocheryagina N. V., Ryzhova O. A. Theoretical Aspects of Development of Integrated Supply Chains in Trade. *Izvestiya of Saratov University (N. S.). Economics. Management. Law*. 2015;15(1):42–49. (In Russ.).
 15. Asmolova O. S. Upravlenie tsepyami postavok v setevoy roznichnoy trgovle. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*. 2008;(60):18–22. (In Russ.).
 16. Khromovskikh N. T. Razvitie printsipov upravleniya. *The bulletin of the Far Eastern Federal University*. 1998;(4):61–69. (In Russ.).
 17. Popkov M. V. Main stages of administrative decision making. *World Science*. 2019;(5):571–576. (In Russ.).
 18. Karakushyan D. V., Kosnikov S. N. Features of adoption of managerial decisions in the system of public and municipal management. *Economy and business*. 2019;(6–1):138–141. <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2019-10837>. (In Russ.).
 19. Zakirov T. I. Main aspects of administrative decision-making in building holding company. *Economic problems and legal practice*. 2012;(1):277–278. (In Russ.).
 20. Simionova N. E., Kirichenko D. A. Supply chain efficiency: subsystems, processes, indicators. *Construction Economy*. 2021;(2):39–48. (In Russ.).
 21. Kartamyshv N. A. Methods for optimizing production at an industrial enterprise. *StudNet*. 2022;5(6):5648–5657. (In Russ.).
 22. Gvozdzinsky A. N., Batura E. S. Primenenie metodov optimizatsii dlya zadach prinyatiya resheniy v sistemakh upravleniya deyatel'nostyu predpriyatiya. *Radioelektronika i informatika*. 2014;(4):35–38. (In Russ.).
 23. Hillier F. S., Liebermann G. J. Introduction to Operations Research. 9th ed. McGraw Hill; 2010. 978 p. (In Spanish).
 24. Banzekulivaho J. M. Optimization of supply chain management. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya D. Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki*. 2014;(13):61–65. (In Russ.).
 25. Vidal-Holguin C. J. Inventory Management Fundamentals. University of Valle. Faculty of Engineering. Technical Publication. 2nd ed. 2005. p. 158–160.
 26. Atul P. K., Gajendra K. A. A robust optimisation model for aggregate and detailed planning of a multi-site procurement-production-distribution system. *International Journal of Production Research*. 2010;48(3):635–636. <https://doi.org/10.1080/00207540802471272>.

