

*Журнал «Научное обозрение. Технические науки» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № 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 27.04.2024
Дата выхода номера 31.05.2024
Формат 60×90 1/8*

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

**Signed in print 27.04.2024
Release date 31.05.2024
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 2024/2
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

СТАТЬИ

ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ РАЗРЕЗА «ХАРБАЛАХСКИЙ» С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИЕЙ <i>Герасимов В.И., Антоева С.П., Заровняев Б.Н.</i>	5
ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СИСТЕМЫ КВАЗИКОГЕРЕНТНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ <i>Глуценко А.А., Глуценко А.Г., Глуценко В.А.</i>	13
МОДЕЛИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ МУЗЫКИ <i>Золотарев А.М., Белов Ю.С.</i>	18
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА ОЧИСТКИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ КАРБОНАТНЫМ РАСПЛАВОМ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ БЕДНЫХ ПО СОДЕРЖАНИЮ SO ₂ ГАЗОВ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ <i>Клышбекова Ж.Е., Досмухамедов Н.К.</i>	24
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЛОАГРЕГАТОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА НА НЕПРОЕКТНЫХ УГЛЯХ <i>Хвостиков А.С., Агарков О.В.</i>	29
НАУЧНЫЙ ОБЗОР	
ВЛИЯНИЕ ВАЛОРИЗОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ И ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПИЩЕВУЮ ЦЕННОСТЬ И УСВОЯЕМОСТЬ. ОБЗОР ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ <i>Бурак Л.Ч., Карбанович В.И.</i>	35
СТАТЬИ	
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СЕТИ МАССОВОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ГОРОДА ОШ <i>Адиева Г.М., Сатыбаев А.Дж.</i>	42
МАТНСАД АДАПТАЦИЯ ГИПЕРУПРУГИХ МОДЕЛЕЙ <i>Муслов С.А., Зайцева Н.В., Чистяков М.В., Фищенко К.А.</i>	50
ТЕХНОЛОГИЯ NR REDCAP (ФАЗА 2) УСЛУГ IOT НА СЕТИ 5G <i>Шепелев С.В., Бабин А.И., Коротков М.В.</i>	56

CONTENTS

Technical sciences

ARTICLES

TRANSFORMATION OF A DEPOSIT USING THE EXAMPLE OF THE KHARBALAKHSKY OPEN PIT MINE WITH SUBSEQUENT BIOLOGICAL RECLAMATIO	5
<i>Gerasimov V.I., Antoeva S.P., Zarovnyaev B.N.</i>	
INTERFERENCE SYSTEMS OF QUASI-COHERENT OSCILLATORS	13
<i>Glushchenko A.G., Glushchenko A.A., Glushchenko V.A.</i>	
DEEP LEARNING MODELS FOR MUSIC GENERATION	18
<i>Zolotarev A.M., Belov Yu.S.</i>	
TECHNOLOGICAL ASSESSMENT OF THE APPLICATION OF A METHOD FOR CLEANING WASTE GASES WITH CARBONATE MELT OF ALKALI METALS FOR SO ₂ POOR GASES OF NON-FERROUS METALLURGY	24
<i>Klyshbekova Zh.E., Dosmukhamedov N.K.</i>	
EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE BOILERS OF THE FAR EAST ON NON-PROJECT COALS	29
<i>Khvostikov A.S., Agarkov O.V.</i>	
REVIEW	
INFLUENCE OF VALORIZED PLANT PROTEINS AND PHENOLIC COMPOUNDS ON NUTRITIONAL VALUE AND DIGESTABILITY. REVIEW OF RECENT ADVANCES	35
<i>Burak L.Ch., Karbanovich V.I.</i>	
ARTICLES	
GEOINFORMATION MAPPING OF THE NETWORK OF MASS PASSENGER TRANSPORT OF THE CITY OF OSH	42
<i>Adieva G.M., Satybaev A.Dzh.</i>	
MATHCAD ADAPTATION OF HYPERELASTIC MODELS	50
<i>Muslov S.A., Zaytseva N.V., Chistyakov M.V., Fischenko K.A.</i>	
NR REDCAP TECHNOLOGY (PHASE 2) OF IOT SERVICES ON A 5G NETWORK	56
<i>Shepelev S.V., Babin A.I., Korotkov M.V.</i>	

СТАТЬИ

УДК 622.85/33

**ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ
НА ПРИМЕРЕ РАЗРЕЗА «ХАРБАЛАХСКИЙ»
С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИЕЙ****¹Герасимов В.И., ²Антоева С.П., ²Заровняев Б.Н.***¹ГБПОУ РС (Я) «Харбалахский образовательный комплекс
имени Н.Е. Мординова – Амма Аччыгыһай», Якутск;**² ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»,
Якутск, e-mail: Antoevasonia25@gmail.com*

Аннотация. В суровых природно-климатических условиях, в многолетней мерзлоте экологическая обстановка при разработке месторождений полезных ископаемых становится одной и важнейших задач в освоении природных ресурсов. При этом страдают и без того скудный ландшафт и экосистема в целом, в результате чего происходит локальный экологический дисбаланс. В первую очередь нарушается баланс биологической составляющей, состояние которого определяется растительностью, водными ресурсами и прекращается процесс саморегулирования системы в целом. Таким образом, после разработки месторождений происходит нарушение ландшафта, а в последующем прекращается саморегулирование природной среды и ее способность к самовосстановлению. Считается, что наиболее обширными нарушениями ландшафта характеризуется открытый способ разработки месторождений, по сравнению с подземным и другими геотехнологическими способами освоения недр. Наибольшие нарушения наносят выработанное пространство, отвалы, технологические площадки и коммуникации. Эти объекты имеют наиболее продолжительное влияние на природную среду, а также в них могут развиваться различные процессы, связанные с негативными воздействиями на окружающую среду, такие как повышение радиационного фона, загазованности, формирование пылевых облаков, самовозгорание, деформации и обрушения отвалов, бортов карьеров, таяние мерзлоты. В связи с вышеизложенным разработка месторождения полезного ископаемого на примере Харбалахского разреза рассматривается как единый процесс, включающий извлечение полезного ископаемого, технологическую, биологическую рекультивацию и восстановление нарушенных земель для дальнейшего землепользования. Таким образом, освоение недр рассматривается в двух этапах: первый этап – извлечение полезных ископаемых и процессы, связанные с ними (вскрытие, вскрышные работы, отвалообразование, строительство технологических объектов и сооружений, добычные работы, обогащение, строительство дамб, хвостохранилищ и др. объектов); второй этап – завершение горных работ, технологическая и биологическая рекультивация, с последующим возвратом нарушенных земель для использования в народном хозяйстве. При этом основным объемом работ второго этапа является биологическая рекультивация, осуществляемая после технологической рекультивации – выполаживания бортов карьеров, откосов отвалов. Сложность этапа заключается в скудности биоресурсов, растительного слоя и усложняется продолжительным зимним периодом. Эти обстоятельства потребовали подробного изучения возможностей собственных биоресурсов на отвалах, выработанных пространствах и технологических дорогах, определения видов растений, наиболее подходящих для данных условий. Для условий трансформирования Харбалахского месторождения, включающего его разработку, технологическую и биологическую рекультивацию, исследованы и оценены масштабы нарушения биоты, установлены особенности экосистемы (сложность приживаемости семян, скудность плодородного слоя, короткий вегетационный период и продолжительная зима и т. д.) и определены перспективные направления дальнейшего использования месторождения.

Ключевые слова: полезное ископаемое, карьер, эксплуатация месторождения полезных ископаемых, разработка полезных ископаемых, рекультивация, использование выработанного пространства

**TRANSFORMATION OF A DEPOSIT USING THE EXAMPLE
OF THE KHARBALAKHISKY OPEN PIT MINE
WITH SUBSEQUENT BIOLOGICAL RECLAMATIO****¹Gerasimov V.I., ²Antoeva S.P., ²Zarovnyaev B.N.***¹Harbalakh educational complex, Yakutsk;**² North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk,
e-mail: Antoevasonia25@gmail.com*

Annotation. The ecological sustainability of any landscape and ecosystem as a whole depends, first of all, on the biological component and is determined by the state of vegetation, which represents a stable self-regulating system that has a response to external influences through maintaining an undisturbed state to a certain extent and the ability to self-heal. The most common types of man-made landscapes are quarries, tailings ponds and waste rock dumps. For a long time they remain largely uncertain and unpredictable in environmental and environmental-economic relations, which requires measures to prevent their negative impact on the environment, including addressing issues of reclamation. A transformed mineral deposit is a mining-geological volume on the surface or in the interior of the Earth, consisting of an array of various rocks, including deformed ones, a mined-out space with a volume equal to the volume of the extracted rock mass, and natural pillars. Minerals, not mineral deposits, are physically mined. After the extraction of minerals, they continue to serve the needs of society, moving into another category of georesources in the form of mined-out space. New definitions of natural and transformed deposits show that the main targeted actions for the development of the Earth's interior are carried out in two stages. At the first

stage, the development of mineral resources is carried out, i.e. extraction of minerals. As a result, ground-based man-made voids are formed in the quarry field, i.e. mined-out spaces, dumps of various configurations and sizes. At the second stage of field operation, restoration, reclamation and use of mined-out space are implemented, i.e. its disposal by creating industrial and civil facilities for various purposes in it. Thus, in the conditions of the Far North, the transformation of the deposit begins with biological reclamation as a complex of restoration measures for disturbed biota and has its own characteristics (difficulty of seed survival, lack of fertile layer, survival of seeds after long frosts, etc.) and is due to the high degree of fragility of ecosystems and complexity selection of reclamation species.

Keywords: mineral, quarry, exploitation of mineral deposits, mining, reclamation, use of mined-out space

В арктических и северных регионах масштабы нарушения окружающей природной среды горнопромышленными предприятиями с каждым годом заметно увеличиваются, вызывая нарушение и вывод из сельскохозяйственного оборота земель. Выработанные пространства, отвалы и технологические площадки становятся источниками загрязнения окружающей среды, атмосферы, воды и почв, прилегающих сельскохозяйственных угодий, нарушают санитарно-гигиенические условия окружающей среды. С целью восстановления природного баланса территорий горнопромышленных регионов следует произвести их рекультивацию. Опыт рекультивации нарушенных земель в стране и за рубежом представлен в работах [1–3], где рассмотрены масштабы нарушения земель, их накопление и основные виды технологической и биологической рекультивации. Анализ работ показывает, что в настоящее время идет интенсификация накопления нарушенных земель выработанными пространствами, отвалами, технологическими дорогами и площадками, что требует безотлагательных мер по восстановлению нарушенных земель [4].

За последние годы выполнено достаточно много научно-исследовательских работ по разработке экологически безопасных технологий разработки месторождений и рекультивации нарушенных земель [5–7]. В работах представляются технологии ведения горных работ с внутренним отвалобразованием и последующей их рекультивацией. Данные технологии наиболее подходят для разработки угольных месторождений в условиях многолетней мерзлоты. Однако в этих работах не представляются технологии биологической рекультивации выработанного пространства с последующим использованием рекультивированного карьерного поля в народном хозяйстве.

Для решения вопроса восстановления нарушенных земель нами рассмотрены варианты их рекультивации, в том числе биологическая, и их использования в других целях после трансформирования месторождения в рекреационные зоны. Термин «трансформирование месторождения» включает в себя разработку месторождения с извлечением полезного ископаемого

и дальнейшее его использование в других целях. Например, после биологической рекультивации в виде пастбищ или создания в выработанном пространстве рекреационной зоны в виде пруда с использованием месторождения после извлечения полезного ископаемого [8, 9]. Таким образом, трансформирование месторождения включает его разработку, извлечение полезного ископаемого, технологическую и биологическую рекультивацию. Настоящая работа посвящена биологической рекультивации угольного месторождения.

Как известно, Якутия – крупнейший регион по добыче алмазов, золота, полиметаллов, руд и угля и, как следствие, их добыча открытым способом привела к обширным нарушениям ландшафта и загрязнениям водных ресурсов, в целом к дисбалансу экосистемы и ее трансформации в непригодные земли. В связи с этим актуально не только изучение состояния нарушенных земель, но и исследование возможностей их биологической рекультивации.

Цель исследования – трансформирование выработанного пространства карьера «Харбалахский» и отвалов в результате биологической рекультивации для его использования в различных сферах народного хозяйства.

Задачи исследования:

1. Изучить регенеративную способность естественных и техногенных почвогрунтов на карьере «Харбалахский».
2. Определить площади и объемы, подлежащие рекультивации при трансформировании карьера «Харбалахский».
3. Выявить наиболее регенеративные способы биологической рекультивации площадей разреза «Харбалахский» без применения плодородного слоя.

Результаты исследования могут быть использованы при оценке потенциала биологической рекультивации нарушенных площадей малых угледобывающих разрезов в условиях криолитозоны, что позволит обеспечить инновационные, эффективные и экономически целесообразные методы биологической рекультивации или создание рекреационных зон. Также определить основные направления трансформирования месторождения и области использова-

ния выработанного пространства и отвала повторно.

Новизна: впервые при разработке угольных месторождений в условиях многолетней мерзлоты вводится понятие «трансформированное месторождение» как следствие технологической и биологической рекультивации выработанного пространства и отвалов для их дальнейшего использования в различных отраслях народного хозяйства.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являются техногенные экосистемы (выработанное пространство, отвалы, технологические площадки, дороги, почвы и растительность) Харбалахского угольного разреза (АО «Телен») с. Харбалах Таттинского улуса Республики Саха (Якутия). Добыча угля ведется открытым способом.

Почвогрунты изучались с применением рекогносцировочных и лабораторных методов. Анализы химических свойств почв выполнены в Якутской республиканской агрохимической проектно-изыскательской станции. Для определения трансформационного месторождения производились расчеты выработанного пространства карьера «Харбалахский». При проведении исследований биологических ресурсов на территории Харбалахского разреза были использованы общепринятые ботанические и геоботанические методы Миркина и Розенберга. Названия растений использованы на русском языке по С.К. Черепанову [10, 11].

При этом было использовано новое понятие о разработке месторождения и дальнейшем его использовании после рекультивации, представленное Б.Р. Ракишевым под термином «трансформированное месторождение». Согласно этому понятию это месторождение полезного ископаемого как горно-геологический объект на поверхности, состоящее из массива различных горных пород, а после извлечения полезного ископаемого – месторождение в виде деформированных массивов, выработанного пространства, отвалов, технологических площадок и объектов с нарушенным ландшафтом.

Экологическая обстановка карьера «Харбалахский». Карьер «Харбалахский» представляет собой выработанное пространство в виде ямы на берегу р. Амга после извлечения угля, песчано-гравийной смеси и пород вскрыши, а также отвалами, высотой до 22–30 м и террасированным бугристым рельефом с крутонаклонными откосами. При этом, как правило, площадка выработанного пространства, технологических дорог и отвалов уплотнена техникой, что усложняет произрастание

и развитие любой растительности, что делает трансформированное месторождение неблагоприятным в экологическом отношении объектом. Так как сказывается кислотность пород, складированных в отвалы, где произрастание растительности происходит очень долго и вследствие вымывания солей дождевыми водами и оттаивания снега.

Степень зарастания отвалов растительностью. Растительный покров территории формируется на плоскогорном рельефе в условиях лучшей теплообеспеченности при большем количестве осадков и пониженной континентальности климата. На старых отвалах карьера «Харбалахский» (2010–2015 гг.) начинаются процессы естественного зарастания. Доминирующие виды растительности: лиственница даурская, ива-верба (1–1,7 м), пастушья сумка, иван-чай, осока острая, полынь обыкновенная, клевер ползучий. На отвалах 2020–2021 гг. растительности не наблюдается (на откосах полынь).

Работы по изучению трансформированного месторождения для биологической рекультивации карьера «Харбалахский» проводились совместно с инженерами АО «Телен». В ходе исследовательской работы изучены почвенный грунт, вода в отстойнике, растительность, отвалы пустых пород и определена степень трансформированности месторождения для биологической рекультивации.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты анализа плодородного слоя показали, что в районе ведения горных работ преимущественное развитие имеют эллювиальные и делювиальные карбонатные породы, а также дерново-карбонатные почвы. Местами обнаружены нижнекембрийские породы, перекрытые аллювиально-делювиальными отложениями с мерзлыми торфяниками.

Таким образом, долина р. Амга преимущественно отложена мерзлыми аллювиальными дерновыми торфяно-глеевыми почвами, малопригодными для биологической рекультивации.

Первые две фракции характерны для нижней половины комплекса, сложенной переслаиванием мелкозернистых песков, глин, суглинков и супесей, с включениями древесных остатков и тонкими линзами растительного детрита.

Верхняя часть представлена исключительно супесями и суглинками. Для данной толщи характерны четко выраженные косые и вертикальные текстуры, наличие крупных ледяных жил. Мощность отложений от 8–10 до 70 м.

Таблица 1

Результаты испытаний
Лабораторный номер пробы № 286-B

Точка отбора проб: Место временного хранения отходов					
№	Определяемый показатель	Единица измерения	Содержание	Показатель точности методики	НД на метод исследования
1	Сухой остаток	мг/кг	74,8	±8,2	ПНДФ 16.2.2:2.3:3.32-02
		%	0,00788		
2	Сульфат-ион	мг/кг	79,7	±15,9	ПНДФ 16.1:2:2.2:3.53- % 0,00797 08
		%	0,00797		
3	Марганец	мг/кг	72018,0	±32408,1	ПНДФ 16.3.85-17
		%	7,2018		
4	Железо	мг/кг	40362,8	±18163,3	ПНДФ 16.3.85-17% 4,03628

Таблица 2

Компонентный состав

№	Определяемый показатель	Единица измерения	Содержание
	Горная порода (песок)	%	97,44
	Механические примеси	%	2,56

Химический состав горной породы (97,44%)

№	Определяемый показатель	Единица измерения	Содержание
1	Сухой остаток	%	0,00788
2	Сульфат-ион	%	0,00797
3	Марганец	%	7,20180
4	Железо	%	4,03628
5	Диоксид кремния (песок)	%	86,18607

Результаты испытаний. Наименование образца (пробы): Отходы.

Цель: определение компонентного состава (табл. 1).

На основании химического анализа для отхода «вскрышные породы в смеси практически неопасные» установлен следующий компонентный состав (табл. 2).

Также провели анализ воды отстойника карьера «Харбалахский».

Источником обводнения выработки будут служить воды атмосферных осадков. Выработка будет представлять собой котлован.

Для сбора и отвода всех атмосферных вод, поступающих с участков местности, расположенных на склоне выше границ разреза, проходит нагорная канава трапецевидного сечения длиной 543 м, обеспечивающая отвод воды в пониженное место рельефа. Канава проведена бульдозером на механическое рыхление вдоль западного борта разреза.

Уклон дна разреза 0,06 в сторону юго-западного угла обеспечит сток вод атмосфер-

ных осадков с полотна дна разреза. Стекающие воды собираются в зумпф-отстойник, сооружаемый бульдозером на мехрыхление, на самых низких отметках дна разреза, после зимне-весенней добычи угля. Зумпф-отстойник играет роль очистного сооружения, где эти воды будут отстаиваться. Размеры земляного отстойника составляют: в плане 15×8 м, высота проточной части – 2 м. Зумпф разделяется внутри на две части фильтрующей дамбой из крупного камня.

Расчетный суточный приток дождевых вод в разрез составляет 155 м³/сут. Принятая емкость водоема с учетом перелива – 200 м³.

Вода из разреза периодически, по мере заполнения, откачивается насосом из водоприемного зумпфа и подается по водоводу на зумпф-отстойник, расположенный за пределами разреза в сторону юго-восточного угла. В зумпфе-отстойнике той же конструкции, что и зумпф-водосборник, очищенная вода периодически сливается самотеком на рельеф местности, а далее стекает в руч. Улахан-Уоттах.

Таблица 3

Характеристика условий выполнения анализа при биотестировании
Результаты испытаний
Лабораторный номер пробы № 286

№	Контролируемый показатель	Единица измерения	Результат	Показатель точности методики	НД на метод исследования
1	Водородный показатель	ед (рН)	7,3	±0,1	ПНДФ 16.2.2:2.3:3.33- 0

Таблица 4

Точка отбора пробы: карьер угля

Тестируемая проба	Тест-объект	Продолжительность наблюдения (ч)	Безвредная кратность разбавления	Оценка тестируемой пробы
Водная вытяжка из отходов: «вскрышные породы в смеси практически неопасные»	Дафния	48	1	Не оказывает острого токсического действия
	Хлорелла	22	1	Не оказывает острого токсического действия

Биотестируемая среда: водная вытяжка из отходов: «вскрышные породы в смеси практически неопасные».

Для эксперимента использовались следующие кратности разбавления водной вытяжки: 1 (без разбавления), разбавление в 100 раз, разбавление в 1000 раз, разбавление в 10000 раз. В качестве тест-объектов для проведения исследования соответствия с областью аккредитации использованы *Daphnia magna* Straus и *Chlorella vulgaris* Beijer. По результатам проведения лабораторных исследований, измерений и испытаний, проведенных методом биотестирования, установлено следующее: водная вытяжка из отходов «вскрышные породы в смеси практически неопасные» без разбавления, а также при кратности разбавления в 100 и более раз не оказывают токсического действия на тест-объекты *Daphnia magna* Straus и *Chlorella vulgaris* Beijer. Результаты биотестирования на двух тест-объектах показали, что в соответствии с Критериями отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей среды, утвержденными приказом МПР от 22.05.2017 № 242, водная вытяжка из отходов: «вскрышные породы в смеси практически неопасные», образующиеся в результате производственной деятельности ООО «Телен», соответствует V (пятому) классу опасности. Тип пробы: объединенная. Место отбора проб: Таттинский (улус) район, с. Харбалах. Агрегатное состояние отхода: твердое.

В результате работ изучен ботанический состав участков до и после разработки месторождения. На четырех контрольных площадках размером 5х5 м выявлены флористический состав, количественное соот-

ношение видов, их фенологическое состояние, структура сообществ (рис. 1).

Исследуемая площадка 1 располагается в 300 м на северо-восточной части карьера «Харбалахский». Из растительности преобладает листовенничное редколесье в основном вдоль технологической дороги. Травостой представлен овсяницей с примесью кипрея, полыни, видовое разнообразие весьма скудное. Растительность занимает до 60% исследуемой площадки, средняя высота растительности составляет от 10 до 40 см.

Исследуемая площадка 2 располагается дальше первой и дислоцируется в 500 м выше нее, где имеется зона естественного произрастания листовенницы, кустарников в смеси с ивой, шиповником, под которыми произрастает брусника вперемежку с разнотравьем, лисохвостом и овсяницей. Рельеф местности бугристый с развитой системой технологических дорог, просек, площадка сильно обводнена. Растительность покрывает площадку до 65–70%, имеющийся травостой достигает в высоту 20 см.

Площадка 3 представляет северо-восточную часть карьера, частично вырублена. На площадке имеется крутонаклонный высокий склон террасы, травостой весьма редкий и пребывает на начальной стадии сукцессионного процесса. Покрытие площадки растительностью такое же, как и площадки 2.

Площадка 4 располагается на восточной части карьера, напротив площадки 2. На площадке произрастает в основном полынь, бескильница, лапчатка, кипрей узколистный. Покрытие площадки растительностью составляет до 25%, высота травостоя достигает 30 см.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- отвалы
- вырубки
- земли, нарушенные при разведке месторождений
- ◆ - нарушенные земли
- ◆ - естественные земли

Рис. 1. Площадки исследований растительности земель до и после разработки месторождения «Харбалахский»

Результаты исследований растительности отвалов показали, что их растительный покров находится в начальной стадии сукцессионного развития. На новых и высоких отвалах нет никакой растительности. Вследствие работы тяжелой техники на этой площадке для выравнивания вершущек отвалов (технологический этап рекультивации) наблюдается чрезмерное уплотнение грунта, препятствующее закреплению семян и росту растений.

Наблюдения за отвалами, выработанным пространством и технологическими дорогами позволили установить, что со времени их формирования устойчивой растительности не было. На старых отвалах 10-летней давности начался процесс зарастания полынью, скердой кровельной, лапчаткой, кипреем, бескильницей, которые занимают до 10–25% исследуемых площадок.

Исследованиями установлено, что до начала разработки месторождения обнаружено 18 видов растений, в том числе багульник, толокнянка, брусника, береза, можжевельник, ель, сосна. Среди всех растений доминирует лиственница и брусника, встречаемость 100%.

На поверхности отвалов обнаружено 11 видов растительности, в том числе ива козиночная, кипрей, полынь, одуванчик.

Также имеются всходы красной смородины, шиповника, колокольчика круглолистного, бескильницы. Доминантом здесь является быстро прогрессирующий кипрей, благодаря способности распространяться с помощью ветров он распространяется на всю исследуемую площадку. Установлено, что через несколько лет вышеперечисленные виды травянистых растений вытесняются кустарниками и многолетниками. На этой площадке проективное покрытие достигает 5 баллов, а видовой состав увеличивается до 10 видов. Исследованиями установлены высокие показатели проективного покрытия на исследуемых участках 1 и 2 (табл. 5).

Установлено, что на поверхности старого отвала наблюдается медленное зарастание растительностью, так как здесь отсутствует плодородный почвенный слой для развития растительности.

Изучены отвалы карьера «Харбалахский». Отобраны два исследуемых участка и составлена карта: Отвал № 1 с площадью 992 м² отсыпан горной породой в 2021 г. Поверхность отвала выровнена на 85%, вторая часть состоит из крупно-глыбистых пород. Отвал № 2 с площадью 415 м² отсыпан в 2015 г. форма отвала виде треугольника, имеется растительность (рис. 2).

Таблица 5

Показатели проективного покрытия и видов растений на нарушенных площадках разреза «Харбалахский»

Объект исследования	Среднее значение проективного покрытия	Количество видов растений
Отвалы пустых пород (2015 г.)	5–16%	1–7
Площади, нарушенные при проведении геологоразведочных работ	10–26%	1–7
Вырубки лесов	46%	1–9



Рис. 2. Карта изучаемых отвалов карьера «Харбалахский»

Осмотром отвалов установлено, что растительность на их поверхности уничтожена тяжелой карьерной техникой, а также технологическими дорогами. На откосах уступов произрастают редкие экземпляры ив, разнотравья.

Отмечается, что за последние 35 лет не проводилась биологическая рекультивация отсыпанной плодородной почвы. В 1990-е гг. в старом карьере, что находится около 1 км юго-западной части от карьера «Харбалахский», высаживали картофель с отсыпкой плодородного слоя (чернозема). Поэтому способы и методы биологической рекультивации должны нести системный и поэтапный характер.

Для биологической рекультивации на отвалах разреза «Харбалахский» выбраны площадки по следующим показателям:

- расположение площадки вблизи разреза и пос. Харбалах (3 км), что удобно для выполнения наблюдений;

- доступность площадок для завоза оборудования и его размещения рядом с транспортной коммуникацией;

- отвалы должны быть полностью сформированные и устоявшиеся;

- небольшие габариты отвалов, с целью сокращения объемов для технологической рекультивации (средства на рекультивацию не предусмотрены);

- относительно спокойная поверхность отвала с оставлением площади с крупноглыбистыми породами.

Для определения объема трансформированного месторождения выбраны два отвала карьера «Харбалахский»: 1 – 2022 г., 2 – 2015 г. Произведен расчет объемов отвалов, слагающих карьерное поле, соответственно, объемы отвалов составили: 1 – 29760 м³, 2 – 9130 м³. Таким образом, объем выработанного пространства двух отвалов составляет примерно 38890 м³.

Исследования показали, что на площадях территории карьера «Харбалахский» нарушено более половины общей площади имеющегося растительного покрова. В целях определения объема выработанного пространства карьера для повторного использования карьерного поля нами вместе

с инженерами АО «Телен» произведены расчеты исходя из данных: общая площадь участка составляет 152000 м², из них отработанная площадь составляет 112500 м², объем горной массы 1992510 м³, вывезено на внешний отвал 239400 м³ на площади 39900 м², остальной объем горной массы перемещен во внутренний отвал, объем которого составляет 522082,2 м³, в качестве чего можно использовать данное выработанное пространство.

Таким образом, освоение месторождения «Харбалахский» можно рассмотреть в два этапа: извлечение угля и использование после биологической рекультивации. Последнее возможно при сохранении, восстановлении, обеспечении функционирования экосистемы в целом с последующим рациональным использованием всех компонентов биосферы в интересах народного хозяйства.

Заклучение

В результате предстоящего завершения отработки карьерного поля каменноугольного месторождения «Харбалахский» и запланированными рекультивационными работами весь процесс освоения месторождения можно разбить на два этапа: извлечение полезного ископаемого и восстановление. Дальнейшее его использование для народного хозяйства определяется понятием трансформированного месторождения после биологической рекультивации нарушенных земель. Выполненные с этой целью исследования перспективности рекультивационных работ позволили сделать следующие выводы:

1. На первом этапе освоения месторождения «Харбалахский» нарушено более 60% земельного отвода, из которых отвалы вскрыши занимают около 15%, собственно карьерное поле составляет 5%, технологические площадки и автомобильные дороги – 15%.

2. Отвалы вскрышных пород представлены небольшим биологически активным растительным слоем, песчаником и легкими суглинками вперемешку с песчано-гравийной смесью, на которых зафиксирована начальная стадия зарастания выработанного пространства, отвалов и технологических площадок. Выявлена возможность ускорения процесса путем проведения биологической рекультивации.

3. Выработаны рекомендации по использованию трансформированного месторождения в народном хозяйстве: создание лесных насаждений, обустройство водоемов различного назначения, нанесение биомата, навоза и др.

Список литературы

1. Кожевников Н.В., Заушинцена А.В. Отечественный и зарубежный опыт биологической рекультивации нарушенных земель // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле. 2017. № 1. С. 43–47.

2. Чемезов Е.Н., Пестерев А.П. Фоновая характеристика наземных экосистем Арктики // Горный журнал. 2023. № 4. С. 59–63. DOI: 10.17580/gzh.2023.04.09.

3. Zarovnyaev Boris, Shubin Grigory, Sobakina Mariya. Justification of environmentally safe technology for the development of fields with an ice-breed internal dump // 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019 // Conference Proceedings Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. 2019. Vol. 19. Is. 1.3. P. 363–369. DOI: 10.5593/sgem2019/1.3/S03.046.

4. Agata Fugiel, Dorota Burchart-Korol, Krystyna Czaplika-Kolarz and Adam Smoliński. Environmental impact and damage categories caused by air pollution emissions from mining and quarrying sectors of European countries // J. of Cleaner Production. 2017. Vol. 143. С. 159–168.

5. Зеньков И.В., Морин А.С., Кирюшина Е.В., Вокин В.Н., Веретеннова Т.А. Восстановление экологии нарушенных земель при разработке Волчанского угольного месторождения по результатам дистанционного зондирования // Уголь. 2019. № 10. С. 105–107. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-10-105-107.

6. Фомин С.И., Фауль А.А. Способы снижения экологической нагрузки на горнодобывающие регионы // Записки Горного института. 2013. Т. 203. С. 215–219.

7. Zarovnyaev B.N., Shubin G.V., Budikina M.E., Sobakina M.P., Koroleva S.I. Development of environmental geotechnologies in the conditions of cryolithzone // 20-th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2020 Conference Proceedings volume 19 Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining Is. 1.3. P. 59–64. DOI: 10.5593/SGEM2020/1.2/S03.008.

8. Ракишев Б.Р. Новые определения естественного и трансформированного месторождения полезного ископаемого и этапы их эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 8. С. 165–177. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_165.

9. Шеломенцев И.Г., Славиковская Ю.О. Классификация техногенных пустот недр с учетом направления использования ресурсного потенциала для целей экологической реабилитации территорий горнопромышленного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 12. С. 127–140. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-127-140.

10. Абакумов Е.А., Гагарина Э.И. Почвообразование в посттехногенных экосистемах карьеров на Северо-Западе Русской равнины. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 208 с.

11. Гоголева П.А. Справочное пособие «Конспект флоры высших сосудистых растений Центральной Якутии». Якутск: Изд-во СО РАН. Якут. фил., 2003. 64 с.

УДК 621.3.018.2/.372.8/.317.351

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СИСТЕМЫ КВАЗИКОГЕРЕНТНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

Глущенко А.А., Глущенко А.Г., Глущенко В.А.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, e-mail: gag646@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрены особенности распределения интенсивности электрического поля, формируемого системой осцилляторов в отсутствие точной когерентности излучения. Эффект интерференции при излучении когерентных излучателей широко используется в функциональной и измерительной технике, в частности в медицинском оборудовании, в современной технологии, в антенной технике. Когерентные осцилляторы формируют в области между ними стоячую волну и располагаются в узлах этой стоячей волны. Отклонение от когерентности, наблюдающееся в реальных конструкциях систем осцилляторов, приводит к качественному изменению интерференционной картины, формируемой излучателями, которая теряет симметрию и сползает в сторону излучателя с меньшей частотой осцилляции. Смещение интерференционной картины сопровождается нарушением симметрии взаимодействия осцилляторов: на высокочастотный осциллятор действует сила, стремящаяся сместить его в сторону осциллятора с меньшей частотой осцилляции, в область смещения узлов стоячей волны. Рассмотрено влияние степени рассогласования частот двух излучателей на характер интерференционной картины. Представлена временная динамика картины интерференции для конфигураций расположения осцилляторов, с расстояниями, кратными длине формируемых ими стоячих волн. Установлено, что рассогласование частот приводит к биению уровня интенсивности излучения во всех точках интерференционной картины в пространстве. Отклонение частоты излучения от когерентного приводит к переходу от статического распределения интенсивности картины интерференции к динамическому распределению.

Ключевые слова: квазикогерентные осцилляторы, пульсация интенсивности, интерференция

INTERFERENCE SYSTEMS OF QUASI-COHERENT OSCILLATORS

Glushchenko A.G., Glushchenko A.A., Glushchenko V.A.

*Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara,
e-mail: gag646@yandex.ru*

Annotation. The features of the intensity distribution of the electric field generated by a system of oscillators in the absence of precise radiation coherence are considered. The interference effect during radiation from coherent emitters is widely used in functional and measurement technology, in particular in medical equipment, in modern technology, and in antenna technology. Coherent oscillators form a standing wave in the region between them and are located at the nodes of this standing wave. The deviation from coherence observed in real designs of oscillator systems leads to a qualitative change in the interference pattern formed by the emitters, which loses its symmetry and slides towards the emitter with a lower oscillation frequency. The displacement of the interference pattern is accompanied by a violation of the symmetry of the interaction of the oscillators: a force acts on the high-frequency oscillator, tending to shift it towards the oscillator with a lower oscillation frequency in the region of displacement of the nodes of the standing wave. The influence of the degree of frequency mismatch of two emitters on the nature of the interference pattern is considered. The time dynamics of the interference pattern is presented for various configurations of the oscillator arrangement, with distances that are multiples of the length of the standing waves they generate. It has been established that frequency mismatch leads to a beating of the radiation intensity level at all points of the interference pattern in space. The deviation of the radiation frequency from coherent leads to a transition from a static intensity distribution of the interference pattern to a dynamic distribution.

Keywords: quasi-coherent oscillators, intensity pulsation, interference

При наложении волн, создаваемых когерентными источниками, возникает эффект интерференции, широко используемый на практике для создания различных оптических, акустических, радио- и квантовых устройств, таких как интерференционные фильтры, спектрометры, интерферометры и др. Эти устройства используются во многих областях науки и техники, включая оптику, электронику, устройства телекоммуникаций, медицину. Интерференция, возникающая при наложении волн, излучаемых когерентными осцилляторами, сравнительно хорошо изучена. Наиболее про-

стой моделью интерференции от излучения двух когерентных источников оптического диапазона длин электромагнитных волн является известный опыт Юнга [1], который имеет аналоги и для других типов волновых процессов. В многочисленных работах, посвященных исследованию явления интерференции, основное внимание уделяется удаленным фотонным когерентным системам передачи информации [2-4] многолучевой интерференции когерентных излучателей [5], влиянию интерференции на передачу сигналов по линиям связи [6], влиянию на интерференцию поляризации [7],

временной интерференции [8; 9], вопросам взаимодействия когерентных и квазикогерентных осцилляторов [10]. Вопросы нарушения когерентности излучения и временные аналоги опыта интерференции на двух щелях рассматривались в [9; 10]. В настоящей работе установлено, что отклонение частот излучения осцилляторов от точной когерентности приводит к качественному изменению картины интерференции – статическое распределение интенсивности меняется на динамическое, и в каждой точке пространства возникает биение интенсивности результирующего излучения с частотой, определяемой величиной сдвига частот осцилляторов. Рассмотрена интерференционная картина, формируемая квазикогерентными осцилляторами для различных положений осцилляторов.

Целью исследования являлся анализ изменения физических свойств системы при малом нарушении когерентности излучения двух точечных осцилляторов, получение аналитических решений для расчета распределения интенсивности излучения и сопоставление с картиной интерференции, создаваемой системой когерентных осцилляторов.

Материалы и методы исследования

Рассматривается суперпозиция электромагнитных волн, создаваемых системой квазикогерентных осцилляторов, получены аналитические соотношения для расчета интенсивности излучения системы квазикогерентных осцилляторов в зависимости от разности частот излучения. Представлены графики полученной картины интерференции пространственного распределения излучения при некогерентности излучения осцилляторов.

Базовые соотношения

Для простоты физической модели с целью получения аналитического решения рассмотрим два осциллятора с различными (но близкими) частотами осцилляции. В соответствии с принципом суперпозиции результирующее поле в произвольной точке Р пространства (рис. 1) можно представить в виде:

$$E = E_1(t + \tau_1) + E_2(t + \tau_2), \quad (1)$$

где τ_1, τ_2 – время запаздывания колебаний в точке наблюдения Р (рис. 1) от колебаний,

$$E_i^2(r, t) = [A_1 \cos(\omega_1 t - k_1 r_1) + A_1 \cos(\omega_2 t - k_2 r_2)]^2 + [A_2 \sin(\omega_1 t - k_1 r_1) + A_2 \sin(\omega_2 t - k_2 r_2)]^2, \quad (3)$$

где частоты квазикогерентных колебаний различаются и соответственно равны:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega_2 = \frac{2\pi}{T + \Delta T}, \quad \Delta T \ll T,$$

создаваемых в момент времени t осцилляторами, расположенными в точках с координатами: $x = 0, y = d$ и $x = 0, y = -d$.

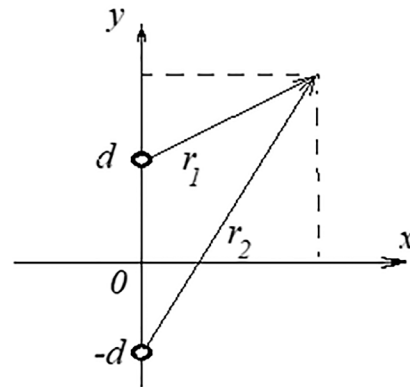


Рис. 1. Конфигурация двух квазикогерентных осцилляторов

Расстояния от каждого осциллятора до точки наблюдения определяются в соответствии с рисунком 1 соотношениями:

$$r_1 = \sqrt{(x)^2 + (y - d)^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(x)^2 + (y + d)^2}$$

Каждое из двух однонаправленных колебаний описывается функцией:

$$E_i(r, t) = E_{1,2} \cos(\omega_{1,2} t - k_{1,2} r_{1,2} + \phi_{1,2}), \quad (2)$$

где $E_{1,2}$ – амплитуды, $\omega_{1,2} t - k_{1,2} r_{1,2} + \phi_{1,2}$ – фазы колебаний, создаваемых осцилляторами в точке наблюдения Р, частоты осцилляторов в общем случае различаются $\omega_1 \neq \omega_2$, при этом для квазикогерентных колебаний двух источников $\omega_1 \approx \omega_2$, $k_{1,2}$ – волновые векторы. Для простоты полагаем $\phi_{1,2} = 0$ и амплитуды осцилляторов одинаковыми. Обобщение на случай большего числа осцилляторов проводится аналогично [5].

Результаты исследования и их обсуждение

В частном случае одиночного излучателя из (1) следует, что распределение интенсивности волн стабильно во времени и имеет равномерное распределение в пространстве. Для двух квазикогерентных источников имеем соотношение:

волновые числа $k_1 = \frac{\omega_1}{v}, k_2 = \frac{\omega_2}{v}$,

v – скорость распространения волн.

В рассматриваемом случае амплитуда результирующего колебания зависит не только от положения точки наблюдения в простран-

стве (как в стабилизированной картине распределения энергии при интерференции волн когерентных источников), но и от времени t . Соотношение (3) представим в другом виде, более удобном для аналитического исследования картины интерференции. Сложение колебаний (3) дает соотношение:

$$E(r, t) = \sum_{i=1}^2 A_i \cos(\omega_i t - k_i r_i) = A_1 \cos(\omega_1 t - k_1 r_1) + A_2 \cos(\omega_2 t - k_2 r_2) =$$

$$= 2A \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 r_1 - k_2 r_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 r_1 + k_2 r_2}{2}\right) \quad (4)$$

Из которого следует, что в частном случае когерентных источников ($\omega_1 = \omega_2$) амплитуда результирующего поля зависит только от положения точки наблюдения в пространстве: от параметра $k_1 r_1 - k_2 r_2$, и не зависит от времени. В случае же некогерентных источников $\omega_1 \neq \omega_2$ и амплитуда $2A \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 r_1 - k_2 r_2}{2}\right)$ зависит не только от положения точки наблюдения в пространстве, но и меняется со временем

с частотой $\Delta\omega/2$, определяемой расстройкой частот осцилляции. В каждой точке пространства наблюдается биение интенсивности. На рисунке 2а показано распределение интенсивности картины интерференции двух когерентных источников, и для сравнения на рисунке 2б показано распределение интенсивности тех же источников при нарушении когерентности излучения этих осцилляторов (для $\Delta\omega \approx 0.1\omega$). Осцилляторы расположены на расстоянии длины волны. Нарушение когерентности меняет структуру поля.

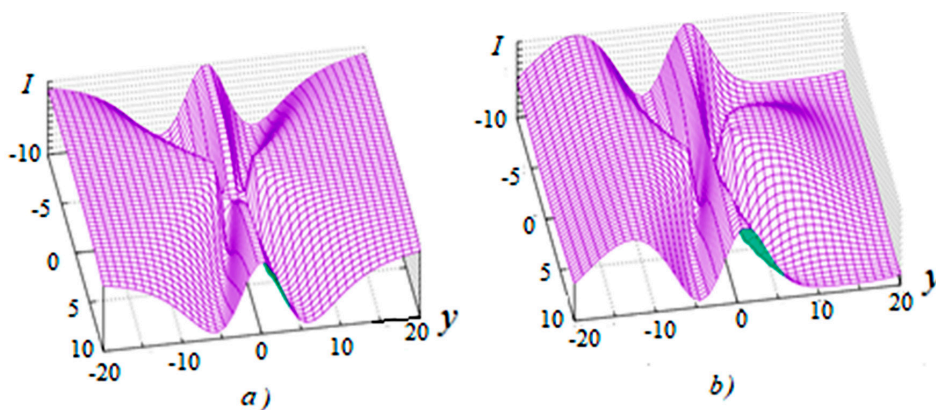


Рис. 2. Интерференция когерентных (а) и квазикогерентных (б) источников, расположенных на расстоянии $d = \lambda$

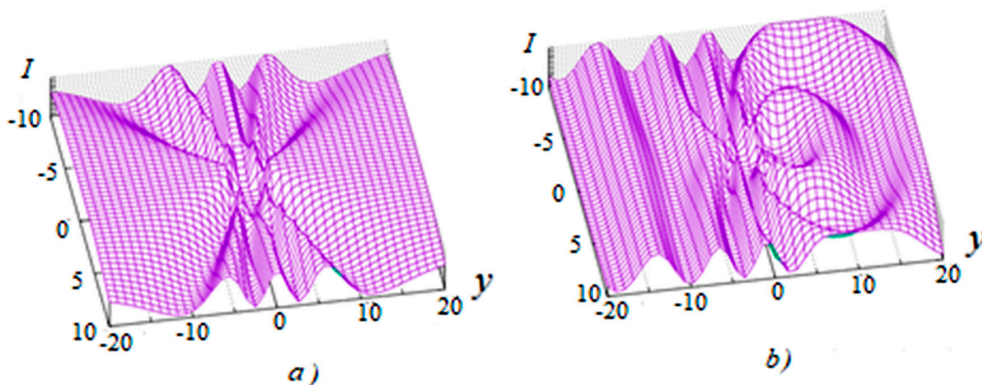


Рис. 3. Интерференция когерентных (а) и квазикогерентных (б) источников излучения, расположенных на расстоянии $d = 2\lambda$

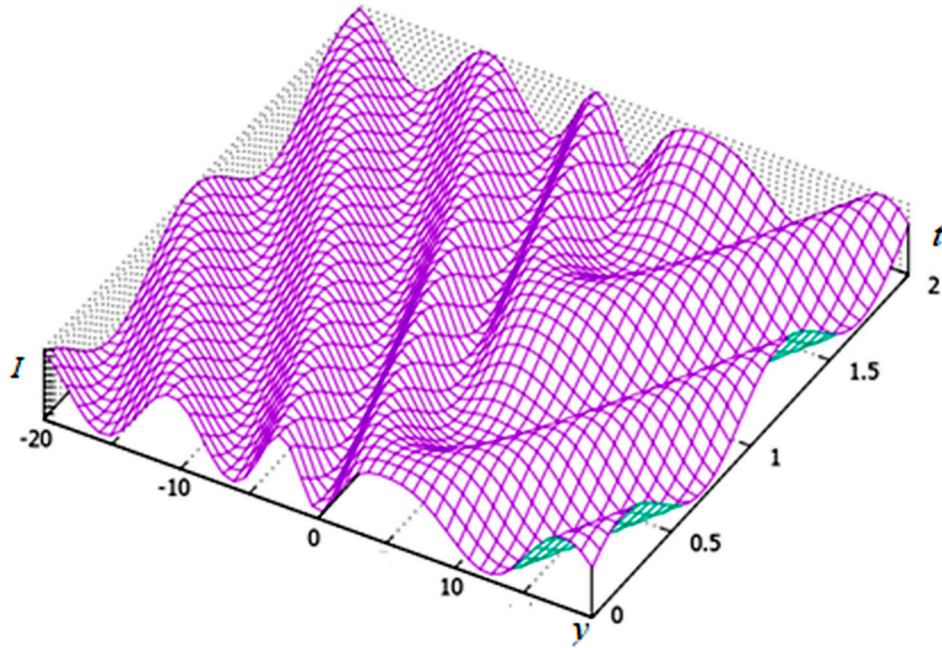


Рис. 4. Изменение со временем интерференционного распределения интенсивности излучения некогерентных осцилляторов на экране, расположенном по оси Oy в плоскости $x = 5$

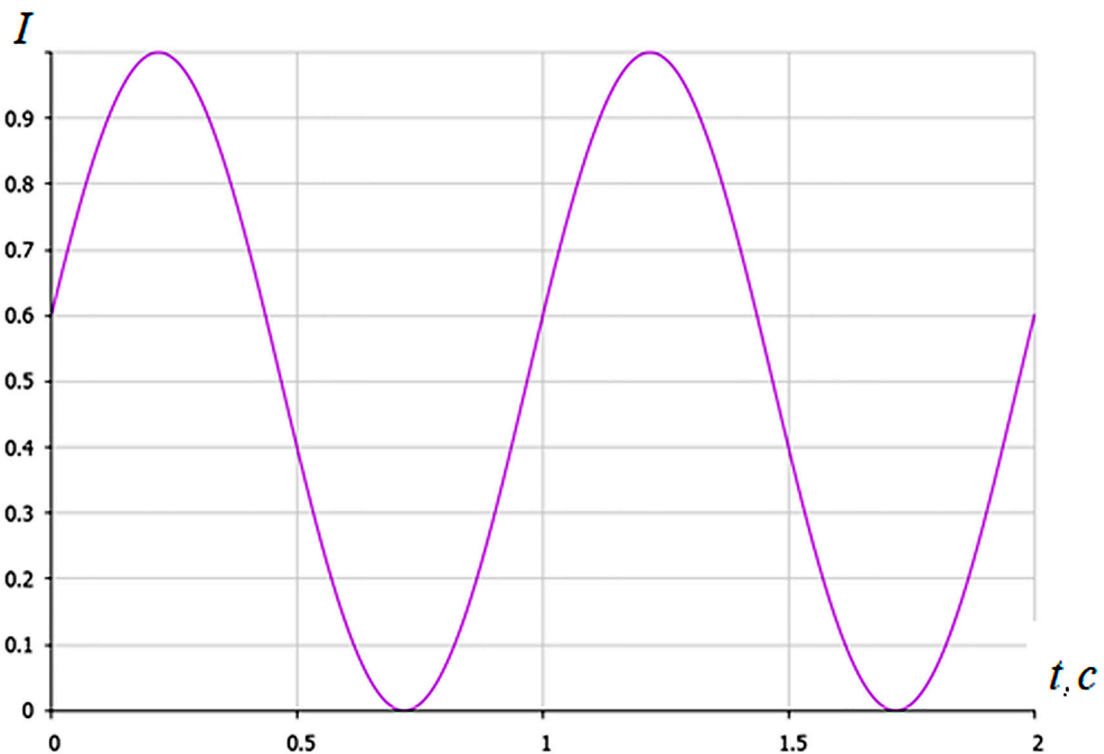


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения от времени

На рисунке 3а показано распределение интенсивности излучения картины интерференции двух когерентных источников, и для сравнения на рисунке 3б показано распределение интенсивности тех же источни-

ков при таком же нарушении когерентности для источников, расположенных на расстоянии $d = 2\lambda$. При удалении осцилляторов друг от друга наблюдается более значительная деформация картины интерференции.

На рисунке 4 показано изменение со временем картины интерференционного распределения интенсивности излучения двух некогерентных осцилляторов на проекционном экране, расположенном на расстоянии $x = 5$ см от линии, проходящей через заряды. С течением времени интерференционная картина смещается со скоростью, пропорциональной разности частот осцилляторов.

На рисунке 5 показана зависимость изменения интенсивности излучения двух осцилляторов от времени, наблюдающаяся в каждой точке пространства.

Из рисунков 2 и 3 видно, что для всех точек пространства, расположенных на оси Ox , перпендикулярной к линии расположения излучателей, амплитуда колебаний максимальна и постоянна для всех точек, относительно которых осцилляторы расположены симметрично (для которых выполняется соотношение: $k_1 r_1 - k_2 r = 0$). В других точках пространства амплитуда, наоборот, пульсирует с частотой $\Delta\omega$ и периодом $T = 2\pi / \Delta\omega$. Период пульсаций растет с уменьшением разности частот осцилляторов. Пульсации исчезают для когерентных осцилляторов ($T \rightarrow \infty$ при $\Delta\omega \rightarrow 0$).

Закключение

Рассмотрено изменение интерференционной картины при нарушении когерентности частот излучения осцилляторов, расположенных в изотропной однородной среде. Установлено, что отклонение от когерентности излучения приводит к нарушению симметрии интерференционной картины относительно осцилляторов: область минимумов интенсивности излучения смещается в сторону осциллятора с наименьшей частотой излучения. Кроме того, уменьшается длина волны, формируемой между осцилляторами. Это приводит к формированию воздействия на осцилляторы: на осцилляторы с более высокой частотой осцилляции действуют силы в направлении осцилляторов с низкой частотой осцилляции. Нарушение когерентности приводит к неустойчивости

системы свободных осцилляторов, к возникновению зависимости результирующей амплитуды колебаний не только от положения точки наблюдения, но и от времени. Возникает пульсация величины интенсивности излучения во всех точках пространства с частотой, равной разности частот излучателей. Показана зависимость интерференционной картины от величины разности частот излучения квазикогерентных излучателей и их взаимного положения в пространстве.

Список литературы

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика. М.: Физматлит, 2021. 746 с.
2. You X., Zheng M., Chen S., Liu R. et al. Quantum interference with independent single-photon sources over 300 km fiber // *Advanced Photonics*. 2022. Vol. 4(6). P. 066003. DOI: 10.1117/1.AP.4.6.066003.
3. Fernandes-Guasti M., Garsia-Guerrero C. Time and Space Resolved First Order Optical Interference between Distinguishable // *Photon Paths*. *Front. Phys.* 2022. Vol. 9. P. 813565. DOI: 10.3389/fphy.2021.813565.
4. Deng Y., Wang H., Ding X. et al. Quantum Interference between Light Sources Separated by 150 Million Kilometers // *Phys. Rev. Lett.* 2019. Vol. 123. P. 080401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.080401.
5. Glushchenko A.A., Glushchenko A.G., Glushchenko E.P. Generalization of the Cosines Theorem to Polygons and Its Application to the Analytical Calculation of Multi-Beam Interference of Coherent Radiation of Light with an Arbitrary Phase Distribution // *European J. of Physics Education*. 2020. Vol. 11. Is. 3. P. 38-46.
6. Дорохова М.А., Конохов А.И., Мельников Л.А., Платун А.С. Конструктивная интерференция оптических солитонов в волокне с периодическим изменением дисперсии // *Известия Саратовского университета. Сер. Физика*. 2014. Т.14. Вып. 1. С. 32-35. DOI: 10.18500/1817-3020-2014-14-1-32-35.
7. Молотков Н.Я. Интерференция электромагнитных волн с эллиптическими, круговыми или линейными поляризациями // *Вестник ТГУ*. 1998. Т. 3. Вып 2. С. 142-148.
8. Kaneyasu T., Hikosaka Y., Wada S. et al. Time domain double slit interference of electron produced by XUV synchrotron radiation // *Sic. Rep.* 2023. Vol. 13. P.6142. DOI: 10.1038/s41598-023-33039-9.
9. Tirole R., Vezzoli S., Galiffi E. et al. Double-slit time diffraction at optical frequencies // *Nat. Phys.* 2023. Vol. 19. P. 999–1002. DOI: 10.1038/s41567-023-01993-w.
10. Glushchenko A.A., Glushchenko A.G., Glushchenko V.A. Features of the interaction of stationary oscillating charges E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 431. P. 02025. DOI: 10.1051/e3sconf/202343102025.

МОДЕЛИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ МУЗЫКИ

Золотарев А.М., Белов Ю.С.

*ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»,
Калужский филиал, Калуга, e-mail: artemmaxzolotarev@yandex.ru*

Аннотация. Одним из наиболее популярных направлений применения искусственного интеллекта на сегодняшний день является генерация музыки. Цель данной работы – рассмотреть существующие сегодня модели генерации аудиоданных, основанные на рекуррентных нейронных сетях, генеративных состязательных сетях, вариационных автоэнкодерах и трансформерах. В ходе исследования были проанализированы последние разработки в области генерации музыки. В статье были представлены наиболее современные архитектуры генерации аудиоданных. Модели, описанные в данной статье, используются для генерации мелодий, аранжировок, нот, сохраняя при этом стиль произведения и генерируя довольно продолжительные композиции. Представленные в тексте архитектуры, такие как MelodyRNN, C-RNN-GAN, MusicVAE и др., демонстрируют различные подходы и техники, используемые для создания музыкального контента на сегодняшний день. Каждая из этих моделей обладает как своими преимуществами, так и недостатками, а также зачастую используют комбинации различных подходов к построению алгоритмов. Данное исследование призвано показать многообразие подходов к генерации музыки на основе моделей глубокого обучения. