

Журнал «Научное обозрение. Технические науки» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИИ № ФС77-57440 выдано 27.03.2014. ISSN 2500-0799

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,695
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,319

Учредитель, издатель и редакция:
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,

Почтовый адрес: 101000, г. Москва, а/я 47
Адрес учредителя, издателя: 410056, г. Саратов,
ул. им. Чапаева В.И., д. 56
Адрес редакции: 410035, г. Саратов,
ул. Мамонтовой, д. 5

Founder, publisher and edition:
LLC SPC Academy of Natural History,

Post address: 101000, Moscow, p.o. box 47
Founder's, publisher's address: 410056, Saratov,
56 Chapaev V.I. str.
Editorial address: 410035, Saratov,
5 Mamontovoi str.

Подписано в печать 31.10.2024
Дата выхода номера 29.11.2024
Формат 60×90 1/8

Типография
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

Signed in print 31.10.2024
Release date 29.11.2024
Format 60×90 8.1

Typography
LLC SPC «Academy Of Natural History»
410035, Saratov, 5 Mamontovoi str.

Технический редактор Доронкина Е.Н.
Корректор Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.

Распространяется по свободной цене
Тираж 1000 экз. Заказ НО 2024/5
Подписной индекс в электронном каталоге
«Почта России»: ПА518
© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.



М.М. Филиппов (M.M. Philippov)

С 2014 года издание журнала возобновлено Академией Естествознания

From 2014 edition of the journal resumed by Academy of Natural History

Главный редактор: М.Ю. Ледванов
Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov

Редакционная коллегия (**Editorial Board**)
А.Н. Курзанов (**A.N. Kurzanov**)
Н.Ю. Стукова (**N.Yu. Stukova**)
М.Н. Бизенкова (**M.N. Bizenkova**)
Н.Е. Старчикова (**N.E. Starchikova**)
Т.В. Шнуровозова (**T.V. Shnurovozova**)

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES

www.science-education.ru

2024 г.



***В журнале представлены научные обзоры,
статьи проблемного
и научно-практического характера***

***The issue contains scientific reviews,
problem and practical scientific articles***

СОДЕРЖАНИЕ

Технические науки

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ПИЩЕВАЯ ЦЕННОСТЬ КОФЕ
И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЗДОРОВЬЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.
ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

Бурак Л.Ч., Гулина С.В. 5

СТАТЬИ

ПОСТРОЕНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ
ДВУХЛОПАСТНОГО АВТОРОТИРУЮЩЕГО НЕСУЩЕГО ВИНТА

Корбуков Г.М., Мензульский С.Ю. 14

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

Степаненко Д.Ю. 19

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ИНТЕГРАЦИИ ОБЩЕЙ
ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В СИСТЕМЫ
УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ

Шишков Е.М. 24

Физико-математические науки

СТАТЬЯ

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ
ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ
НА ПРИМЕРЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОИМОСТИ БРИЛЛИАНТОВ

Облакова Т.В., Григорян В.М., Зубарев К.М. 31

CONTENTS

Technical sciences

REVIEW

CHEMICAL COMPOSITION, NUTRITIONAL VALUE
OF COFFEE AND ITS IMPACT ON CONSUMER HEALTH.
A SUBJECT FIELD REVIEW.

Burak L.Ch., Gulina S.V. 5

ARTICLES

CONSTRUCTION AND VALIDATION OF A FINITE ELEMENT
MODEL OF A TWO-BLADED AUTOROTATING MAIN ROTOR

Korbukov G.M., Menzulskiy S.Yu. 14

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE RAILWAY
INDUSTRY

Stepanenko D.Yu. 19

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR INTEGRATING
THE COMMON INFORMATION MODEL INTO ELECTRIC
ENERGY AND POWER METERING SYSTEMS

Shishkov E.M. 24

Physical and mathematical sciences

ARTICLE

APPLICATION OF REGULARIZATION IN CONSTRUCTING
POLYNOMIAL REGRESSION MODELS USING THE EXAMPLE
OF FORECASTING THE PRICE OF DIAMONDS

Oblakova T.V., Grigoryan V.M., Zubarev K.M. 31

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 663.93

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ПИЩЕВАЯ ЦЕННОСТЬ КОФЕ
И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЗДОРОВЬЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.
ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ**¹Бурак Л.Ч., ²Гулина С.В.¹ООО «БЕЛПРОСАКВА», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com;²ООО «Вилдост», Минск, e-mail: svetlana.gulina@wildost.by

Цель исследования – обзор современных знаний о химическом составе кофе, его пищевой ценности и влиянии на здоровье потребителей. В обзор включены статьи на английском и русском языке, опубликованные в 2010–2024 годы. Поиск научной литературы на английском языке по данной теме проводили по ключевым словам в библиографических базах Scopus, PubMed и Web of science. Для отбора научных статей на русском языке провели поиск по ключевым словам в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU. При выполнении работы использованы научные методы поиска и анализ научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизация и обобщение. Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 49 исследований. Результаты многочисленных научных исследований подтверждают, что кофе является одним из самых потребляемых напитков в мире, признанным за свой уникальный вкус и аромат, а также за его социальное и оздоровительное воздействие. Кофе содержит множество питательных и биологически активных веществ, количественный состав которых может варьировать в зависимости от места происхождения кофе, обработки и методов экстракции. Собранные в литературе доказательства показывают, что регулярное употребление кофе, содержащего функциональные вещества, такие как полисахариды, фенольные соединения и меланоидины, может оказывать потенциальное благотворное влияние на кардиометаболические факторы риска, такие как абдоминальное ожирение, гипергликемия и липогенез. Однако соединения кофе, такие как кофеин, дитерпены и конечные продукты гликирования, могут быть факторами риска для кардиометаболического здоровья. Следует отметить, что синергия между этими соединениями и их влияние на биоактивность полностью не раскрыты. Представленные в данном обзоре материалы могут представлять интерес как для научных исследований, так и для потребителей.

Ключевые слова: кофе, обжарка, химический состав, экстракция, заваривание, кофеин, полисахариды, дитерпены, липиды, аминокислоты, кардиометаболический риск, ожирение

**CHEMICAL COMPOSITION, NUTRITIONAL VALUE
OF COFFEE AND ITS IMPACT ON CONSUMER HEALTH.
A SUBJECT FIELD REVIEW**¹Burak L.Ch., ²Gulina S.V.¹Limited Liability Company BELROSAKVA, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com;²Limited Liability Company Vildost, Minsk, e-mail: svetlana.gulina@wildost.by

The aim of the study is to review current knowledge about the chemical composition of coffee, its nutritional value and impact on consumer health. The review includes articles published in English and Russian in 2010–2024. A search for scientific literature in English on this topic was conducted using keywords in the bibliographic databases Scopus, PubMed and Web of science. To select scientific articles in Russian, a search was conducted using keywords in the Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU. The work used scientific methods: searching and screening of scientific literature, data extraction, analysis, systematization and generalization. Among the articles that met the inclusion criteria, 49 studies were selected to compile this review. The results of numerous scientific studies confirm that coffee is one of the most consumed drinks in the world, recognized for its unique taste and aroma, as well as its social and health effects. Coffee contains many nutrients and biologically active substances, the quantitative composition of which may vary depending on their origin, processing and extraction methods. The collected evidence in the literature shows that regular consumption of coffee containing functional substances such as polysaccharides, phenolic compounds and melanoidins may have potential beneficial effects on cardiometabolic risk factors such as abdominal obesity, hyperglycemia and lipogenesis. On the other hand, coffee compounds such as caffeine, diterpenes and advanced glycation end products may be risk factors for cardiometabolic health. It should be noted that the synergy between these compounds and their effects on bioactivity have not been fully elucidated. The materials presented in this review may be of interest to both scientific research and consumers.

Keywords: coffee, roasting, chemical composition, extraction, brewing, caffeine, polysaccharides, diterpenes, lipids, amino acids, cardiometabolic risk, obesity, diabetes

Введение

Кофе является одним из самых потребляемых напитков в мире. Широко известны его органолептические свойства – аромат и вкус, а также биоактивные функции –

иммуностимулирующее, антиоксидантное, нейропротекторное и кардиопротекторное действие [1]. Хорошо известно, что химический состав варьируется в зависимости от места происхождения кофе, смешивания,

обжарки и помола [2, 3]. Кроме того, в зависимости от географических районов этот напиток готовят по-разному, что меняет его химический профиль. Было установлено, что различные профили заваривания обладают кардиопротекторным потенциалом в различных группах населения, как в здоровом, так и в болезненном состоянии [4]. Однако структурно-функциональные связи между химическим составом заваривания и его биоактивностью, в частности кардиометаболической защитой, до сих пор не раскрыты. Одна из причин этого может быть связана с тем фактом, что диетические интервенционные исследования, рассматривающие кофе, больше сосредоточены на биомаркерах здоровья потребления кофе в целом, чем на понимании химических соединений, присутствующих в заварке, определении того, какие из них отвечают за эту биоактивность, а также в прояснении возможного синергетического эффекта [5]. Напиток в основном состоит из высокомолекулярных соединений, таких как полисахариды (например, арабиногалактаны (АГ) и галактоманнаны (ГМ), меланоидины, белки), и низкомолекулярных соединений, таких как фенольные соединения (например, хлорогеновые кислоты (ХГК), липиды и конечные продукты гликирования) [6, 7]. Одним из наиболее распространенных соединений, присутствующих в кофейном напитке, является растворимая пищевая клетчатка, состоящая из полисахаридов ГМ и АГ, а также меланоидинов. Известно, что эти соединения влияют на биодоступность холестерина, в основном за счет изменения вязкости среды в просвете кишечника, ограничивая диффузию соединений к эпителию кишечника, а также способны изолировать желчные соли, которые имеют решающее значение для эмульгирования холестерина и, следовательно, его биодоступности [8]. Более того, эти высокомолекулярные соединения из-за содержания углеводов могут ферментироваться микробиотой, способствуя полезным бактериям (пребиотический эффект), обеспечивая высвобождение фенольных соединений, короткоцепочечных жирных кислот (КЦЖК) и биотрансформацию желчных солей [9]. Эти соединения могут оказывать различное действие на метаболизм холестерина, а именно действовать как ингибиторы холестеринэстеразы в просвете кишечника, снижать эндогенный синтез холестерина в печени или влиять на рециркуляцию желчных солей [10]. Таким образом, соединения кофе могут влиять на кардиометаболические факторы риска, такие как абдоминальное ожирение, дислипидемия и гипергликемия

[11]. Вместе с тем общеизвестно, что кофейные напитки содержат в своем составе кофеин, связанный с гипертензией, липиды, такие как кахвеол и кафестол, влияющие на уровень холестерина в крови, или конечные продукты гликирования (КПГК), участвующие в окислительном стрессе [12]. Тем не менее, концентрацию этих соединений в напитке можно модулировать, чтобы минимизировать их содержание, что позволяет улучшить полезные свойства кофе [13, 14]. Этим обусловлена **цель исследования** – обзор современных знаний о химическом составе кофе, его пищевой ценности и влиянии на здоровье потребителей.

Материалы и методы исследования

Поиск научной литературы по теме обзора проводили в библиографических базах «Scopus», «PubMed» и «Web of Science» с применением дескрипторов «coffee», «roasting», «chemical composition», «extraction», «brewing», «caffeine», «polysaccharides», «diterpenes», «cardiometabolic risk», «obesity», «diabetes». Поиск источников на русском языке проводили в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU по ключевым словам: «кофе», «обжарка», «химический состав», «экстракция», «заваривание», «кофеин», «полисахариды», «дитерпены», «липиды», «аминокислоты», «гипертензия», «кардиометаболический риск», «сахарный диабет». Обзор научных публикаций проводили за период 2010–2024 гг. Более ранние научные статьи изучали только при отсутствии новых публикаций по теме исследования. При выполнении работы применяли методы анализа, систематизации и обобщения. Изначально было отобрано и изучено 317 научных публикаций. Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 49 исследований.

Критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу, были следующими:

Критерии включения:

(1) Статья написана в период 2010–2024 гг.

(2) Статья соответствует теме исследования.

(3) Типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, монографии.

Критерии исключения:

(1) Статья не соответствует теме данного обзора.

(2) Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

**Химический состав кофе от зеленых
зерен до заваренного напитка**

Химический состав зеленых зерен

Зеленые кофейные зерна получают из кофейных ягод, которые являются сырыми плодами кофейного растения. Существует два достаточно исследованных сорта кофейных растений: *Coffea arabica* и *Coffea canephora*. В кофейных зернах этих двух видов содержатся следующие химические элементы, которые можно расположить по убыванию содержания следующим образом: 34–53% нерастворимых полисахаридов (в основном целлюлозы и гемицеллюлозы), 8–18% липидов (в основном масла и воска), 8,5–12% белков, 6–12,5% растворимых углеводов (моносахаридов, олигосахаридов и полисахаридов), 3,5–14% ХГК, 1,3–2,9% нелетучих алифатических кислот, 0,8–4,0% кофеина, 0,3–1,2% тригонеллина, 3–5,4% минералов, 0,2–0,8% свободных аминокислот и 0,1% летучих кислот в пересчете на сухую массу. Наиболее отличительным признаком *C. arabica* является более высокое количество липидов, которое составляет 15–18%, по сравнению с *C. canephora*, где этот показатель колеблется от 8 до 12%, тогда как последний показывает более высокое количество кофеина – от 1,7 до 4% – по сравнению с 0,8–1,4% в зернах арабики [15]. Содержание ХГК, описанное для *C. arabica*, находится в диапазоне 3,5–7,5% (по массе сухого вещества (СВ)), тогда как для *C. canephora* оно составляет 7,0–14,0% (по массе СВ), что показывает самое высокое содержание у более позднего сорта [16]. Количество белка и аминокислот в *C. arabica* меньше, чем в *C. canephora*. Среди незаменимых аминокислот лейцин (0,84 г/100 г СВ), лизин (0,63 г/100 г СВ) и аргинин (0,61 г/100 г СВ) являются наиболее распространенными аминокислотами в сортах кофе [17].

Химический состав жареных бобов

После получения сушеного зеленого кофейного зерна следующим шагом является его термическая обжарка, в результате которой получается обжаренное кофейное зерно, на основе которого будет создан напиток. Процесс обжарки кофейного зерна осуществляется с использованием температурных градиентов (в производстве используют температуры в диапазоне 180–250°C), сопряженных с температурными циклами, что вызовет несколько реакций в соединениях, присутствующих в зеленом зерне. Следовательно, это обуславливает измене-

ния в химическом составе, что, в свою очередь, влияет на органолептические свойства кофейного зерна, а также на их потенциальную биологическую активность. Обжарка приводит к потере веса (п.в) кофейных зерен, что позволяет охарактеризовать стадию обжарки, а именно светлую (11% п.в), среднюю (14% п.в) и темную обжарку (20% п.в). С обжаркой связаны несколько химических реакций, а именно реакции Майяра, в итоге потемнением, которые происходят между аминокислотами, свободными сахарами и ХГК, что приводит к образованию конечных продуктов гликирования (КПГК), которые могут иметь низкую молекулярную массу (например, *N* ε-(карбоксиметил) лизин, *N* ε-(1-карбоксиэтил)лизин и *N* δ-(5-гидро-5-метил-4-имидазолон-2-ил)-орнитин, в других случаях) или высокомолекулярных азотсодержащих соединений (например, меланоидин, 17% СВ). Более того, обжарка также увеличивает растворимость нескольких полисахаридов, таких как АГ и ГМ, которые высвобождаются из структуры клеточной стенки зеленых зерен, когда они набухают и подвергаются деполимеризации. Известно, что АГ более подвержены деградации при обжарке, чем ГМ. Содержание полисахаридов в жареных зернах (24–39%) ниже, чем в зеленом кофе (37–55%, при этом в *C. arabica* оно выше, чем в *C. canephora*). Другой класс соединений, которые могут претерпевать изменения при обжарке, – это липиды, их количество обычно увеличивается при обжарке (может увеличиваться с 11 до 20%). Основными липидными соединениями являются триглицериды, составляющие около 75%, тогда как дитерпены (кафестол, кахвеол и 16- *O*-метилкафестол) составляют 20%, а остальное – стерины, токоферолы и свободные жирные кислоты. При обжарке концентрации кафестола и кахвеола разлагаются, что приводит к образованию дегидрокафестола и дегидрокахвеола. Соотношения кафестола и дегидрокафестола можно использовать для характеристики степени обжарки кофе. Липид 16-метилкафестол, характерный для *C. canephora*, обычно не изменяется при обжарке и может использоваться в качестве маркера для определения возможного присутствия *C. canephora* в кофейных смесях на основе *C. arabica*.

Фенольные соединения также являются классом соединений, имеющих в обжаренных кофейных зернах, а именно ХГК, включая кофейилхинные кислоты (КХК), дикофейилхинные кислоты (диКХК), ферулоилхинные кислоты (ФХК) и *p*-кумароилхинные кислоты (КуХК). Увеличение степени обжарки приводит к снижению концентрации

ХГК [18, 19, 20]. Уровень кофеилхинной кислоты значительно снижается при обжарке – с 5,5–10% до 1,2–4,6%, тогда как уровень хинной кислоты (основного продукта распада КХК), γ -хинидина и силлохинной кислоты увеличивается [18]. Таким образом, содержание хинной кислоты можно использовать в качестве индикатора степени обжарки в результате распада ХГК [21]. В ходе процесса обжарки γ -хинидин преобразуется после этерификации в силлохинную кислоту [21]. В условиях темной обжарки хинные кислоты могут разлагаться, образуя фенол, катехол, бензойную кислоту и 2-фурилметанол. Кроме того, чем дольше длится обжарка, тем больше образуется лактонов изомеров ХКГ (т.е. лактонов ФХК, лактонов КХК и лактонов диКХК) [21].

Другим продуктом распада ХГК являются коричневые кислоты, которые служат предшественниками молекул, отвечающих за вкус. Помимо вкуса, аромат является еще одной уникальной особенностью кофе, которая также зависит от обжарки и задействованных реакций, таких как деградация Майяра, Штрекера и пиролиз. Обычно считается, что сорт *C. arabica* имеет более высокое качество аромата, чем *C. canephora*. Было идентифицировано более 1000 соединений, принадлежащих к нескольким химическим семействам, таким как кислоты, спирты, альдегиды, эфиры, фураны, кетоны, фенолы, пиразины, пиридины, пирролы, тиофены и соединения серы. Кофейная, хинная кислоты и ХГК обычно приводят к образованию летучих соединений [19, 21].

Модуляция заваривания кофе: влияние на химический состав

Заключительным этапом потребления кофе является его экстракция из кофейного порошка. Кофейный напиток получается в результате взаимодействия твердого вещества и жидкости и включает три этапа: (1) поглощение воды молотым кофе; (2) массоперенос растворимых твердых веществ из молотого кофе в горячую воду; и (3) отделение извлеченной жидкости от оставшихся твердых веществ. Для получения экстрактов можно использовать несколько методов, а именно: настой, отвар или перколяцию. Настой получается в результате контакта молотого кофе с кипящей водой в течение короткого периода времени с последующей фильтрацией или декантацией. Отвар характеризуется кипячением молотого кофе в течение определенного периода времени (например, как это происходит при экстракции турецкого кофе). При перколяции горячая вода проходит через кофейный порошок в течение короткого периода времени,

обычно под давлением, как в случае приготовления эспрессо или мока [22]. В зависимости от способа приготовления напитка используются различные степени помола – от 100 до 1000 мкм, что позволяет растворять нелетучие и летучие соединения. Большинство напитков имеют узкое однородное распределение размера частиц [23]. Другим распространенным напитком является растворимый кофе, при изготовлении которого после процессов обжарки и помола применяется дополнительный этап экстракции. Распылительная сушка является наиболее традиционным методом, при котором концентрированный кофейный экстракт распыляется в сушильной камере, а вода удаляется при температурах от 200 до 300°C. Для приготовления эспрессо требуется бимодальное распределение размеров частиц в целях улучшения перколяционной экстракции, что в то же время обеспечивает хорошую циркуляцию воды через более крупные частицы кофе и извлечение соединений из более мелких частиц [23]. Размер частиц влияет на их содержание в чашке, обуславливая общее содержание твердых веществ, которое может варьировать от 0,5% в фильтрованном кофе до 16% в заваренном кофе [11]. Употребление кофейного напитка способствует ежедневному поступлению в организм растворимых пищевых волокон, которые в основном состоят из полисахаридов ГМ и АГ II типа, а также меланоидинов. Содержание пищевых волокон в кофе светлой обжарки ниже, чем в кофе темной обжарки. Кофейный напиток с самым высоким содержанием пищевых волокон (на чашку) – это растворимый кофе (0,38 г), за которым следуют эспрессо (0,26 г) и фильтрованный кофе (0,23 г) [11]. Было определено, что типичный кофе эспрессо содержит в среднем 1,21 г общих сухих веществ, из которых в среднем 242 мг составляют растворимые пищевые волокна. Эти растворимые пищевые волокна могут быть разложены на 62 мг ГМ, 48 мг полисахаридов АГ и 123 мг меланоидинов [24]. Повышение степени обжарки приводит к снижению степени полимеризации и разветвленности ГМ и АГ, что позволяет им быть более извлекаемыми. Более того, соотношение между ГМ и АГ отличается в растворимом кофе [25]. По сравнению с эспрессо и фильтрованным кофе, от 0,4 до 1,3 [26]. Различия в составе углеводов и гликозидных связей влияют на ферментацию, поскольку известно, что ГМ, в основном состоящий из маннозо-связанной ($\beta 1 \rightarrow 4$) основной цепи и разветвленный с остатками галактозы, связанными ($\alpha 1 \rightarrow 6$), более подвержен деградации, чем АГ [27]. Как упоминалось

ранее, пищевые волокна также состоят из меланоидинов, которые представляют собой высокомолекулярные азотсодержащие соединения коричневого цвета, образующиеся в результате реакций Майяра во время обжарки кофейных зерен. Содержание меланоидинов в эспрессо, мока и фильтрованном кофе составляет около 2,0 мг/мл. Помимо того что меланоидины состоят из углеводов и белков, они имеют в своем составе ХГК, которые могут быть либо ковалентно связаны, либо адсорбированы. ХГК относится к классу фенольных соединений и отвечает за терпкость, горечь и кислотность напитков, а также связана с несколькими функциональными свойствами, такими как антиоксидантная активность [3]. Наиболее распространенным ХГК в кофейном напитке является 5-КХК, который состоит из хинной кислоты и кофейной кислоты. Содержание ХГК выше в *C. canephora* и уменьшается со степенью обжарки. Уровни содержания ХГК на чашку эспрессо зависят от способа приготовления заваривания и колеблются от 16 до 400 мг и от 60 до 420 мг при заваривании во френч-прессе [3]. Другим распространенным соединением, присутствующим в кофейных напитках, является кофеин – алкалоид, содержание которого не сильно зависит от обжарки и выше в кофейных напитках из *C. canephora* [3, 28]. Однако содержание кофеина зависит от методов экстракции. Экстракт эспрессо имеет концентрацию в среднем 2,4 мг/мл, американо – 1,4 мг/мл и мока – 1,7 мг/мл [3]. Поскольку кофейный напиток представляет собой водный экстракт, содержание липидов в напитке относительно невелико, наиболее значимыми из них являются триглицериды и дитерпены [29]. Содержание последних выше в зернах *C. arabica*, обычно они этерифицированы жирными кислотами. Их концентрация зависит от способа заваривания, более высокая концентрация (6–12 мг на чашку) отмечается в заваренном и нефильтрованном кофе (например, турецком кофе), чем при других способах заваривания, включая фильтрацию [30] (например, кофе эспрессо содержит около 1,2–2,4 мг/чашку) [31]. В кофейном напитке были определены конечные продукты гликования (КПГК) – соединения *N* ε-(1-карбокситил)лизина и *N*δ-(5-гидро-5-метил-4-имидазолон-2-ил)-орнитин в количестве 0,01 мг/100 г и 0,24 мг/100 г соответственно [31].

Влияние кофе на здоровье потребителей

Как отмечено ранее, кофейный напиток представляет собой сложную смесь ингриди-

ентов, которая может содержать более тысячи соединений, включая кофеин, фенольные соединения, такие как ХГК, и дитерпены, такие как кахвеол и кафестол, растворимые волокна и некоторые вторичные метаболиты. Такие факторы, как место происхождения, сорт зерен, обжарка и помол, могут определять состав и концентрацию этих соединений в кофейном напитке [32, 33]. Благодаря разнообразию химического состава кофе может обладать различными биоактивными свойствами, такими как антиоксидантные и противовоспалительные свойства, а также оказывать благотворное влияние на кардиометаболические факторы здоровья, такие как ожирение, сахарный диабет 2-го типа (СД2), метаболический синдром (МС) и сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) [1]. Широкая популярность потребления кофе подчеркивает важность понимания потенциальной пользы для здоровья и рисков, которые он может представлять, что может иметь важные последствия для общественного здравоохранения [34]. Результаты многих исследований выявили защитное действие потребления кофе на значимые основные кардиометаболические расстройства, хотя влияние различных дозировок кофе на показатели кардиометаболического риска изучено недостаточно. Влияние потребления кофе на кардиометаболическое здоровье трудно оценить и измерить. Результаты исследований показывают, что регулярное употребление 3–4 чашек кофе в день оказывает благотворное влияние на организм при сердечно-сосудистых заболеваниях, сердечной недостаточности, артериальном давлении, сердечных аритмиях, ожирении и сахарном диабете. Тем не менее, важно подчеркнуть, что чрезмерное потребление кофе способно вызвать развитие бессонницы и раздражительности, что, в свою очередь может способствовать возникновению гипертонии и сердечно-сосудистых заболеваний [35, 36].

Ожирение – это заболевание, которое характеризуется избыточным накоплением жировой ткани (особенно абдоминальной). Эта ткань играет жизненно важную роль в регуляции здоровья сердечно-сосудистой системы, выделяя различные биоактивные продукты, которые оказывают как эндокринное, так и паракринное действие на сердечно-сосудистую систему. Таким образом, ожирение влияет на ряд неинфекционных заболеваний, включая диабет, сердечно-сосудистые заболевания, такие как высокий уровень холестерина липопротеинов низкой плотности (ЛПНП-Х), низкий уровень холестерина липопротеинов высокой плотности (ЛПВП-Х), высокий уровень тригли-

перидов (ТГ) и гипертония, что вызывает серьезные проблемы общественного здравоохранения во всем мире [37]. Установлено, что из-за содержания кофеина в кофе он повышает термогенез, выработку тепла и базальную скорость метаболизма [38]. Кроме того, усиление экспрессии генов, связанных с митохондриальным биогенезом и термогенезом, также стимулируется компонентами кофе [39]. Регуляция аппетита – еще один эффект кофе, который может влиять на выброс желудочно-кишечных гормонов, таких как желудочный ингибирующий пептид (ЖИП) и глюкагоноподобный пептид 1 (ГПП-1). Таким образом, он может активировать анорексигенные нейроны (CART, POMC) и стимуляцию аппетита, одновременно ингибируя орексигенные нейроны (AgRP, NPY) и аппетит [39, 40]. Полифенолы в кофе способствуют снижению риска ожирения, вызванного диетой, подавляя фактор транскрипции SREBP-1c (стерол-регуляторный элемент, связывающий белок-1c) и увеличивая расход энергии, подавляя липогенные ферменты [40, 41]. Другой механизм, с помощью которого соединения кофе, присутствующие в зернах и мякоти, могут помочь в профилактике набора веса, заключается в модулировании микробиоты кишечника, увеличении ее разнообразия и изменении соотношения *Firmicutes* и *Bacteroidetes* [42, 43]. Кофейные меланоидины, а также полисахариды, такие как ГМ и АГ, могут проявлять пребиотическую активность, производя короткоцепочные жирные кислоты (КЦЖК с известными эффектами против ожирения) [41, 42]. Различная степень ферментации этих полисахаридов приводит к производству различных количеств КЦЖК, которые могут всасываться в кровоток и воздействовать на несколько тканей. Было показано, что выработка пропионата ингибирует синтез холестерина в печени, а соотношение ацетат/пропионат было предложено в качестве биомаркера для отслеживания липидного метаболизма. Следовательно, ферментация полисахаридов кофе может способствовать снижению риска возникновения сердечно-сосудистых заболеваний [38, 42]. Кроме того, ХГК и кофейная кислота могут усиливать экспрессию PPAR- α , окисление жирных кислот в печени и снижать всасывание глюкозы в тонком кишечнике. Кофеин также усиливает перекисное окисление липидов, а кофеин и меланоидин способны снизить потребление энергии с пищей, что является дополнительными механизмами действия кофе против ожирения [42, 44]. Была описана корреляция между потреблением кофе и более низкими показателями

висцерального ожирения, а потребление более трех чашек кофе в день показало более низкий риск саркопенического ожирения относительно тех людей, которые потребляют менее 1 чашки в день [45]. Авторы сообщили, что люди, которые потребляют более двух чашек кофе в день, имеют более низкий индекс массы тела (ИМТ), но существенной разницы в ежедневном потреблении энергии не наблюдалось. Это же исследование также показало, что потребление кофе без кофеина связано с более низким общим потреблением энергии, тогда как более высокое потребление кофеина связано с более высоким общим потреблением энергии [44]. Хотя чрезмерное потребление кофеина было связано с тревогой, бессонницей и потенциальными неблагоприятными последствиями для развития мозга и репродуктивных органов у эмбрионов, а также с повышенным выведением кальция и более высоким риском переломов, обширные исследования показали, что потребление кофе может положительно влиять на здоровье и долголетие, несмотря на эти риски [44]. Хотя сбалансированная диета и регулярные физические упражнения являются основными факторами в борьбе с ожирением, защитные свойства кофе против кардиометаболических факторов риска, особенно ожирения, также значимы. Следует отметить, что смесь растворимого кофе с сахаром и/или сливками может повысить риск ожирения из-за дополнительного потребления калорий.

Кофе содержит множество химических соединений, таких как растворимые волокна, включая полисахариды, меланоидины, и фенольные соединения с кардиопротекторным потенциалом, таким как антигиперхолестеринемическое, антигипертензивное, противовоспалительное и антитромботическое действие. Однако употребление кофе также может отрицательно влиять на метаболизм холестерина из-за присутствия дитерпенов, которые способны воздействовать на биодоступность холестерина в кишечнике [11].

Связь между кофе и здоровьем сердечно-сосудистой системы по-прежнему остается спорной в литературе, создавая парадокс [46]. В метаанализе исследования потребление кофе с кофеином обратно коррелировало с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Однако связь между сердечно-сосудистыми заболеваниями была нелинейной, и наибольшее снижение риска было зафиксировано при 3–4 чашках в день (~120 мл/чашка) [47]. Потребление кофеина обычно называют основным фактором риска возникновения сердечно-сосудистых заболеваний из-за

повышения артериального давления. Хотя краткосрочное потребление было связано с гипертоническими эффектами, долгосрочное потребление не было связано со значительным повышением артериального давления [48]. Однако следует учитывать генетическое изменение CYP1A2, поскольку этот фермент метаболизирует 90–95% кофеина. Следовательно, кофе может повышать артериальное давление, вызывать жесткость аорты и проаритмию при краткосрочном потреблении. Однако в долгосрочной перспективе он может снизить мерцательную аритмию, ишемию, сердечную недостаточность и риск ишемической болезни сердца и сахарного диабета 2-го типа. Наряду с гипертонией еще одним важным фактором риска для кардиометаболического здоровья является высокий липидный профиль крови, в основном уровень холестерина в крови. Было установлено, что ХГК ослабляет накопление липидов в печени за счет повышения экспрессии холестерина 7- α гидроксилазы (CYP7A1) и снижения уровней фактора роста фибробластов 15 и фарнезоидного X-рецептора (FXR) в кишечнике [49]. Было также показано, что экстракты, содержащие высокомолекулярные соединения, такие как АГ и ГМ, которые являются наиболее распространенными полисахаридами, присутствующими в растворимой в кофе клетчатке, секвестрируют желчные соли, снижая как биодоступность холестерина, так и его биодоступность.

Заключение

Кофе широко потребляется во всем мире, что в основном обусловлено его стимулирующим эффектом, вкусом и ароматом. Он имеет сложную химическую структуру, состоящую из более чем тысячи соединений, некоторые из них обладают высокой биологической активностью. Знание взаимосвязи между химической структурой кофе и механизмами действия соединений, входящих в его состав, имеет решающее значение для понимания их пользы для здоровья или рисков. Кардиометаболические эффекты кофе до конца не изучены и постоянно обсуждаются научным сообществом. С одной стороны, во многих литературных источниках подчеркивается, что потребление кофе оказывает некоторое защитное действие на организм при значительном числе основных кардиометаболических расстройств. Фенольные соединения, такие как кофеин и хлорогеновые кислоты, были идентифицированы с увеличением антиоксидантных и противовоспалительных биомаркеров как ингибиторы некоторых ферментов, связанных с кардиометабо-

лическим здоровьем и снижением процесса всасывания липидов и глюкозы в кишечнике. Они улучшают здоровье микробиома кишечника, демонстрируют пребиотический потенциал и уменьшают дисбактериоз. Определено, что высокомолекулярные соединения, такие как полисахариды арабиногалактаны (АГ) и галактоманнаны (ГМ), и меланоидины, которые являются частью пищевых волокон, присутствующих в кофейном напитке, влияют на популяцию микробиоты, что приводит к преобразованию вторичных желчных солей и влияет на метаболизм холестерина. С другой стороны, известно, что не все соединения кофе оказывают положительное влияние на кардиометаболическое здоровье. Помимо описанных положительных эффектов, кофеин действительно имеет амбивалентные эффекты, поскольку он также способствует повышению артериального давления. Было описано, что дитерпены и конечные продукты гликирования увеличивают абсорбцию холестерина и, соответственно, способствуют окислительному стрессу. Тем не менее, содержание этих соединений может варьироваться в зависимости от нескольких факторов, таких как место происхождения, смешивание, измельчение, обжарка и методы экстракции. Поскольку химический профиль кофе не рассматривается в большинстве интервенционных исследований, это может частично объяснить противоречивые результаты касательно кофе в отношении кардиометаболического здоровья. Также следует подчеркнуть, что комбинированное воздействие этих соединений и их влияние на биоактивность до конца не исследованы и не изучены. Таким образом, структурно-функциональные связи, описанные в данном обзоре, могут представлять интерес как для научных исследований, так и для потребителей.

Список литературы

1. Barrea L., Pugliese, G., Frias-Toral E., El Ghoch M., Castellucci B., Chapela S. P., Carignano M. D. L. A., Laudisio D., Savastano S., Colao A., & Muscogiuri G. Coffee consumption, health benefits and side effects: A narrative review and update for dietitians and nutritionists // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. V. 63. No. 2. P. 1238–1261. DOI: 10.1080/10408398.2021.1963207.
2. Лашманова Л.А., Ибрагимова Р.Ю., Борисова А.В. Влияние способов заваривания кофе на органолептические и физико-химические свойства // *Вестник КрасГАУ*. 2023. № 3(192). С. 181–187. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-3-181-187.
3. Cordoba N., Fernandez-Alduenda M., Moreno F.L., Ruiz Y. Coffee extraction: A review of parameters and their influence on the physicochemical characteristics and flavour of coffee brews // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. V. 96. P. 45–60. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.004.
4. Tverdal A., Selmer R., Cohen J.M., Thelle D.S. Coffee consumption and mortality from cardiovascular diseases and

- total mortality: Does the brewing method matter? // *European Journal of Preventive Cardiology*. 2020. V. 27. No. 18. P. 1986–1993 DOI: 10.1177/2047487320914443.
5. Park Y., Cho H., Myung S.-K. Effect of coffee consumption on risk of coronary heart disease in a systematic review and meta-analysis of prospective cohort studies // *The American Journal of Cardiology*. 2023. V. 186. P. 17–29. DOI: 10.1016/j.amjcard.2022.10.010.
6. Dippong T., Dan M., Kovacs M.H., Kovacs E.D., Levei E.A., Cadar O. Analysis of volatile compounds, composition, and thermal behavior of coffee beans according to variety and roasting intensity // *Foods*. 2022. V. 11(19). P. 3146. DOI: 10.3390/foods11193146.
7. Saud S., Salamattullah A.M. Relationship between the chemical composition and the biological functions of coffee // *Molecules* (Basel, Switzerland). 2021. V. 26. P. 7634. DOI: 10.3390/molecules26247634.
8. Pires C.L., Silva I.M.V., Coimbra M.A., Moreno M.J., Coreta-Gomes F. Effect of coffee on the bioavailability of sterols // *Foods*. 2022. V. 11(19). P. 119. DOI: 10.3390/foods11192935.
9. Shaheen S., Shorbagi M., Lorenzo J.M., Farag M.A. Dissecting dietary melanoidins: Formation mechanisms, gut interactions and functional properties // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. V. 62. P. 8954–8971. DOI: 10.1080/10408398.2021.1937509.
10. Ye X., Li J., Gao Z., Wang D., Wang H., Wu J. Chlorogenic acid inhibits lipid deposition by regulating the enterohepatic FXR-FGF15 pathway // *BioMed Research International*. 2022. V. 2022. P. 4919153. DOI: 10.1155/2022/4919153.
11. Machado F., Coimbra M.A., Castillo M.D.D., Coreta-Gomes F. Mechanisms of action of coffee bioactive compounds – A key to unveil the coffee paradox // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. V. 3. P. 1–23. DOI: 10.1080/10408398.2023.2221734.
12. Bansal S., Burman A., Tripathi A.K. Advanced glycation end products: Key mediator and therapeutic target of cardiovascular complications in diabetes // *World Journal of Diabetes*. 2023. V. 14. P. 1146. DOI: 10.4239/wjd.v14.i8.1146.
13. Nerurkar P.V., Yokoyama J., Ichimura K., Kutscher S., Wong J., Bittenbender H.C., Deng, Y. Medium roasting and brewing methods differentially modulate global metabolites, lipids, biogenic amines, minerals, and antioxidant capacity of Hawai'i-grown coffee (*Coffea arabica*) // *Metabolites*. 2023. V. 13. P. 412. DOI: 10.3390/metabo13030412.
14. Yildirim S., Demir E., Gok I., Aboul-Enein H.Y. Use of electrochemical methods to determine the effect of brewing techniques (Espresso, Turkish and Filter coffee) and roasting levels on the antioxidant capacity of coffee beverage // *Journal of Food Science and Technology*. 2023. V. 60. No. 7. P. 1933–1943. DOI: 10.1007/s13197-022-05460-x.
15. D'Amelio N., De Angelis E., Navarini L., Schievano E., Mammì S.J.T. Green coffee oil analysis by high-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy // *Talanta*. 2013. V. 110. P. 118–127. DOI: 10.1016/j.talanta.2013.02.024.
16. Dziki D., Gawlik-Dziki U., Pecio Ł., Różyło R., Świeca M., Krzykowski A. Ground green coffee beans as a functional food supplement—Preliminary study // *Technology*. 2015. V. 63(1). P. 691–699. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.03.076.
17. Dong W., Tan L., Zhao J., Hu R., Lu M.J.M. Characterization of fatty acid, amino acid and volatile compound compositions and bioactive components of seven coffee (*Coffea robusta*) cultivars grown in Hainan Province, China // *Molecules* (Basel, Switzerland). 2015. V. 20(9). P. 16687–16708. DOI: 10.3390/molecules200916687.
18. Hong S.J., Boo C.G., Yoon S., Jeong H., Jo S.M., Youn M.Y., Shin E.-C. Impact of roasting conditions on physicochemical, taste, volatile, and odor-active compound profiles of *Coffea arabica* L.(cv. Yellow Bourbon) using electronic sensors and GC–MS–O using a multivariate approach // *Food Chemistry*. 2024. V. 21. P. 101119. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101119.
19. Liao Y.-C., Kim T., Silva J.L., Hu W.-Y., Chen B.-Y. Effects of roasting degrees on phenolic compounds and antioxidant activity in coffee beans from different geographic origins // *Lwt*. 2022. V. 168. P. 113965. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113965.
20. Тищенко Е.А., Цюпко Т.Г., Милевская В.В., Темердашев А.В. Идентификация и хроматографическое определение биоактивных компонентов в образцах растворимого кофе // *Аналитика и контроль*. 2017. Т. 21, № 3. С. 251–261.
21. Wei F., Furihata K., Koda M., Hu F., Miyakawa T., Tanokura M. Roasting process of coffee beans as studied by nuclear magnetic resonance: Time course of changes in composition // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012. V. 60(4). P. 1005–1012. DOI: 10.1021/jf205315r.
22. Derossi A., Ricci I., Caporizzi R., Fiore A., Severini C. How grinding level and brewing method (Espresso, American, Turkish) could affect the antioxidant activity and bioactive compounds in a coffee cup // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018. V. 98. P. 3198–3207. DOI: 10.1002/jsfa.8826.
23. von Blittersdorff M., Klatt C. The grind – Particles and particularities. In *The craft and science of coffee* // Elsevier. 2017. P. 311–328. DOI: 10.1016/B978-0-12-803520-7.00013-X.
24. Lopes G.R., Ferreira A.S., Pinto M., Passos C.P., Coelho E., Rodrigues C., Figueira C., Rocha S.M., Nunes F.M., Coimbra M.A. Carbohydrate content, dietary fibre and melanoidins: Composition of espresso from single-dose coffee capsules // *Food Research International*. 2016. V. 89. P. 989–996. DOI: 10.1016/j.foodres.2016.01.018.
25. Lopes G.R., Passos C.P., Rodrigues C., Teixeira J.A., Coimbra M.A. Impact of microwave-assisted extraction on roasted coffee carbohydrates, caffeine, chlorogenic acids and coloured compounds // *Food Research International*. 2020. V. 129. P. 108864. DOI: 10.1016/j.foodres.2019.108864.
26. Lopes G.R., Passos C.P., Petronilho S., Rodrigues C., Teixeira J.A., Coimbra M.A. Carbohydrates as targeting compounds to produce infusions resembling espresso coffee brews using quality by design approach // *Food Chemistry*. 2021. V. 344. P. 128613. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128613.
27. Angeloni G., Guerrini L., Masella P., Bellumori M., Daluiso S., Parenti A., Innocenti M. What kind of coffee do you drink? An investigation on effects of eight different extraction methods // *Food Research International*. 2019. V. 116. P. 1327–1335. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.10.022.
28. Olechno E., Puścion-Jakubik A., Zujko M.E., Socha K. Influence of various factors on caffeine content in coffee brews // *Foods*. 2021. V. 10. P. 1208. DOI: 10.3390/foods10061208.
29. León D., Medina S., Londoño-Londoño J., Jiménez-Cartagena C., Ferreres F., Gil-Izquierdo A. Anti-inflammatory activity of coffee. In A. Farah & A. Farah (Eds.), *Coffee: Consumption and health implications* // *The Royal Society of Chemistry*. 2019. P. 54–57. DOI: 10.1039/9781788015028-00057.
30. Lim L.-T., Zwicker M., Wang X. Coffee: One of the most consumed beverages in the world. In *Comprehensive biotechnology* // Elsevier. P. 275–285. DOI: 10.1016/B978-0-444-64046-8.00462-6.
31. Scheijen J.L., Clevers E., Engelen L., Dagnelie P.C., Brouns F., Stehouwer C.D., Schalkwijk C.G. Analysis of advanced glycation endproducts in selected food items by ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry: Presentation of a dietary AGE database // *Food Chemistry*. 2016. V. 190. P. 1145–1150. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.06.049.
32. Stoikidou T., Koidis A. Coffee and tea bioactive compounds. In *Functional foods and their implications for health promotion* // Academic Press. 2023. P. 29–53. DOI: 10.1016/B978-0-12-823811-0.00006-7.
33. Febrianto N.A., Zhu F. Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties // *Food Chemistry*. 2023. V. 412. P. 135489. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.135489.
34. Ribeiro M., Alvarenga L., Cardozo L.F.M.F., Kemp J.A., Lima L.S., Almeida J.S.D., Leal V.D.O., Stenvinkel P., Shiels P.G., Mafra D. The magical smell and taste: Can coffee be good

- to patients with cardiometabolic disease? // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. V. 64. P. 562–583. DOI: 10.1080/10408398.2022.2106938.
35. Daneschvar H.L., Smetana G.W., Brindamour L., Bain P.A., Mukamal K.J. Impact of coffee consumption on physiological markers of cardiovascular risk: A systematic review // *The American Journal of Medicine*. 2021. V. 134. P. 626–636.e2. DOI: 10.1016/j.amjmed.2020.09.036.
36. Henn M., Babio N., Romaguera D., Vázquez-Ruiz Z., Konieczna J., Vioque J., Torres-Collado L., Razquin C., Buil-Cosiales P., Fitó M. Increase from low to moderate, but not high, caffeinated coffee consumption is associated with favorable changes in body fat // *Clinical Nutrition*. 2023. V. 42. P. 477–485. DOI: 10.1016/j.clnu.2023.02.004.
37. Okati-Aliabad H., Ansari-Moghaddam A., Kargar S., Jabbari N. Prevalence of obesity and overweight among adults in the middle east countries from 2000 to 2020: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Obesity*. 2022. V. 2022. P. 8074837. DOI: 10.1155/2022/8074837.
38. Li H., Wang C., Li L., Li L. Skeletal muscle non-shivering thermogenesis as an attractive strategy to combat obesity // *Life Sciences*. 2021. V. 269. P. 119024. DOI: 10.1016/j.lfs.2021.119024.
39. Martins B.C., Soares A.C., Martins F.F., Resende A.d.C., Inada K.O.P., Souza-Mello V., Nunes N.M., Daleprane J.B. Coffee consumption prevents obesity-related comorbidities and attenuates brown adipose tissue whitening in high-fat diet-fed mice // *The Journal of Nutritional Biochemistry*. 2023. V. 117. P. 109336. DOI: 10.1016/J.JNUTBIO.2023.109336.
40. Costa-Machado L.F., Garcia-Dominguez E., McIntyre R.L., Lopez-Aceituno J.L., Ballesteros-Gonzalez A., Tapia-Gonzalez A. Peripheral modulation of antidepressant targets MAO-B and GABAAR by harmol induces mitohormesis and delays aging in preclinical models // *Nature Communications*. 2023. V. 14. P. 2779. DOI: 10.1038/s41467-023-38410-y.
41. Moslehi A., Komeili-Movahhed T., Ahmadian M., Ghoddoosi M., Heidari F. Chlorogenic acid attenuates liver apoptosis and inflammation in endoplasmic reticulum stress-induced mice // *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*. 2023. V. 26. P. 478485. DOI: 10.22038/IJBMS.2023.66827.14659.
42. Cavalcanti M.H., Roseira J.P.S., Leandro E.d.S., Arruda S.F. Effect of a freeze-dried coffee solution in a high-fat diet-induced obesity model in rats: Impact on inflammatory response, lipid profile, and gut microbiota // *PLoS ONE*. 2022. V. 17. P. e0262270. DOI: 10.1371/journal.pone.0262270.
43. Bhandarkar N.S., Mouatt P., Majzoub M.E., Thomas T., Brown L., Panchal S.K. Coffee pulp, a by-product of coffee production, modulates gut microbiota and improves metabolic syndrome in high-carbohydrate, high-fat diet-fed rats // *Pathogens*. 2021. V. 10. P. 1369. DOI: 10.3390/pathogens10111369.
44. Wang S., Han Y., Zhao H., Han X., Yin Y., Wu J., Zhang Y., Zeng X. Association between coffee consumption, caffeine intake, and metabolic syndrome severity in patients with self-reported rheumatoid arthritis: National Health and Nutrition Examination Survey 2003–2018 // *Nutrients*. 2022. V. 15. P. 107. DOI: 10.3390/nu15010107.
45. Lee D.-Y., Shin S. Sarcopenic obesity is associated with coffee intake in elderly Koreans // *Frontiers in Public Health*. 2023. V. 11. P. 990029. DOI: 10.3389/fpubh.2023.990029.
46. Terentes-Printzios D., Vlachopoulos C. Coffee and cardiovascular health: Looking through the steaming cup // Oxford University Press. 2022. V. 118. No. 7. P. e51–e53. DOI: 10.1093/cvr/cvac045.
47. di Maso M., Boffetta P., Negri E., La Vecchia C., Bravi F. Caffeinated coffee consumption and health outcomes in the US population: A dose–response meta-analysis and estimation of disease cases and deaths avoided // *Advances in Nutrition*. 2021. V. 12. No. 4. P. 1160–1176. DOI: 10.1093/advances/nmaa177.
48. Ramli N.N.S., Alkhalidy A.A., Jalil A.M.M. Effects of caffeinated and decaffeinated coffee consumption on metabolic syndrome parameters: A systematic review and meta-analysis of data from randomised controlled trials // *Medicina (Kaunas, Lithuania)*. 2021. V. 57(9). P. 957. DOI: 10.3390/MEDICINA57090957.
49. Senfingger J., Nikorowitsch J., Borof K., Ojeda F., Aarabi G., Beikler T., Mayer C., Behrendt C.A., Walther C., Zyriax B.C., Twerenbold R., Blankenberg S., Wenzel J.P. Coffee consumption and associations with blood pressure, LDL-cholesterol and echocardiographic measures in the general population // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. No. 1. P. 4668. DOI: 10.1038/s41598-023-31857-5.

СТАТЬИ

УДК 629.7.035.62

ПОСТРОЕНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ДВУХЛОПАСТНОГО АВТОРОТИРУЮЩЕГО НЕСУЩЕГО ВИНТА**Корбуков Г.М., Мензульский С.Ю.***ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»,
Москва, e-mail: s_menz@mail.ru*

В статье представлены результаты построения конечно-элементной модели двухлопастного авторотирующего несущего винта, ее валидации и расчета на собственные колебания. Описан проведенный эксперимент по определению жесткостных характеристик прототипа несущего винта, указаны граничные условия и нагружения, представлены полученные значения прогиба и деформаций лопасти несущего винта. Дано подробное описание процесса построения и структуры полученной конечно-элементной модели. Проведен статический анализ модели несущего винта с целью определения жесткостных характеристик. Выполнена валидация модели, при которой осуществлялся подбор параметров свойств материала и соединительных узлов, с целью сравнения расчетных и экспериментальных данных статического расчета. При выполнении валидации получены погрешности значений деформаций лопасти несущего винта между расчетной моделью и экспериментом, из которых сделаны выводы о сходимости валидированной конечно-элементной модели. Выполнен расчет конечно-элементной модели несущего винта на собственные колебания, определены собственные частоты и формы колебаний конечно-элементной модели несущего винта. Определена минимальная допустимая частота вращения двухлопастного авторотирующего несущего винта на этапе предраскрутки. Получен вывод о дальнейшем использовании модели в последующих испытаниях и расчетах.

Ключевые слова: авторотирующий несущий винт, конечно-элементная модель, валидация, собственные частоты, собственные формы

CONSTRUCTION AND VALIDATION OF A FINITE ELEMENT MODEL OF A TWO-BLADED AUTOROTATING MAIN ROTOR**Korbukov G.M., Menzulskiy S.Yu.***Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: s_menz@mail.ru*

The article presents the results of constructing a finite element model of a two-bladed autorotating main rotor, its validation and calculation for its own oscillations. The conducted experiment to determine the stiffness characteristics of the prototype main rotor is described, boundary conditions and loads are indicated, and the obtained values of deflection and deformations of the rotor blade are presented. A detailed description of the process of constructing and structuring the resulting finite element model is given. A static analysis of the main rotor model was carried out in order to determine the stiffness characteristics. Validation of the model was performed, in which the parameters of the properties of the material and connecting nodes were selected in order to compare the calculated and experimental data of the static calculation. During validation, errors in the values of deformations of the rotor blade between the calculated model and the experiment were obtained, from which conclusions were drawn about the convergence of the validated finite element model. The calculation of the finite element model of the main rotor for its own vibrations is performed, the natural frequencies and forms of vibrations of the finite element model of the main rotor are determined. The minimum permissible rotational speed of a two-bladed autorotating main rotor at the pre-spin stage has been determined. A conclusion was reached on the further use of the model in subsequent tests and calculations.

Keywords: autorotating rotor, finite element model, validation, eigenfrequencies, eigenforms

С 2020 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся работы по созданию наземно-воздушных вездеходов (НВВ), способных перемещаться по земле и в воздухе. В процессе предпроектного анализа НВВ было принято решение об использовании аэродинамической схемы автожира и, соответственно, установке на прототип авторотирующего несущего винта (НВ) с общим горизонтальным шарниром (ГШ). Динамика конструкции несущего винта всегда являлась одной из основных проблем винтокрылых аппаратов [1, с. 15–18; 2, с. 180–182]. В подобных задачах отправной точкой является определение собственных частот колебания кон-

струкции и построение валидированной конечно-элементной модели для дальнейших расчетных исследований [3, с. 82–88; 4].

В рамках инициативной научно-исследовательской работы в МГТУ им. Н.Э. Баумана был изготовлен специализированный экспериментальный стенд на базе мотовездехода BRP Outlander 6x6 с установленным авторотирующим несущим винтом от автожира «Казачок».

Помимо ходовых испытаний специализированный стенд был использован для экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния несущего винта мотовездехода (рис. 1). Жест-

костные испытания заключались в тензометрировании лопасти и комлевой части НВ, нагружении концевой хорды лопасти грузом весом 99,47 Н и измерении возникающих вдоль размаха лопасти линейных деформаций.

Три тензодатчика были установлены на нижнюю поверхность лопасти несущего винта (рис. 2). Лопасть, не используемая для установки тензодатчиков, была зафиксирована с помощью крепежной стропы. Нагружение было выполнено ступенями приложения нагрузки.

Результаты жесткостных испытаний, осредненные по трем измерениям, представлены в табл. 1.

Более подробно процесс проведения и результаты испытаний наглядно представлены в статье [5].

Построение модели

Построение конечно-элементной модели авторотирующего несущего винта должно выполняться в соответствии с упруго-массовыми свойствами его конструкции [6, с. 379–381; 7, 82–83].

Авторотирующий несущий винт состоит из следующих элементов: несущая балка (из трех частей: одной центральной и двух боковых), центральный болт, 2 несущих болта, 2 лопасти, 2 длинных и 2 коротких противофлаттерных стержня.



Рис. 1. Жесткостные испытания несущего винта специализированного стенда

Вид снизу

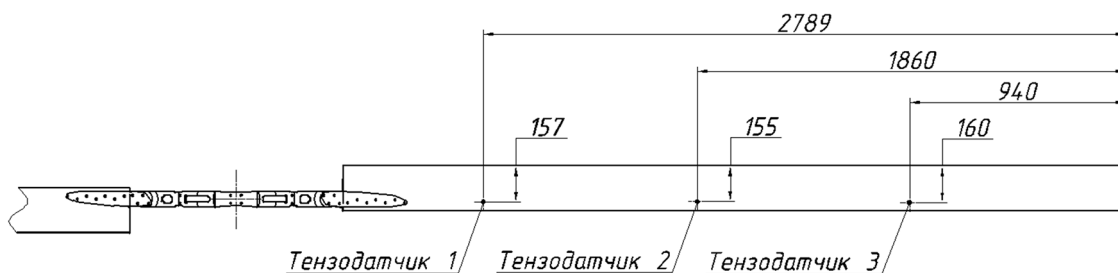


Рис. 2. Схема установки тензодатчиков

Таблица 1

Результаты прогибов и деформаций несущего винта специализированного стенда

№ ступени нагружения	Вес груза, Н	Прогиб лопасти, мм	Показания тензодатчика № 1	Показания тензодатчика № 2	Показания тензодатчика № 3
1	0,00	0	0,000000	0,000000	0,000000
2	34,43	215	-0,000201	-0,000134	-0,000053
3	70,04	449	-0,000405	-0,000268	-0,000105
4	99,47	643	-0,000571	-0,000375	-0,000147

Несущая балка несущего винта моделируется трехмерными тетраэдрическими конечными элементами первого порядка. Каждая из двух боковых частей балки соединена с центральной с помощью несущего болта.

Несущий болт моделируется как bush-элемент и соединен с краями отверстий центральной и боковой частей балки через MPC-элементы. Bush-элемент необходим для задания жесткости соединения между центральной и боковой частями балки и угла шага лопасти.

Центральный болт установлен в центральном отверстии центральной части балки, моделируется как bush-элемент, соединенный с краями отверстия в центральной балке через MPC-элементы.

Лопасть моделируется трехмерными тетра-призматическими и гексаэдрическими конечными элементами первого порядка. Для создания использовалась плоская геометрическая модель сечения лопасти. На ней создавалась сетка из двумерных треугольных и квадратных конечных элементов первого порядка, а затем эта сетка вытягивалась по нормали к плоскости сечения, образуя трехмерную сетку. Каждая лопасть крепится к боковой части несущей балки с помощью 14-и MPC-элементов (по 7 на верхней и нижней сторонах лопасти), соединенных с отверстиями в балке.

Противофлаттерные стержни моделируются трехмерными тетра-призматическими и гексаэдрическими конечными элементами первого порядка. Для создания использовались узлы конечно-элементной сетки лопасти и плоская геометрическая модель сечения стержней. С их использованием

создавалась сетка из двумерных треугольных и квадратных конечных элементов первого порядка, а затем эта сетка вытягивалась по нормали к плоскости сечения, образуя трехмерную сетку. Каждый стержень (длинный и короткий) соединен с лопастью непосредственно через узлы сетки.

Таким образом, для расчета динамики конструкции несущего винта была создана конечно-элементная модель размерностью 265 тысяч узлов.

Валидация модели

Решением задачи валидации модели несущего винта является подбор свойств материалов и соединительных узлов модели для статического анализа, при котором будут получены значения деформаций и перемещений, соответствующие полученным в результате эксперимента [8].

В качестве основного материала всей конструкции принимается алюминий. Исходные параметры: модуль упругости 1 рода 71 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3, плотность материала 2700 кг/м³.

Для согласования результатов статического анализа полученной модели с результатами эксперимента к ней приложены следующие граничные условия. На центральный болт наложены ограничение перемещений по всем осям и ограничение вращения вокруг вертикальной и продольной осей. На одной лопасти наложено ограничение перемещения узлов нижней дальней кромки по вертикальной оси. На конце другой лопасти приложена распределенная по узлам нагрузка с суммарным значением 99,47 Н вдоль вертикальной оси (рис. 3).

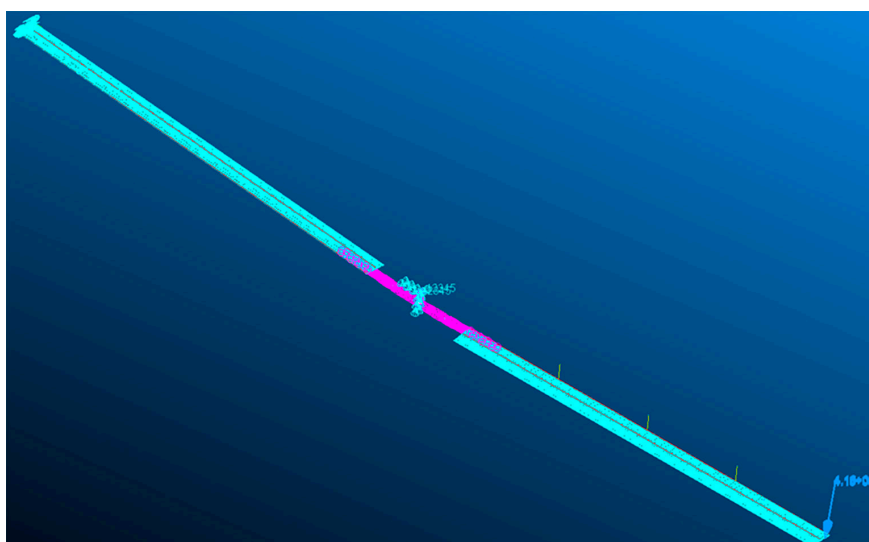


Рис. 3. Конечно-элементная модель, граничные условия и схема нагружения конечно-элементной модели

Таблица 2

Расчетные величины прогибов и линейных деформаций несущего винта специализированного стенда

Значения	Прилагаемая нагрузка	Прогиб лопасти	Линейные деформации в точке № 1	Линейные деформации в точке № 2	Линейные деформации в точке № 3
Экспериментальные	99,47, Н	645, мм	-0,000586	-0,000371	-0,000169
Расчетные	99,47, Н	837, мм	-0,000571	-0,000382	-0,000189
Погрешность	0%	22,9%	2,6%	2,9%	10,6%

При проведении статического анализа значения деформации конструкции определялись в точке размещения тензодатчика № 1 (на расстоянии 2789 мм от дальнего конца и 157 мм от задней части лопасти). Для получения значений, совпадающих со значениями из эксперимента, необходимо менять значение модуля упругости материала. В результате изменения этих свойств были получены требуемые значения деформации, данные приведены в табл. 2.

Значения перемещения дальнего конца лопасти регулируются значениями упругости несущих болтов и значением модуля упругости материала. Поскольку свойства материала были заданы ранее при измерении деформации, для получения значений перемещений, совпадающих со значениями из эксперимента, необходимо менять значения упругости несущих болтов (то есть bush-элементов).

В процессе валидации конечно-элементной модели было обнаружено, что в зависимости от вариации параметров материалов, модель показывает высокую сходимость с экспериментом либо по величинам деформации, либо по значению прогиба кончика лопасти. Это связано с тем, что при высоких значениях прогиба концевой хорды лопасти конструкция становится геометрически нелинейной. Так как собственные колебания – это малые колебания вокруг положения статического равновесия,

рационально [9, с. 44] проводить валидацию по значениям экспериментально измеренных деформаций конструкции.

Расчет погрешности конечно-элементной модели выполнен по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_e - x_p)}{x_e},$$

где \bar{x} – значение среднего отклонения, x_e – экспериментально измеренная линейная деформация, x_p – расчетная линейная деформация, n – количество валидируемых точек. По результатам расчетов \bar{x} составляет 5,4%.

По результатам выполнения задачи была получена валидированная модель несущего винта. Данная модель будет использована для расчетных исследований параметров роторной динамики и динамических аэроупругих характеристик авроторирующего несущего винта.

На рис. 4 представлено деформированное состояние конечно-элементной модели.

Результаты расчета собственных колебаний несущего винта

Результаты расчетов собственных колебаний несущего винта на горизонтальном шарнире приведены в табл. 3.

Для примера на рис. 5 приведена пятая форма собственных колебаний несущего винта.

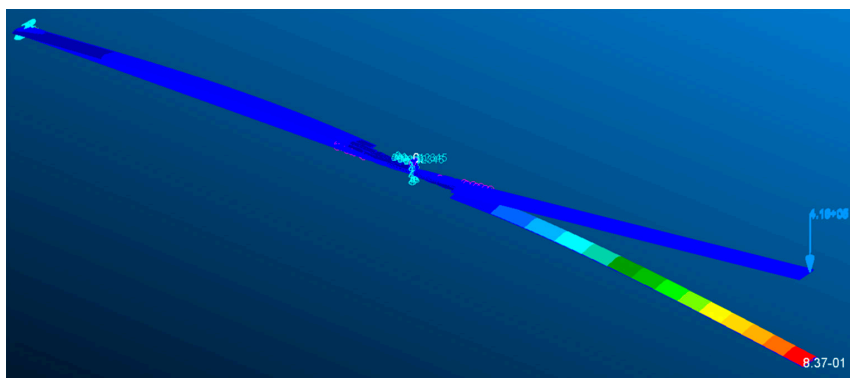


Рис. 4. Результаты статического анализа конечно-элементной модели

Таблица 3

Результаты модального анализа несущего винта на горизонтальном шарнире

№	Форма колебания	Частота, Гц	Частота, об/мин
1	Колебания несущего винта как твердого целого на горизонтальном шарнире	0	0
2	Первая вертикальная симметричная	1,43	85,8
3	Первая вертикальная антисимметричная	2,75	165
4	Первая горизонтальная симметричная	3,14	188,4
5	Вторая вертикальная антисимметричная	5,52	331,2
6	Вторая вертикальная симметричная	8,69	521,4
7	Третья вертикальная антисимметричная	17,5	1050

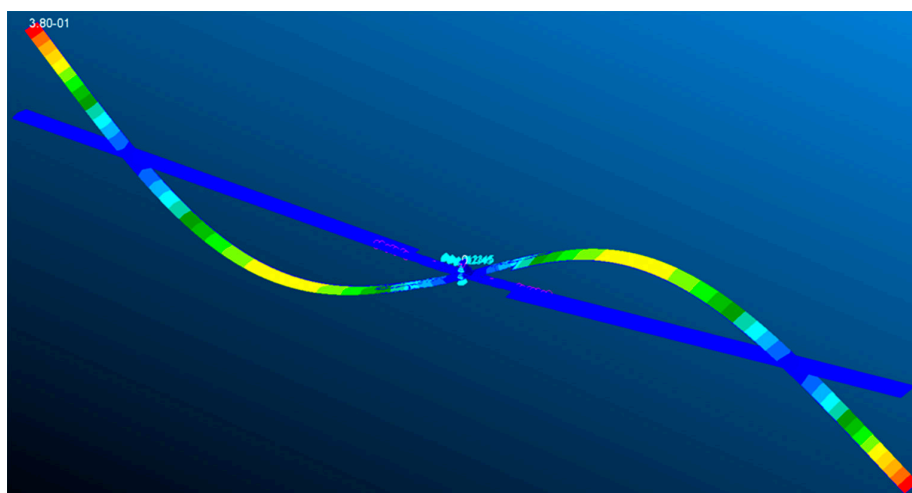


Рис. 5. Пятая форма колебаний несущего винта

Выводы

1. Разработана конечно-элементная модель двухлопастного авторотирующего несущего винта. Модель провалидирована по результатам жесткостных испытаний. Получена сходимость 94,6% по величинам экспериментальных и расчетных значений деформации конструкции.

2. Проведен расчет собственных частот и форм колебаний двухлопастного авторотирующего несущего винта. Показано, что система предраскрутки несущего винта должна обеспечивать частоту вращения НВ не менее 165 об/мин.

3. Разработанная конечно-элементная модель будет использована для расчетных исследований параметров роторной динамики и динамических аэроупругих характеристик авторотирующего несущего винта.

Список литературы

1. Миль М.Л., Некрасов А.В., Браверман А.С., Гродко Л.Н., Лейканд М.А. Вертолеты. Расчет и проектирование. М.: Машиностроение, 1967. Кн. 2. 424 с.

2. Моисеев В.С., Моисеева Л.Т. Методы предварительного проектирования беспилотных вертолетов. Казань: РИЦ «Школа», 2022. 211 с.

3. Аринчев С.В. Теория колебаний неконсервативных систем: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 459 с.

4. Дудковски Д., Джафари С., Капитаняк Т. Скрытые факторы в динамических системах // Доклады по физике. 2016. Т. 637. С. 1–50.

5. Киселев И.А., Мензульский С.Ю., Елисеев П.С., Цветков О.И. Расчетно-экспериментальные исследования прочностных характеристик авторотирующего несущего винта мотовездехода // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 25. С. 60–66.

6. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: учебник для вузов. М.: URSS: Ленанд, 2017. 405 с.

7. Харитонов С.А., Ципилев А.А. Динамика механических систем: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 198 с.

8. Боговяленский А.А. Анализ процедур обеспечения достоверности средств и методов измерения вибрации в процессах поддержания летной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. № 1. С. 78–87.

9. Chechurin S., Chechurin L. Physical Fundamentals of Oscillation Theory: Frequency Analysis of Periodic Motion Stability. Springer International Publishing, 2018. 220 p.

УДК 004.896

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОТРАСЛИ

Степаненко Д.Ю.

*ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
Иркутск, e-mail: stepanenko19733@gmail.com*

Цель исследования заключается в рассмотрении вопросов, связанных с применением искусственного интеллекта, который представляет собой одно из новейших изобретений, активно внедряемое во многие сферы общественной жизни. Особую актуальность представляет собой внедрение искусственного интеллекта в железнодорожную отрасль с целью минимизации аварий поездов; корректировок данных, связанных с загруженностью вагонов, работой сотрудников, эффективностью перевозок пассажиров и грузов. Автор приходит к выводу, что применение искусственного интеллекта может существенно сократить время, которое затрачивается сотрудниками железнодорожной отрасли при построении маршрута поезда, составлении расписания, повышении безопасности на железнодорожном транспорте и т.д. Процесс внедрения искусственного интеллекта в железнодорожную отрасль требует комплексного подхода со стороны не только ИТ-специалистов и инженеров, но также сотрудников указанной отрасли. Интеграция искусственного интеллекта в железнодорожную отрасль должна осуществляться постепенно с применением методов обучения работников навыкам использования искусственного интеллекта на железнодорожном транспорте. Искусственный интеллект в железнодорожной отрасли в любом случае должен контролироваться человеком во избежание трагедий и непредвиденных ситуаций. В статье указывается, что уже к настоящему времени ОАО «Российские железные дороги» применяет некоторые технологии искусственного интеллекта, которые становятся частью железнодорожной отрасли. Подводя итоги, автор указывает, что в железнодорожной отрасли при применении искусственного интеллекта необходимо совершенствоваться и активно использовать такие разработки, как компьютерное зрение, обработка языка, технологии генеративного и эмоционального искусственного интеллекта.

Ключевые слова: искусственный интеллект, железнодорожная отрасль, технологии, компьютерное зрение, предиктивная аналитика, автоматизация, нейросеть, техника

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE RAILWAY INDUSTRY

Stepanenko D. Yu.

Irkutsk State Technical University, Irkutsk, e-mail: stepanenko19733@gmail.com

The purpose of the study is to consider issues related to the use of artificial intelligence, which is one of the latest inventions, actively implemented in many areas of public life. Of particular relevance is the implementation of artificial intelligence in the railway industry in order to minimize train accidents; adjustments to data related to the workload of cars, the work of employees, the efficiency of passenger and cargo transportation. The author concludes that the use of artificial intelligence can significantly reduce the time spent by railway employees on building a train route, drawing up a schedule, improving safety in rail transport, and so on. The process of introducing artificial intelligence in the railway industry requires an integrated approach from not only IT specialists and engineers, but also employees of this industry. The integration of artificial intelligence into the railway industry should be carried out gradually using methods of training employees in the skills of using artificial intelligence in railway transport. Artificial intelligence in the railway industry should in any case be controlled by a person in order to avoid tragedies and unforeseen situations. The article states that Russian Railways Open Joint Stock Company is already using some artificial intelligence technologies, which are becoming part of the railway industry. Summing up, the author points out that in the railway industry, when using artificial intelligence, it is necessary to improve and actively use such developments as: computer vision, language processing, generative and emotional artificial intelligence technologies.

Keywords: artificial intelligence, railway industry, technology, computer vision, predictive analytics, automation, neural network, technology

Введение

Искусственный интеллект прочно входит во многие сферы общественной жизни, становясь неотъемлемой частью того или иного процесса. Более того, в последнее время исследователями уделяется огромное внимание разработкам, которые связаны с искусственным интеллектом, что говорит об актуальности данной темы. Однако наименее исследованным остается вопрос, касающийся внедрения искусственного интеллекта в же-

лестнодорожную отрасль, в связи с чем требуется провести анализ перспектив и проблем внедрения искусственного интеллекта в железнодорожную деятельность.

Актуальность выбранной автором темы также состоит в том, что железнодорожная отрасль позволяет осуществлять перевозку пассажиров и грузов, следовательно, возникает необходимость обеспечения высокого уровня безопасности, с чем может помочь искусственный интеллект.

Таблица 1

Количество ИИ-стартапов в разных странах за 2023 г.

Страна	Россия	США	Индия	Велико-британия	Германия	Канада	Франция	Южная Корея	Китай	Япония
Кол-во ИИ-стартапов, ед.	261	3569	756	712	431	371	193	187	175	173

Таблица 2

Количество научных публикаций об искусственном интеллекте в странах за 2022 г.

Страна	Россия	США	Индия	Велико-британия	Германия	Канада	Франция	Южная Корея	Китай	Япония
Кол-во публикаций в области ИИ, ед.	1962	13765	7263	23089	5132	4241	2593	2977	2619	4064

Теоретические и практические разработки в данной области могут оказать содействие при совершенствовании искусственного интеллекта в сфере оперативного выявления и обнаружения опасных ситуаций в железнодорожной отрасли.

Актуальность исследования также обусловлена статистикой. На сегодняшний день искусственный интеллект активно применяется во многих сферах, например в банковской, в машиностроительной, в компьютерной [1, с. 67]. Статистика, приведенная Национальным центром развития искусственного интеллекта при Правительстве Российской Федерации, показывает, что за 2023 г. количество ИИ-стартапов в России составило 261, что превосходит такие зарубежные страны, как Франция, Китай, Япония (табл. 1).

Более того, в представленном статистическом отчете указано, что за последнее время существенным образом увеличилось количество научных публикаций, которые посвящены технологиям искусственного интеллекта. Так, за 2022 г. число таких публикаций составило почти 2000 (табл. 2). В 2023–2024 гг. ученые также обращали пристальное внимание на разработки в сфере искусственного интеллекта, поэтому с уверенностью можно сказать, что рассматриваемая в данной статье тема представляет огромный научный интерес.

Постепенно искусственный интеллект начинает внедряться в железнодорожную отрасль, открывая большие перспективы совершенствования данной отрасли и повышения уровня безопасности на железнодорожном транспорте. Официальная статистика ОАО «Российские железные дороги» показывает, что применение искусственно-

го интеллекта в работе холдинга на 40% сократило временные затраты сотрудников, например, на просмотр многочасовых видеозаписей с помощью компьютерного зрения и обработки голоса.

Проанализировав статистические показатели, можно прийти к выводу, что искусственный интеллект открывает широкие возможности для железнодорожной отрасли, позволяя упрощать многие процессы и сокращать временные затраты работников. Искусственный интеллект – это одна из важнейших технологий, которая, как уже отмечалось, является компьютерной программой, направленной на имитирование деятельности человеческого мозга [2, с. 87].

Цель исследования заключается в описании разработок в области искусственного интеллекта, которые могут быть применены или уже применяются в железнодорожной деятельности. Кроме того, в рамках данного исследования необходимо предложить собственные варианты развития искусственного интеллекта в железнодорожной деятельности.

Материалы и методы исследования

Поскольку искусственный интеллект – это особая компьютерная программа, имитирующая деятельность человеческого мозга, то при исследовании требуется применять специальные методы. При написании научной статьи был применен дедуктивный метод, который широко используется при написании компьютерных программ, созданных посредством языков программирования. Искусственный интеллект также создан посредством языка программирования, поэтому при исследовании был применен

дедуктивный метод. Также использовался индуктивный метод, так как искусственный интеллект – это так же программа, которая позволяет получать данные, выявлять закономерности и алгоритмы действий.

Не менее значим в данном случае описательный метод. Статистика показывает, что за последние несколько лет внимание к искусственному интеллекту существенным образом увеличилось, поэтому при исследовании была проанализирована статистическая отчетность, позволившая прийти к выводу, что искусственный интеллект на современном этапе занимает важнейшее место.

Также был применен кибернетический метод, потому что искусственный интеллект – это машина, запрограммированная с помощью специальных данных и алгоритмов, которые позволяют имитировать человеческий мозг. Кибернетический метод позволяет в рамках исследования обратиться к особенностям создания компьютерных программ и специальному понятийному аппарату. Данный метод широко используется с целью автоматизированной обработки, хранения и передачи информации.

Для написания статьи были использованы научные труды, научные статьи авторов в области железнодорожной отрасли и искусственного интеллекта. В целом было проанализировано семь источников, указанных в списке литературы. Базой для написания работы также послужили статистические данные о применении искусственного интеллекта.

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время некоторые разработки в области искусственного интеллекта были взяты на вооружение ОАО «Российские железные дороги», особая роль в данном процессе отводится Отраслевому центру разработки и внедрения информационных систем (далее по тексту – ОЦРВ). ОЦРВ проводит активные разработки, основанные на системе искусственного интеллекта с целью повышения безопасности железнодорожной отрасли при перевозке пассажиров и грузов.

Перспективным направлением развития искусственного интеллекта в железнодорожной отрасли является использование компьютерного зрения, которое еще находится на стадии разработки. Компьютерное зрение основывается на сверхточных нейросетях YOLO и программной библиотеки CatBoost [3, с. 34]. Пока данная технология применяется в железнодорожной отрасли при нормировании труда сотрудников. Так, по данным инженеры ОАО «Российские железные дороги» тратят около 40% рабочего

времени на просмотр многочасовых видеозаписей выполняемых работ [4, с. 21]. Им нужно выделить начало и конец каждой трудовой операции и определить время работы с различными инструментами. Сейчас данная обязанность возлагается на искусственный интеллект с применением компьютерного зрения, что позволяет существенным образом сократить временные затраты рабочего персонала и более эффективно выполнять работу.

Приоритетным направлением развития искусственного интеллекта должно стать применение компьютерного зрения при обнаружении недостатков и поломок в железнодорожной отрасли. Искусственный интеллект необходимо наделять специальным алгоритмом, основанным на принципе обучения. Так, требуется научить искусственный интеллект воспринимать поезд, вагоны и рельсы как единый механизм, работающий в нормальном режиме. Далее следует усовершенствовать механизм, обучив искусственный интеллект с помощью компьютерного зрения заблаговременно находить неисправности и повреждения поездов, рельс и вагонов, а также других частей. В дальнейшем искусственный интеллект должен собирать полученные данные обо всех неисправностях, что позволит практически в 90% случаях выявлять опасные ситуации и устранять их [5, с. 78].

В данном случае необходимо применять методы для обнаружения и диагностики неисправностей, основанные на аналитической физической модели и системных наблюдениях (рис. 1). Однако главная проблема в данном случае состоит в том, как установить порог, определяющий неисправность или поломку. Если разработчиком будут установлены низкие пороги, то система искусственного интеллекта зачастую будет давать ложные оповещения, что создаст существенную проблему огромные затраты и потерю временных ресурсов работников железнодорожной отрасли. С другой же стороны, установление высокого порога в большинстве случаев не позволит выявить неисправность и своевременно ее устранить, что может привести в полной остановке железнодорожного транспорта.

При разработке искусственного интеллекта с целью выявления неисправностей и поломок в железнодорожной отрасли необходимо учитывать множество факторов, среди которых: необходимость формирования качественных данных, специфика той или иной неисправности, способы ее решения. Эти факторы должны быть положены в основу компьютерного зрения, базирующегося на искусственном интеллекте.

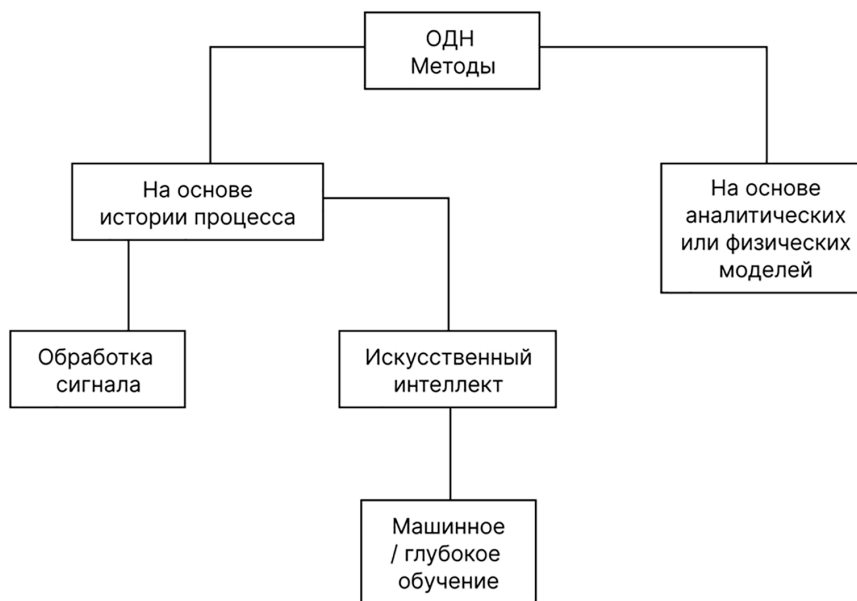


Рис. 1. Методы для обнаружения и диагностики неисправностей

При обучении искусственного интеллекта может быть взята за основу искусственная нейронная сеть (далее по тексту – ИНС), которая представляет собой мощный инструмент, обучающийся с помощью двух основных типов: обучение с учителем и обучение без учителя. Первый контролируется человеком, а второй тип основан на том, что нейронные связи применяются для диагностики множественных неисправностей аналоговых схем с использованием вероятностного механизма. Затем образцы неисправностей квантуются и стандартно ортогонализуются для подачи в квантовую нейронную сеть. Принцип работы ИНС можно рассмотреть на рис. 2.

При обучении искусственного интеллекта с применением ИНС можно моделировать

нормальные ситуации и ситуации с неисправностями локомотива, вагона или рельс, что поможет настроить сеть и обучить искусственный интеллект. Одна из проблем в данном случае состоит в том, что ИНС предполагает большие вычислительные затраты, поэтому скорость обучения будет являться длительной, поскольку в систему необходимо заложить различные алгоритмы выявления неисправностей в железнодорожной отрасли.

Преимуществом перед ИНС обладает нечеткая нейронная сеть (далее по тексту – ННС). Она уже включена в некоторые отрасли с целью определения неисправностей. Как правило, ННС основана на двух типах моделей: моделях Тагаки Сугено Канга (ТСК) и Мамдани, в сочетании с алгоритмами нейронного обучения [6, с. 43].

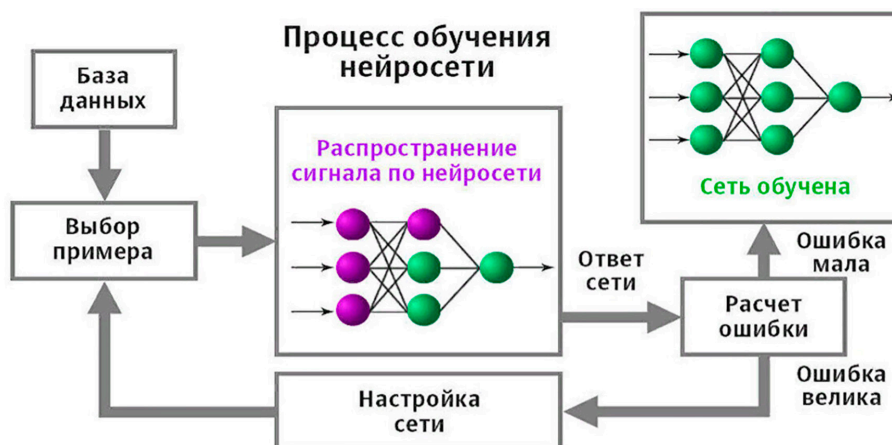


Рис. 2. Процесс обучения ИНС

Основное преимущество ННС состоит в том, что она может уделять внимание неисправностям внутри железнодорожного транспорта, например, выявлять поломки двигателя локомотива. Кроме того, ННС может применяться не только для обнаружения неисправностей, но и поиска их причин.

Дефекты рельс в настоящее время проверяются вручную работниками железнодорожной отрасли с помощью специальных приборов, однако в перспективе также возможно применение искусственного интеллекта, который мог бы выявлять подозрительные участки рельс и сигнализировать об этом. Конечно, при обнаружении поломок и неисправностей искусственным интеллектом важная роль должна отводиться человеку, который также должен анализировать полученные данные и принимать соответствующие решения.

Помимо компьютерного зрения в ОАО «Российские железные дороги» активно применяются и другие технологии искусственного интеллекта. Например, исследователь А.Е. Акимов указывает: «В начале 2023 г. технологии машинного обучения и системы искусственного интеллекта были внедрены и холдингом “Российские железные дороги”. Новая система призвана автоматически генерировать оптимальный график движения поездов, а фундаментом ее интеллектуальной платформы является автоматизированный комплекс “Эльбрус-М”. Цифровые модели производят оценку параметров продвижения поездопотоков, выявляют участки железнодорожной сети с максимальной загрузкой и на основе анализа влияния инфраструктурных и технологических изменений на перемещение составов формируют оптимальный график движения железнодорожного транспорта» [7, с. 90].

Заключение

В железнодорожной отрасли уже начинают применяться некоторые разработки в области искусственного интеллекта, однако необходимо дальнейшее совершенствование таких разработок и создание новых технологий. Железнодорожная отрасль представляет собой одну из крупнейших отраслей государства, поэтому одним из главных направлений должна являться оптимизация качества и безопасности на железных дорогах. Данное направление может быть реализовано в большей степени с помощью новейших технологий, в том числе искусственного интеллекта. В рамках данной научной статьи было установлено, что сейчас

в железнодорожной отрасли применяется компьютерное зрение, которое доказало свою эффективность при нормировании труда работников. Однако данную технологию необходимо совершенствовать в части повсеместного применения искусственного интеллекта с целью обнаружения неисправностей, поломок и их причин на железнодорожном транспорте.

Были проанализированы методы, на которых может базироваться искусственный интеллект при выявлении неисправностей и поломок. Преимуществом обладают ННС, которые доказали свою эффективность в других отраслях при обнаружении недостатков. На данный момент компьютерное зрение на базе искусственного интеллекта с целью выявления неисправностей находится на стадии разработки ОАО «Российские железные дороги», поэтому при применении данной технологии будут выявляться ее недостатки, которые в последующем позволят создать совмещенную систему на основе искусственного интеллекта.

Таким образом, искусственный интеллект может сделать прорыв в железнодорожной отрасли, повысив безопасность железнодорожного транспорта и качество предоставляемых холдингом услуг. По нашему мнению, технологии искусственного интеллекта в дальнейшем могут быть применены с целью автономного (беспилотного) транспорта, в области виртуальных помощников пассажиров и грузоотправителей/грузополучателей.

Список литературы

1. Бочегов М.А., Медникова О.В. Искусственный интеллект на железной дороге // Проблемы науки. 2024. № 4 (85). С. 7–12.
2. Помозова Ю.А., Мاستилин А.Е. Искусственный интеллект в высокоскоростных железных дорогах // Научные междисциплинарные исследования. 2021. № 2. URL: https://pure.spbu.ru/ws/portalfiles/portal/85314544/_129_.pdf (дата обращения: 04.07.2024).
3. Гатауллин А.Р. Искусственный интеллект в государственном управлении // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 3–2 (90). С. 22–28.
4. Файзуллаева И.Г. «Искусственный интеллект» и достижения и проблемы человечества. // ORIENSS. 2024. № 5. URL: <https://www.oriens.uz/journal/article/iskusstvennyy-intellekt-i-dostizheniya-i-problemi-chelovechestva/> (дата обращения: 04.07.2024).
5. Никонова Я.И., Проскурякова Е.А. Цифровизация железнодорожных вокзальных комплексов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. № 3. С. 55–67.
6. Стихаенко Р.М., Гаев Л.В. Искусственный интеллект в робототехнике // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 5–4. С. 68–71.
7. Акимов А.Е. Большие данные, искусственный интеллект и облачные технологии: цифровизация железных дорог // Инновации и инвестиции. 2023. № 3. С. 314–318.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ИНТЕГРАЦИИ ОБЩЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ

Шишков Е.М.

*ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара,
e-mail: e.m.shishkov@yandex.ru*

Цель исследования – разработка методологии интеграции общей информационной модели в системы учета электрической энергии и мощности в энергетических системах. Проведен детальный анализ существующих стандартов информационного моделирования в энергетике. Разработана методология интеграции общей информационной модели, включающая выявление необходимых параметров учета, модификацию стандартной общей информационной модели для соответствия специфическим требованиям и создание механизмов обмена данными между существующими системами и общей информационной моделью. Проведена компьютерная симуляция предложенной методологии, показавшая улучшение точности учета и эффективности управления энергопотреблением. Выявлены риски и вызовы внедрения общей информационной модели, включая технические сложности, проблемы стандартизации, организационные барьеры и вопросы информационной безопасности. Предложены подходы к преодолению этих рисков, такие как адаптация международных стандартов к национальной специфике, проведение пилотных проектов и инвестиции в обучение персонала. Внедрение разработанной методологии способствует оптимизации процессов учета и управления энергопотреблением, повышает эффективность работы энергетических систем. Для успешного внедрения необходимо решение технических, организационных и технологических задач.

Ключевые слова: общая информационная модель, учет электрической энергии, энергетические системы, информационное моделирование, стандартизация

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR INTEGRATING THE COMMON INFORMATION MODEL INTO ELECTRIC ENERGY AND POWER METERING SYSTEMS

Shishkov E.M.

Samara State Technical University, Samara, e-mail: e.m.shishkov@yandex.ru

The purpose of the work: to develop a methodology for integrating the common information model into electric energy and power metering systems in energy networks. A detailed analysis of existing standards of information modeling in energy was conducted. A methodology for integrating the common information model was developed, which includes identifying necessary metering parameters, modifying the standard common information model to meet specific requirements, and creating mechanisms for data exchange between existing systems and the common information model. A computer simulation of the proposed methodology was carried out, showing improvements in metering accuracy and efficiency of energy consumption management. Risks and challenges of implementing the common information model were identified, including technical complexities, standardization issues, organizational barriers, and cybersecurity concerns. Approaches to overcoming these risks were proposed, such as adapting international standards to national specifics, conducting pilot projects, and investing in personnel training. The implementation of the developed methodology contributes to optimizing metering processes and energy consumption management, increasing the efficiency of energy systems. Successful implementation requires solving technical, organizational, and technological tasks.

Keywords: common information model, electric energy metering, energy systems, information modeling, standardization

Введение

Современные энергетические системы претерпевают значительные изменения, обусловленные ростом потребления энергии, интеграцией возобновляемых источников энергии и развитием интеллектуальных сетей (Smart Grids). Эти факторы приводят к усложнению структуры энергосистем и увеличению количества взаимодействующих компонентов, что предъявляет повышенные требования к точности и оперативности учета электрической энергии и мощности [1]. В условиях глобализации и цифровой трансформации энергетики

особое значение приобретает эффективное управление энергопотреблением и обеспечение надежности энергоснабжения.

Традиционные методы учета электрической энергии, основанные на разрозненных системах и несовместимых форматах данных, не всегда обеспечивают необходимый уровень эффективности и прозрачности [2]. Это связано с тем, что разные участники энергетического рынка используют собственные системы и стандарты для сбора и обработки данных, что затрудняет интеграцию информации и приводит к возникновению ошибок и неточностей. В результате возникают сложности в управлении

энергопотреблением, планировании развития сети и обеспечении баланса между производством и потреблением энергии.

Важность стандартизации и унификации данных в энергетике подчеркивается в работах по цифровой трансформации электроэнергетики [3]. И.А. Головинский отмечает, что отсутствие общих стандартов и согласованной терминологии приводит к фрагментации информационного пространства и препятствует эффективному обмену данными между участниками рынка [3]. Это создает необходимость разработки единых информационных моделей и стандартов, которые обеспечат совместимость различных систем и приложений.

Common Information Model (CIM) представляет собой стандартизованный способ описания компонентов энергетической системы и их взаимодействий, что способствует унификации данных и улучшению процессов обмена информацией [4]. CIM-модель разрабатывается в рамках международных стандартов МЭК 61970 и МЭК 61968 и предоставляет общую терминологию и структуру данных для энергетических систем [5]. Использование CIM-модели позволяет создавать единое информационное пространство, облегчая интеграцию различных систем и повышая прозрачность и управляемость энергетических процессов [6].

Гармонизация CIM-модели с другими международными стандартами, такими как МЭК 61850 и SCL (Substation Configuration Language), расширяет возможности интеграции и обеспечивает совместимость на разных уровнях энергетической системы [4, 6]. Внедрение CIM-модели способствует улучшению взаимодействия между системами управления, автоматизации и учета, что особенно важно в контексте развития интеллектуальных энергосистем [7].

Однако внедрение CIM-модели сопряжено с рядом проблем и вызовов. П. Черкасский и С. Попов выделяют риски, связанные с техническими сложностями, необходимостью обновления оборудования и программного обеспечения, а также с вопросами информационной безопасности [5]. Кроме того, существуют организационные барьеры, связанные с сопротивлением изменениям со стороны персонала и необходимостью обучения новым методам работы [8].

Важным аспектом является адаптация CIM-модели к национальным стандартам и требованиям. И.А. Головинский указывает на проблемы несоответствия между международными и национальными стандартами, что может препятствовать эффективному внедрению CIM-модели в конкретной стране [3]. Для преодоления этих

препятствий необходимо проводить работу по гармонизации стандартов и разработке национальных нормативных документов, учитывающих специфику национальной энергетической системы.

Дополнительную сложность представляет интеграция CIM-модели с существующими системами учета и управления. Н.В. Максимов, В.И. Широков и А.Ю. Шаманин предлагают подход к разработке онтологий на основе стандартов ISO 15926 и IEC 61970 для унификации данных и обеспечения семантической совместимости [9]. Это позволяет создать более гибкую и адаптивную информационную систему, способную интегрировать разнородные данные и приложения.

В условиях развития интеллектуальных энергосистем особое значение приобретает архитектурная модель интеллектуальной энергетической системы (Smart Grid Architecture Model, SGAM) [6, 10]. А.В. Иванов, В.С. Чайкин и Е.Н. Соснина рассматривают SGAM как инструмент системной инженерии, позволяющий визуализировать и анализировать взаимодействие между различными компонентами энергетической системы [6]. Использование SGAM в сочетании с CIM-моделью способствует более эффективному планированию и управлению энергетическими процессами.

Таким образом, актуальность исследования применения CIM-модели для организации учета электрической энергии и мощности обусловлена необходимостью повышения эффективности и надежности энергетических систем. Унификация данных и стандартизация процессов учета позволяют снизить риски ошибок, улучшить качество управления энергопотреблением и обеспечить устойчивое развитие энергетики в условиях цифровой трансформации.

Настоящее исследование направлено на разработку методологии интеграции CIM-модели в системы учета электрической энергии, оценку ее влияния на оптимизацию энергетических процессов, а также анализ рисков и вызовов, связанных с ее внедрением.

Цель исследования – разработка методологии применения CIM-модели для организации учета электрической энергии и мощности в энергетических системах и оценка ее влияния на оптимизацию энергетических процессов.

Материалы и методы исследования

Для достижения целей исследования был проведен детальный анализ существующих стандартов и подходов к информаци-

онному моделированию в энергетическом секторе. Особое внимание уделено международным стандартам МЭК 61970 и МЭК 61968, которые тесно связаны с Common Information Model (CIM) и широко используются для описания энергетических систем на различных уровнях [5].

Стандарт МЭК 61970 определяет общую информационную модель для систем управления энергией (Energy Management System, EMS) и описывает обмен информацией между приложениями EMS. Он предоставляет основу для представления модели энергосистемы, включая топологию сети, характеристики оборудования и параметры режимов работы. В рамках МЭК 61970 определяются классы и атрибуты, которые позволяют стандартизировать описание компонентов энергосистемы, таких как генераторы, линии передачи, трансформаторы и другие элементы [5].

Стандарт МЭК 61968 ориентирован на информационный обмен между системами управления распределительными сетями (Distribution Management System, DMS) и другими корпоративными системами, включая биллинговые системы, системы управления активами и клиентские приложения. Он дополняет МЭК 61970, фокусируясь на процессах, специфичных для распределительных сетей, таких как управление отключениями, планирование технического обслуживания и интеграция данных потребителей [5].

В ходе обзора были изучены структуры данных, модели классов и механизмы обмена информацией, предложенные в этих стандартах. Особое внимание уделено тому, как они поддерживают интеграцию данных из различных источников и обеспечивают совместимость между разными системами и приложениями. Анализ показал, что стандарты МЭК 61970 и МЭК 61968 обеспечивают основу для разработки единой информационной модели энергетической системы, способной поддерживать процессы учета и управления энергопотреблением на высоком уровне точности и эффективности.

Изучены работы по гармонизации CIM-модели с другими международными стандартами, такими как МЭК 61850 и SCL (Substation Configuration Language) [3]. МЭК 61850 является стандартом для коммуникационных сетей и систем на подстанциях, определяющим модель данных и коммуникационные протоколы для систем автоматизации подстанций. Он обеспечивает стандартизацию интерфейсов между устройствами подстанций и системами управления, что важно для обеспече-

ния интероперабельности и снижения затрат на интеграцию.

Гармонизация CIM-модели с МЭК 61850 позволяет создать непрерывную информационную цепочку от уровня оборудования на подстанциях до корпоративных систем управления и учета. SCL, являясь частью стандарта МЭК 61850, предоставляет язык для описания конфигурации подстанций и коммуникационных систем. Интеграция CIM и SCL обеспечивает согласованность моделей данных на разных уровнях и облегчает обмен информацией между системами управления, автоматизации и учета [3].

В процессе исследования были рассмотрены подходы к интеграции данных из моделей МЭК 61850 в CIM-модель, включая сопоставление классов и атрибутов, а также разработку механизмов преобразования данных. Это важно для обеспечения совместимости и непрерывности данных при переходе от уровня подстанций к верхнему уровню систем управления энергосистемой.

На основе проведенного анализа разработана методология интеграции CIM-модели в системы учета электрической энергии, включающая следующие ключевые этапы.

1. Выявление необходимых параметров для учета и управления энергопотреблением

На данном этапе проводился сбор и анализ требований к данным, необходимым для точного и эффективного учета электрической энергии и мощности. Это включало определение перечня измеряемых величин и параметров, важных для управления энергопотреблением, таких как:

- Измерение потребляемой и генерируемой мощности для анализа нагрузок и генерации.
- Учет потребляемой и произведенной электроэнергии.
- Мониторинг параметров качества электроэнергии и состояния сети.
- Анализ гармонических искажений, фликкера и других параметров.
- Сбор данных о состоянии выключателей, трансформаторов и других компонентов для управления активами.
- Анализ потребительского поведения и прогнозирование нагрузок.

В процессе выявления параметров учитывались требования нормативно-правовых актов, стандартов, а также потребности различных заинтересованных сторон, включая операторов сетей, поставщиков электроэнергии и потребителей.

2. Модификация стандартной CIM-модели для соответствия специфическим требованиям учета

На основании выявленных параметров предлагается модификация стандартной CIM-модели:

- Разработка новых классов для представления специфических устройств или концепций, не охваченных стандартной моделью, например интеллектуальных счетчиков, устройств накопления энергии, возобновляемых источников энергии.

- Добавление новых атрибутов к существующим классам для хранения дополнительной информации, необходимой для учета и управления.

- Установление отношений между новыми и существующими классами для отражения реальных взаимодействий в энергосистеме.

При модификации модели особое внимание уделялось сохранению совместимости с существующими стандартами и обеспечению возможности дальнейшего расширения модели. Использовались методы объектно-ориентированного моделирования и инструменты для разработки UML-диаграмм.

3. Создание механизмов для обмена данными между существующими системами и CIM-моделью

Для обеспечения обмена данными между существующими системами учета и управления и новой CIM-моделью были разработаны механизмы интеграции, включающие:

- Выбор или разработку коммуникационных протоколов, обеспечивающих эффективную и безопасную передачу данных. Рассматривались протоколы, поддерживающие CIM, такие как IEC 61970-552 CIM XML и IEC 61968-9.

- Разработку программных модулей, преобразующих данные из форматов существующих систем в формат CIM и обратно. Это необходимо для обеспечения совместимости между системами, использующими разные стандарты и форматы данных.

- Использование технологий веб-служб (SOAP, RESTful API) для обеспечения доступа к данным CIM-модели и обмена информацией между приложениями.

- Проведение тестирования разработанных механизмов обмена данными на предмет корректности передачи и преобразования данных, а также производительности и надежности системы.

При внедрении CIM-модели были идентифицированы следующие возможные риски и вызовы.

Технические сложности

- Многие существующие системы и устройства могут не поддерживать новые стандарты и протоколы, требуемые для CIM. Это может потребовать значительных инвестиций в модернизацию инфраструктуры.

- Необходимость обеспечения интеграции с устаревшими системами, использующими проприетарные форматы данных и протоколы, может представлять техническую сложность.

- При увеличении объема данных и количества подключенных устройств необходимо обеспечить, чтобы система оставалась производительной и могла масштабироваться без потери качества обслуживания.

Проблемы стандартизации

- Существующие национальные стандарты могут отличаться от международных, что требует адаптации CIM-модели к специфике национальной энергетической системы [8].

- Различия в терминологии и определениях между разными стандартами и организациями могут затруднять унификацию данных и моделирование.

- Для эффективной адаптации и внедрения CIM-модели необходимо активное участие в национальных и международных органах по стандартизации.

Организационные барьеры

Сотрудники, привыкшие к текущим системам и процессам, могут сопротивляться внедрению новой модели. Для преодоления этого сопротивления требуется организовать обучение и повышение квалификации специалистов, чтобы они могли успешно работать с новыми инструментами и технологиями. Кроме того, внедрение CIM-модели может потребовать пересмотра и оптимизации существующих бизнес-процессов, что зачастую является сложным и затратным мероприятием.

Вопросы информационной безопасности

Расширение сетевых взаимодействий и интеграция различных систем повышают потенциальные риски киберугроз, что требует внедрения дополнительных мер защиты. Необходимо обеспечить соответствие системы законодательным требованиям в области защиты персональных данных и информационной безопасности.

В рамках исследования были предложены меры по минимизации указанных рисков. К ним относятся планирование поэтапного внедрения, проведение пилотных проектов, разработка программ обучения

персонала и активное участие в деятельности по стандартизации.

Результаты исследования и их обсуждение

СІМ-модель обеспечивает единый и стандартизированный способ описания компонентов энергетической системы и их взаимодействий. Это значительно облегчает обмен информацией между разными системами и устройствами, которые ранее могли использовать несовместимые форматы данных и протоколы [4]. В традиционных системах данные часто хранятся в отдельных базах данных со своими собственными структурами и форматами, что осложняет их интеграцию и обмен. Применение СІМ-модели позволяет сформировать общую информационную базу, где каждый элемент системы описывается согласно общепринятым стандартам.

Например, при передаче данных от интеллектуальных счетчиков к системам управления и биллинга использование СІМ-модели обеспечивает согласованность данных, устраняет необходимость в разработке сложных преобразователей и снижает вероятность ошибок при обмене информацией. Это особенно актуально для крупных энергетических компаний, где различные подразделения могут применять разные системы и приложения. Стандартизация данных способствует более эффективному взаимодействию как между подразделениями компании, так и с внешними организациями, включая поставщиков оборудования, регуляторов и потребителей энергии.

Стандартизация данных и процессов учета с помощью СІМ-модели уменьшает вероятность ошибок и несовместимостей, возникающих при использовании различных систем. В традиционных системах несоответствие форматов данных и различия в интерпретации параметров могут приводить к искажению информации и некорректным расчетам. СІМ-модель позволяет точно и однозначно описывать параметры оборудования и процессов, обеспечивая более точный сбор и анализ данных.

Увеличение точности учета непосредственно отражается на финансовых показателях компании, поскольку позволяет корректно рассчитывать объемы потребления и производства электроэнергии, снижать потери и оптимизировать расходы. Помимо этого, точные данные необходимы для соблюдения нормативных требований и предоставления отчетности регуляторным органам.

Доступ к актуальным и точным данным благодаря СІМ-модели существенно улуч-

шает процессы прогнозирования и планирования энергопотребления [4]. Это становится возможным за счет анализа больших объемов данных из различных источников в едином формате. Системы прогнозирования могут использовать исторические данные о потреблении, данные о погодных условиях, информацию о состоянии оборудования и другие факторы для создания более точных моделей.

К примеру, операторы сетей могут эффективнее планировать нагрузки, предотвращать перегрузки и оптимизировать распределение ресурсов. Это особенно актуально при увеличении доли возобновляемых источников энергии, которые характеризуются нестабильностью генерации.

СІМ-модель упрощает интеграцию систем управления и автоматизации, повышая гибкость и адаптивность энергетической системы [6]. Благодаря стандартизации данных становится возможным оперативно внедрять новые технологии и приложения, такие как системы управления спросом, интеллектуальные сети (Smart Grid), интеграция распределенной генерации и накопителей энергии.

Применение СІМ-модели также способствует развитию сервисов для потребителей, например, предоставление им доступа к своим данным о потреблении в режиме реального времени, что стимулирует энергосбережение и повышение энергоэффективности.

В процессе исследования был проведен детальный анализ структур данных существующих систем учета и управления. Установлено, что различные системы используют разнообразные форматы данных, включая собственные проприетарные форматы, XML, CSV, а также различные протоколы передачи данных, такие как Modbus, DNP3, IEC 60870-5-104 и др. Это усложняет интеграцию и обмен данными между системами, особенно если они были разработаны разными поставщиками или в разное время.

К примеру, система управления распределительной сетью может использовать один формат данных, в то время как системы учета на подстанциях и у потребителей – другой. Это вынуждает разрабатывать промежуточные программные решения для преобразования и сопоставления данных, что повышает сложность системы и риск возникновения ошибок.

Для решения этих проблем были разработаны схемы сопоставления данных, позволяющие корректно преобразовывать и передавать данные в формате СІМ. Этот процесс включал:

– *Создание матриц соответствия*, где каждому элементу данных в существующей

системе соответствует определенный класс или атрибут в CIM-модели.

– *Разработку правил преобразования данных*, учитывающих различия в единицах измерения, форматах представления чисел, кодировках и других параметрах.

– *Тестирование и валидацию схем сопоставления* на реальных данных для обеспечения правильности преобразований и выявления возможных ошибок.

В ходе исследования предлагается разработать программные модули, обеспечивающие преобразование данных в формат CIM и обратное преобразование для совместимости с существующими системами. Эти модули реализуют разработанные схемы сопоставления и автоматизируют процесс обмена данными.

Прототипы были разработаны с использованием современных языков программирования и технологий, таких как Java, C#, и платформ для интеграции данных (например, Apache Camel, MuleSoft). Модули были протестированы на совместимость с различными системами и протоколами передачи данных.

При разработке модулей учитывались требования к производительности, масштабируемости и надежности. Были реализованы механизмы обработки ошибок, повторной передачи данных в случае сбоев, а также возможности расширения функциональности модулей для поддержки новых типов данных и протоколов.

Создание таких модулей позволяет постепенно интегрировать CIM-модель без необходимости мгновенной замены всех компонентов системы. Это особенно важно для крупных энергетических компаний с разветвленной инфраструктурой и множеством существующих систем. Постепенный переход снижает риски, связанные с внедрением новой технологии, и позволяет аккумулировать опыт и знания в процессе интеграции.

Необходимость обновления оборудования и программного обеспечения для поддержки CIM-модели является одним из основных технических вызовов. Некоторые устаревшие устройства и системы не поддерживают современные протоколы и стандарты, что требует их замены или модернизации [5]. Это может потребовать значительных финансовых вложений и времени.

Например, интеллектуальные счетчики и устройства автоматизации подстанций могут не поддерживать необходимые коммуникационные интерфейсы или протоколы обмена данными. Для решения этой проблемы может потребоваться установка дополнительных устройств-шлюзов или обновление программного обеспечения оборудования.

Различия в национальных и международных стандартах могут вызывать несовместимости и затруднять внедрение CIM-модели [3]. В некоторых случаях национальные стандарты могут иметь специфические требования или могут использоваться термины и определения, отличные от международных.

Необходима адаптация CIM-модели к специфике российской энергетической системы, включая перевод терминологии, учет национальных нормативных требований и интеграцию с национальными системами классификации и кодирования. Это требует участия экспертов в области стандартизации и может быть длительным процессом.

Необходимость перераспределения обязанностей и изменения бизнес-процессов может вызвать опасения у сотрудников относительно стабильности их рабочих мест и роли в организации. Для преодоления этого вызова важно проводить разъяснительную работу, демонстрировать преимущества новой системы и обеспечивать поддержку со стороны руководства.

Для решения проблем стандартизации предлагается провести адаптацию международных стандартов, включая CIM-модель, с учетом специфики национальной энергетики и законодательной базы [3].

Начало внедрения CIM-модели с пилотных проектов позволяет отработать методологию, выявить и устранить возможные проблемы на ограниченном участке, прежде чем масштабировать решение на всю организацию. Пилотные проекты могут быть реализованы на отдельных подстанциях, в региональных подразделениях или в рамках определенных процессов.

Постепенное расширение внедрения позволяет накапливать опыт, совершенствовать процессы и снижать риски, связанные с возможными техническими и организационными трудностями.

Заключение

В ходе данного исследования была разработана методология интеграции модели Common Information Model (CIM) в системы учета электрической энергии и мощности. Тщательное изучение существующих стандартов информационного моделирования в энергетике, таких как МЭК 61970 и МЭК 61968, а также их согласование с другими стандартами, включая МЭК 61850 и SCL, создало основу для формирования унифицированной информационной модели.

Предложенная методология включает определение необходимых параметров для учета и управления энергопотреблением, адаптацию стандартной CIM-модели

под специфические требования учета и разработку механизмов обмена данными между существующими системами и CIM-моделью. Проведенное компьютерное моделирование этой методологии показало повышение точности учета и эффективности управления энергопотреблением.

В процессе исследования были выявлены риски и сложности при внедрении CIM-модели, включая технические трудности, проблемы стандартизации, организационные барьеры и вопросы информационной безопасности. Были предложены способы преодоления этих препятствий, такие как адаптация международных стандартов к национальным особенностям, проведение пилотных проектов и инвестирование в обучение персонала.

Внедрение разработанной методологии способствует оптимизации процессов учета и управления энергопотреблением, повышает эффективность работы энергетических систем и создает базу для развития интеллектуальных сетей (Smart Grids). Стандартизация и унификация данных облегчают интеграцию различных систем и приложений, способствуя повышению прозрачности и управляемости энергетических процессов.

Для успешного внедрения методологии необходимо продолжить работу над адаптацией стандартов, развитием инструментов интеграции и обучением специалистов. Будущие исследования могут быть направлены на практическое применение методологии в реальных энергетических компаниях, оценку экономической эффективности ее

внедрения и изучение влияния на устойчивость и надежность энергосистем.

Список литературы

1. Обичкин Р.Ю., Данилов А.В., Петухов С.В., Надеин В.Ф. Применение современных технологий и методов в оптимизации систем электроснабжения // Научное обозрение. Технические науки. 2024. № 4. С. 9–13.
2. Ильичев В.Ю., Жукова Ю.М. Исследование режимов работы электрических сетей с использованием программной библиотеки Pandapower // Научное обозрение. Технические науки. 2024. № 1. С. 18–22.
3. Головинский И.А. Об основах национальных стандартов цифровой трансформации в электроэнергетике // Энергоэксперт. 2022. № 1 (81). С. 68–72.
4. Горелик Т.Г., Асанбаев Ю.А., Кириенко О.В. К вопросу гармонизации CIM модели энергосистемы и SCL описания подстанции // Релейная защита и автоматизация. 2011. № 2 (3). С. 54–56.
5. Черкасский П., Попов С. Риски применения электротехнических комплексов на основе CIM-модели (МЭК 61970, МЭК 61968) в сетевом комплексе России // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № S4 (31). С. 36–41.
6. Иванов А.В., Чайкин В.С., Соснина Е.Н. Архитектурная модель интеллектуальной энергетической системы как инструмент системной инженерии // Энергия единой сети. 2022. № 5–6 (66–67). С. 16–25.
7. Ясько Д.В. Внедрение CIM моделей в задачах РЗА // Релейщик. 2023. № 2 (46). С. 27–31.
8. Сизов А.С. Синергия CIM и МЭК 61850. Цели, особенности, перспективы // Релейщик. 2023. № 2 (46). С. 43–47.
9. Максимов Н.В., Широков В.И., Шаманин А.Ю. Подход к разработке онтологии для предметной области электроэнергетики на основании стандартов ISO 15926, IEC 61970 // Автоматизация процессов управления. 2019. № 2 (56). С. 59–66.
10. Информационное моделирование, резонансные процессы в обмотках трансформаторов, интеллектуальные решения для компенсации реактивной мощности, построение единой цифровой сети на базе CIM-моделей и другие актуальные задачи Научно-технического совета «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» // Энергия единой сети. 2023. № 2 (69). С. 64–68.

УДК 004.8

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОИМОСТИ БРИЛЛИАНТОВ

Облакова Т.В., Григорян В.М., Зубарев К.М.

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»,
Москва, e-mail: zubarev.bmstu@mail.ru

Цель исследования – применение регрессионных моделей при прогнозировании стоимости бриллиантов на основе следующих признаков: вес, размер, цвет, чистота, качество огранки и пр. Для построения полиномиальных моделей авторы используют методы регуляризации L1 и L2, применяемые для улучшения обобщающей способности моделей машинного обучения и уменьшения их склонности к переобучению. Метод L1, также известный как лассо-регуляризация, способствует разреженности модели, что помогает в отборе значимых признаков и упрощении интерпретации результатов. В свою очередь, метод L2, или ридж-регуляризация, наказывает большие веса и тем самым способствует сглаживанию модели, что может улучшить ее стабильность и обобщение. Разработанные алгоритмы протестированы на сгенерированном примере, который наглядно иллюстрирует, как методы регуляризации позволяют решить проблему переобучения в случае большого числа признаков. На основе разработанных алгоритмов была построена модель полиномиальной регрессии, позволяющая спрогнозировать цену на бриллианты, качество проверено с помощью коэффициента детерминации, значение которого показывает, насколько хорошо модель соответствует данным. В конце авторы приводят сравнение различных методов построения регрессии, которое показывает преимущество использования методов регуляризации.

Ключевые слова: регуляризация, коэффициент детерминации, машинное обучение, переобучение, линейная модель, полиномиальная регрессия

APPLICATION OF REGULARIZATION IN CONSTRUCTING POLYNOMIAL REGRESSION MODELS USING THE EXAMPLE OF FORECASTING THE PRICE OF DIAMONDS

Oblakova T.V., Grigoryan V.M., Zubarev K.M.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: zubarev.bmstu@mail.ru

The purpose of this work is to apply regression models in predicting the cost of diamonds based on the following features: weight, size, color, clarity, cut quality, etc. To build polynomial models, the authors use L1 and L2 regularization methods, which are used to improve the generalization ability of machine learning models and reduce their tendency to overfitting. The L1 method, also known as lasso regularization, promotes model sparseness, which helps in selecting significant features and simplifying the interpretation of results. In turn, the L2 method, or ridge regularization, penalizes large weights and thereby promotes smoothing of the model, which can improve its stability and generalization. The developed algorithms are tested on a generated example, which clearly illustrates how regularization methods can solve the problem of overfitting in the case of a large number of features. Based on the developed algorithms, a polynomial regression model was built that allows predicting the price of diamonds, the quality was checked using the determination coefficient, the value of which shows how well the model fits the data. At the end, the authors provide a comparison of different methods for constructing regression, which shows the advantage of using regularization methods.

Keywords: regularization, coefficient determination, machine learning, retraining, linear model, polynomial regression

Введение

Линейная регрессия является фундаментальным методом в машинном обучении, широко используемым для предсказания непрерывных результатов [1, 2]. Однако, когда данные большой размерности, линейные регрессионные модели могут стать склонными к переобучению, что приводит к плохой обобщающей способности [3 с. 57]. При прогнозировании цен на бриллианты необходимо учитывать множество независимых друг от друга признаков, таких как вес, цвет, качество огранки, прозрачность и пр. В случае применения модели полиномиальной регрессии количество

признаков вырастает кратно степени полинома и вследствие этого модель начинает излишне хорошо ложиться на тренировочный набор данных, что, естественно, приводит к высокому качеству на обучающих данных [4]. Но при этом страдает ее предсказательная способность на тренировочном наборе, то есть модель начинает подстраиваться под данные вместо того, чтобы искать зависимости, это явление и называется переобучением [3, с. 58].

Для улучшения интерпретируемости модели авторы используют такие методы, как L1 и L2 регуляризация [5], в которых для уменьшения переобучения по сути добавля-

ется штрафной член к функции потерь, который препятствует большому весу, способствуя более простым моделям [6], которые лучше обобщаются на новые данные [4].

Целью исследования является реализация алгоритмов L1 и L2 регуляризации и их применение для построения полиномиальной регрессионной модели, позволяющей спрогнозировать цену на бриллианты, в зависимости от их веса, цвета, качества огранки, прозрачность и прочих признаков.

Материалы и методы исследования

Для построения модели, которая будет предсказывать цену на бриллианты, был

использован набор данных с Kaggle. В качестве признаков выделяются: вес бриллианта в каратах; качество огранки (удовлетворительное, хорошее, очень хорошее, высшее, идеальное); цвет бриллианта, от J (худший) до D (лучший) [7]; чистота – мера чистоты бриллианта (I1 (худшая), SI2, SI1, VS2, VS1, VVS2, VVS1, IF (наилучшая)); x, y, z – размеры бриллианта; глубина; ширина площадки верха алмаза относительно самой широкой точки. Для категориальных признаков, таких как качество огранки, цвет, чистота проведем перекодировку их в числовые. Пример преобразованных данных представлен на рис. 1.

	carat	cut	color	clarity	depth	table	price	x	y	z	log_price	volume
0	0.23	Ideal	E	SI2	61.5	55.0	326	3.95	3.98	2.43	5.786897	38.202030
1	0.21	Premium	E	SI1	59.8	61.0	326	3.89	3.84	2.31	5.786897	34.505856
2	0.23	Good	E	VS1	56.9	65.0	327	4.05	4.07	2.31	5.789960	38.076885
3	0.29	Premium	I	VS2	62.4	58.0	334	4.20	4.23	2.63	5.811141	46.724580
4	0.31	Good	J	SI2	63.3	58.0	335	4.34	4.35	2.75	5.814131	51.917250

Рис. 1. Первые 4 записи в датасете

Для определения стоимости бриллиантов, в зависимости от выбранных признаков была использована модель полиномиальной регрессии [8, 9], где для аппроксимации будем искать многочлен, наилучшим образом описывающий данные. То есть входная переменная одна и находятся оптимальные коэффициенты многочлена степени k, описывающие данные из $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$, обозначим $\bar{x} = (x, x^2, \dots, x^k)$, тогда отклик или моделируемую переменную можно выразить следующим образом:

$$\hat{y}(x) = w_0 + \sum_{i=1}^k w_i \bar{x}_i = (1 \ x \ x^2 \ \dots \ x^k)^T w. \quad (1)$$

В случае регуляризации L1, также называемой Лассо, в уравнение (1) добавляется дополнительное слагаемое, налагающее «штраф» за сложность модели, то есть высокие веса (ограничивая сумму абсолютных значений параметров модели $|w_i|$):

$$L_1 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}(x_i, w))^2 + \alpha \sum_{i=1}^N |w_i|. \quad (2)$$

Такой подход помогает решить задачу отбора признаков, так как в процессе построения модели с использованием L1 регуляризации некоторые весовые значения могут оказаться нулевыми. Это позволяет

исключить признаки, которые слабо влияют на целевую переменную, и тем самым способствует упрощению модели и улучшению обобщающей способности

Для сравнения, в работе будет рассмотрена регуляризация L2, также называемая Ridge регрессией, которая добавляет к целевой функции штрафную функцию

$$L_2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}(x_i, w))^2 + \alpha \|w\|^2. \quad (3)$$

В отличие от регуляризации L1, построение Ridge регрессии не приводит к обнулению ни одного из параметров модели, но также позволяет повысить устойчивость модели.

Результаты исследования и их обсуждение

Реализованные алгоритмы были протестированы на следующем примере: для обучающей выборки были заданы 60 точек (x, y) , распределенных равномерно на промежутке $[-5, 5] \times [-5, 5]$, посчитаем значение функции в этих точках согласно уравнению (4) и добавим к результату шум, имеющий нормальное стандартное распределение.

$$f(x, y) = 0.1x^2 + 0.1y^2 - 4 \cos(x) - 4 \cos(y),$$

$$(x, y) \in [-5, 5] \times [-5, 5], \quad (4)$$

На рис. 2 изображен график поверхности, описанной уравнением (4), и смоделированные значения.

среднеквадратичной ошибки (MSE) для тестового набора данных оказалось равным 1051.755.

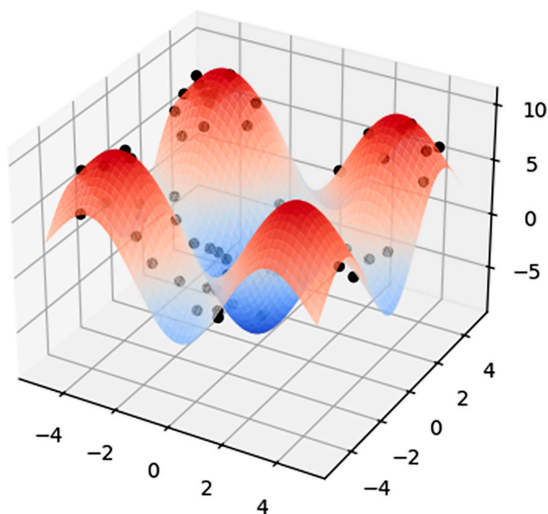


Рис. 2. График функции

$$f(x, y) = 0.1x^2 + 0.1y^2 - 4\cos(x) - 4\cos(y)$$

Для тестовой выборки было сгенерировано 500 значений, и в качестве базовых функций для регрессионной модели были выбрана модель третьей степени из элементов x , y , $\cos(x)$, $\cos(y)$, $\sin(x)$, $\sin(y)$.

В результате получили явно переобученную модель, поверхность проходит очень близко ко всем сгенерированным точкам, что можно видеть на рис. 3, значение

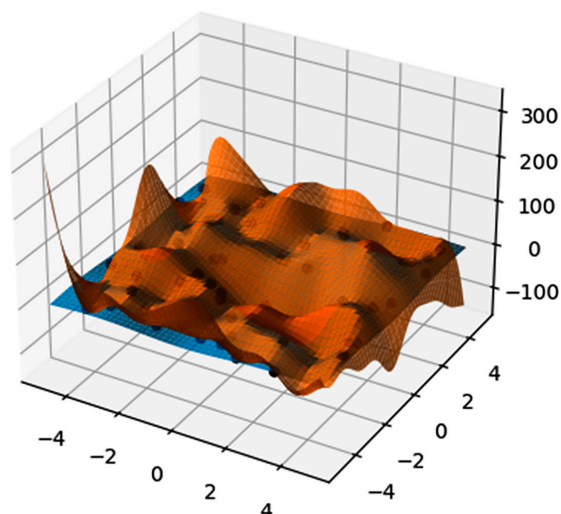


Рис. 3. Результат переобучения

При построении модели с использованием регуляризации L1 наилучшее значение MSE [10] получилось равным 0.661, при коэффициенте регуляризации равным $\alpha = 0.071$.

Также для данного набора данных была построена модель с использованием L2 регуляризации, наилучшее значение среднеквадратической ошибки, равное 1.2, было получено при коэффициенте регуляризации $\alpha = 3.162$.

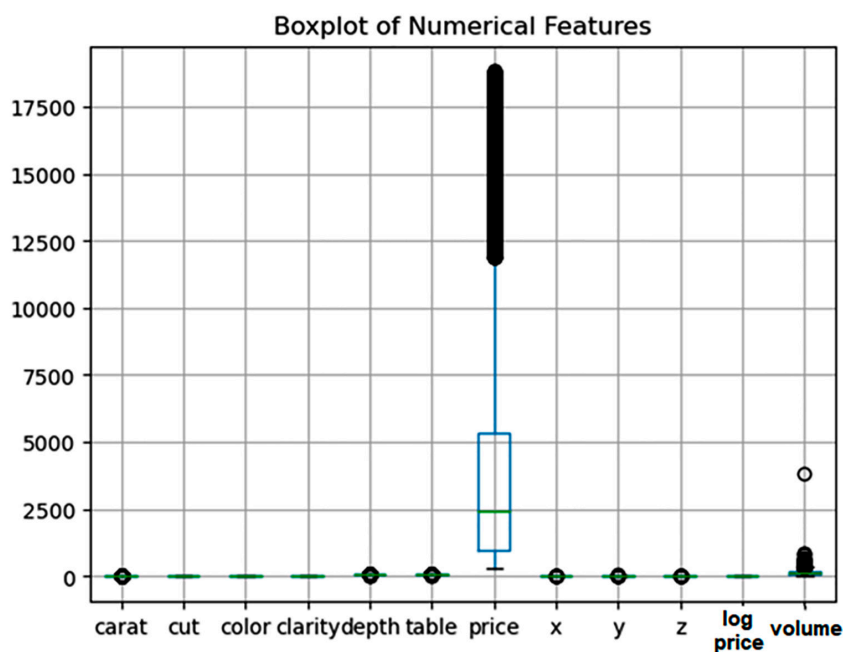


Рис. 4. Проверка на наличие шумов в данных

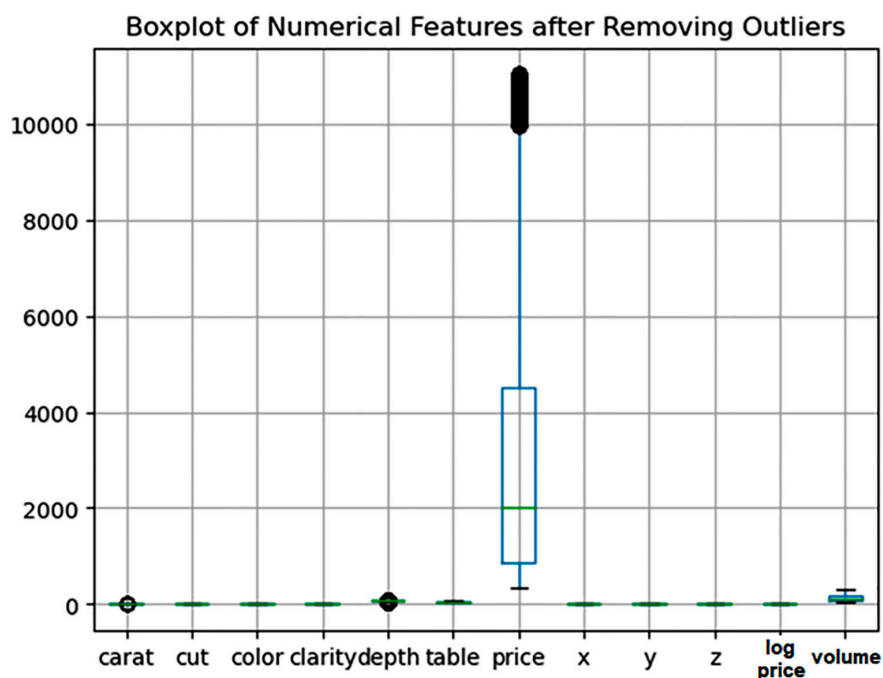


Рис. 5. Данные после очистки от шумов

Mean Squared Error train: 564659.0794387351
 Mean Squared Error test: 554184.568040858
 Mean Absolute Error train: 522.7534634175115
 Mean Absolute Error test: 517.0462566327137
 R^2 train: 0.9167169465262452
 R^2 test: 0.9166134196922929

Рис. 6. Метрики для линейной модели

Можно заключить, что разработанные алгоритмы действительно позволяют строить модели с большим количеством признаков, исключая явление переобучения. Для построения модели, которая будет определять стоимость бриллиантов также была использована модель полиномиальной регрессии с использованием регуляризации, дальше будет показано ее преимущество перед моделью линейной регрессии.

В качестве первоначальной обработки очистим данные от шумов с помощью boxplot.

Как видим на рис. 4, в выборке присутствует достаточно много шумов. В результате очистки данных было удалено 7000 записей, результат представлен на рис. 5.

Для начала рассмотрим модель простейшей линейной регрессии для прогнозирования цены на бриллианты. Исключим из выборки значения `log_price` – логарифм цены, так как очевидно он явным образом зависит от цены. В качестве метрик качества модели были выбраны стандартные MSE – средне-

квадратичная ошибка, MAE – Средняя абсолютная ошибка, а также коэффициент детерминации R^2 [10], который показывает насколько хорошо модель соответствует данным. На рис. 6 представлены значения метрик для тестовой и обучающей выборки при построении линейной модели.

Значения для тестовой и обучающей выборки получились примерно одинаковые, следовательно, переобучения в данном случае не происходит, и применять регуляризацию в данном случае не имеет смысла. Также видим, что MAE и MSE не очень показательны в данном случае, поэтому будем ориентироваться на R^2 , значение которого для линейной модели получилось очень неплохим, попробуем улучшить качество модели за счет использования полиномиальной модели.

Построим на данных полином 7 степени, а потом для него линейную регрессионную модель. Значения метрик качества для обучающей и тестовой выборки отображены на рис. 7 и 8.

Коэффициент регуляризации	Среднеквадратичная ошибка	Средняя абсолютная ошибка	R2 score
0	1.22577785550419e+19	39152768.16268585	-1810725885012.6782
31.623	257928.6739671999	235.06548932775198	0.9618986324200188
74.989	230297.5356980278	231.64625687853393	0.9659803195766041
177.828	208022.39999091107	229.2810283024707	0.9692708150473742
421.697	194116.29648295703	229.28959688676545	0.9713250324137971
1000.0	187314.38759476	233.38251968957684	0.9723298141885744

Рис. 7. Метрики для обучающей выборки

Mean Squared Error train: 23134.512353332666
 Mean Absolute Error train: 93.68023637196356
 R² train: 0.9965608129300068

Рис. 8. Метрики для тестовой выборки

Mean Squared Error test: 1.22577785550419e+19
 Mean Absolute Error test: 39152768.16268585
 R² test: -1810725885012.6782

Рис. 9. Метрики при различных коэффициентах регуляризации Лассо

Коэффициент регуляризации	Среднеквадратичная ошибка	Средняя абсолютная ошибка	R2 score
0	1.22577785550419e+19	39152768.16268585	-1810725885012.6782
0.1	154574.00081704164	225.56334942578096	0.9771662423845618
0.316	152990.0943252507	224.60221893677502	0.9774002179349642
1.0	150957.432089295	226.03546431627333	0.9777004839341914
3.162	150779.99027274727	229.8815657411848	0.9777266957383013
10.0	158012.70868868745	238.9770372859401	0.9766582745397986

Рис. 10. Метрики при различных коэффициентах гребневой регуляризации

В данном случае получили явное переобучение, почти идеальное совпадение результата для обучающей выборки и огромная погрешность на тестовых данных. Попробуем регуляризовать полученную модель.

Применим сначала регуляризацию Лассо с различными коэффициентами, чтобы выявить лучший результат. Возьмем следующие коэффициенты регуляризации: $\alpha = [0.1, 0.316, 1.0, 3.162, 10.0]$. На рис. 9 изображены значения MSE, MAE и коэффициента детерминации в зависимости от значения коэффициента регуляризации

Как видно, модель стала намного лучше работать, пропал эффект переобучения. Наилучший результат получился при $\alpha = 3.162$, $R^2 \approx 0.97773$, что также дает преимущество перед моделью линейной регрессии (тот же вывод можно сделать, опираясь на другие метрики качества)

Применим для тех же данных регуляризацию L2 и сравним качества построенных моделей.

Возьмем следующие коэффициенты: $\alpha = [31.623, 74.989, 177.828, 421.697, 1000.0]$.

Значение метрик качества модели с использованием Ridge регрессии приведено на рис. 10.

Как и в предыдущем случае, можно отметить существенное улучшение качества модели по сравнению с линейной. Максимальное значение метрики $R^2 \approx 0.97773$ при $\alpha = 1000$.

Сравнивая значения ключевых метрик при применении различных методов регуляризации, можно заключить, что серьезного различия в данном случае нет, но применение регуляризации является необходимой мерой при построении полиномиальной модели для прогнозирования цен на бриллианты.

Заключение

Как видно из приведенных исследований, при решении задачи регрессии с большим количеством признаков методы регуляризации L1 и L2, существенно улучшают как точность предсказаний, так и интерпретируемость моделей и оказывают положительное влияние на обобщающую способность. Эти методы играют ключевую роль в предотвращении переобучения, что особенно важно при работе с большими и сложными наборами данных, где модели могут чрезмерно подстраиваться под обучающие данные.

Авторами была получена робастная модель для прогнозирования стоимости бриллиантов в зависимости от веса, прозрачности, качества обработки и других признаков. Перспективные направления дальнейших исследований включают изучение и применение других методов регуляризации, таких как эластичная сеть (Elastic Net), которая комбинирует преимущества L1 и L2 регуляризации, а также более сложных подходов, например, регуляризация в байесовских методах или методов, основанных на априорных знаниях.

Список литературы

1. Зубарев К.М., Безрученко Т.С. Анализ эффективности маркетинговой кампании методами машинного

обучения // Дневник науки. 2024. № 6 (90). URL: https://dnevniknauki.ru/images/publications/2024/6/physics/Zubarev_Bezruchenko.pdf (дата обращения: 18.08.2024).

2. Шершакова А.О., Пархоменко В.П. Методы интеллектуального анализа данных в модели наукастинга опасных явлений // Математическое моделирование и численные методы. 2021. № 3 (31). С. 88–104.

3. Николенко С.И., Кадурин А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. М.: ИД «Питер», 2018. 481 с.

4. Strijov V., Krymova E., Weber G.W. Evidence optimization for consequently generated models // Mathematical and Computer Modelling. 2013. Vol. 57, Is. 1–2. P. 50–56.

5. Борхани Р., Катсагелос А., Уатт Д. Машинное обучение: основы, алгоритмы и практика применения / Пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2022. 640 с.

6. Облакова Т.В., Зубарев К.М., Яковлев Д.Ю. Анализ распределения высоты морских волн. Сравнение оценок и применение критерия согласия Пирсона // Дневник науки. 2023. № 12 (84). URL: https://dnevniknauki.ru/images/publications/2023/12/physics/Oblakova_Zubarev_Yakovlev.pdf. (дата обращения: 18.08.2024). DOI: 10.51691/2541-8327_2023_12_32.

7. Сухарев А.Н. Алмазы и бриллианты как инвестиционные инструменты, оценка их стоимости // Финансы и кредит. 2013. № 37 (565). С. 18–23.

8. Su M., Zhong Q., Peng H. Regularized multivariate polynomial regression analysis of the compressive strength of slag-metakaolin geopolymers based on experimental data // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 303. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124529.

9. Saqib M. Forecasting COVID-19 outbreak progression using hybrid polynomial-Bayesian ridge regression model // Applied Intelligence. 2021. Vol. 51. P. 2703–2713.

10. Tyagi K. et al. Regression analysis // Artificial intelligence and machine learning for EDGE computing. Academic Press. 2022. P. 53–63.