26. Atul P. K., Gajendra K. A. A robust optimisation model for aggregate and detailed planning of a multi-site procurement-production-distribution system // *International Journal of Production Research*. 2010. Vol. 48, no. 3. P. 635–636. <https://doi.org/10.1080/00207540802471272>.
27. Шапиро Дж. Моделирование цепи поставок / пер. с англ.; под ред. В. С. Лукинского. СПб. : Питер, 2006. 720 с.
28. Поповян М. Г. Моделирование цепей поставок с учетом факторов конкуренции // *Terra Economicus*. 2009. Т. 7, № 3–2. С. 40–45.
29. Аكوпова Е. С., Хмельницкая З. Б., Сизов П. Л. Построение имитационной модели сетевой структуры цепей поставок // *Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ)*. 2020. № 4. С. 18–29.
30. Ткач В. В. Проблемы моделирования цепей поставок // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент*. 2010. № 39. С. 106–110.
31. Рундыгина Д. Д. Моделирование цепей поставок в издательско-полиграфической отрасли на основе метода матрицы логистического преимущества // *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2020. № 2. С. 224–230.
32. Ковалев М. Н. Моделирование цепей поставок в промышленности // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого*. 2014. № 1. С. 117–124.
33. AMPL. URL: <https://ampl.com/> (дата обращения: 11.07.2024).
34. Бурцев Н. В., Куликов А. В. Минимизация транспортных затрат при доставке продуктов питания (На примере перевозки снековой продукции – чипсов) // *Форум молодых ученых*. 2019. № 1–1. С. 625–639.
35. Аксенова О. И., Алексеев Г. В., Сырокоренский И. С. Исследование процесса получения экструдированных снеков на основе картофеля // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2019. № 4. С. 55–66.
36. BusinesStat. Готовые обзоры рынков. URL: <https://businesstat.ru> (дата обращения: 15.08.2024).
37. Solvetrytic. Интеллект для бизнеса. URL: <https://www.solvetrytic.com/ampl/> (дата обращения: 15.08.2024).
38. Арженовский С. В., Синявская Т. Г., Рудяга А. А. Решение задачи целочисленной оптимизации для фирмы // *Учет и статистика*. 2017. № 4. С. 36–43.
39. Смирнов С. А., Волошинов В. В. Эффективное применение пакетов дискретной оптимизации в облачной инфраструктуре на основе эвристической декомпозиции исходной задачи в системе оптимизационного моделирования AMPL // *Программные системы: теория и приложения*. 2016. Т. 7, № 1. С. 29–46.
40. Jin H. A Tutorial of AMPL for Linear Programming. 2014. 32 p.
27. Shapiro J. Modeling the Supply Chain. V. S. Lukinsky trans. Saint Petersburg: Piter; 2006. 720 p.
28. Popovyan M. G. Modelirovanie tsepey postavok s uchetom faktorov konkurentsii. *Terra Economicus*. 2009;7(3–2):40–45. (In Russ.).
29. Akopova E. S., Khmel'nitskaya Z. B., Sizov P. L. Imitation modeling of network structure of supply chains. *Vestnik of Rostov State Economic University (RINH)*. 2020;(4):18–29. (In Russ.).
30. Tkach V. V. Problemy modelirovaniya tsepey postavok. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Economics and Management"*. 2010;(39):106–110. (In Russ.).
31. Rundygina D. D. Supply chain modeling in the publishing and printing industry based on the logistic advantage matrix method. *Izvestiya SPBGUEU*. 2020;(2):224–230. (In Russ.).
32. Kovalev M. N. Modelirovanie tsepey postavok v promyshlennosti. *Vestnik of Sukhoi State Technical University of Gomel*. 2014;(1):117–124. (In Russ.).
33. AMPL. URL: <https://ampl.com/> (accessed: 11.07.2024).
34. Burtsev N. V., Kulikov A. V. Saving them the transport cost. (for example, transportation of snack products – chips). *Forum molodykh uchenykh*. 2019; (1–1):625–639. (In Russ.).
35. Aksenova O. I., Alekseev G. V., Sirokorensky I. S. Obtaining potato based extruded snacks. *Scientific journal NRU ITMO. Series "Processes and Food Production Equipment"*. 2019;(4):55–66. (In Russ.).
36. BusinesStat. Gotovye obzory rynkov. URL: <https://businesstat.ru> (accessed: 15.08.2024). (In Russ.).
37. Solvetrytic. Intellect dlya biznesa. URL: <https://www.solvetrytic.com/ampl/> (accessed: 15.08.2024). (In Russ.).
38. Arzhenovskiy S. V., Sinyavskaya T. G., Rudyaga A. A. Solution of integer optimization problem for firm. *Accounting and Statistics*. 2017;(4):36–43. (In Russ.).
39. Smirnov S. A., Voloshinov V. V. Effective use of discrete optimization solvers in cloud infrastructure on the basis of heuristic decomposition of the initial problem by optimization modeling system AMPL. *Program Systems: Theory and Applications*. 2016;7(1):29–46. (In Russ.).
40. Jin H. A Tutorial of AMPL for Linear Programming. 2014. 32 p.

Информация об авторах

С. О. Крамаров – доктор физико-математических наук, профессор, академик Академии информатизации образования, советник президента МИРЭА – Российского технологического университета, председатель Научного совета Южного отделения АИО.

А. Н. Кузьминов – доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник.

Н. А. Рутта – кандидат экономических наук, доцент.

Л. В. Сахарова – доктор физико-математических наук, профессор.

About the authors

S. O. Kramarov – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Member of the Academy of Informatization of Education, Advisor to the President of MIREA – Russian Technological University, Chairman of the Scientific Council of the Southern Branch of AIE.

A. N. Kuzminov – Doctor of Sciences (Economics), Professor, Chief Researcher.

N. A. Rutta – Candidate of Sciences (Economics), Docent.

L. V. Sakharova – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor.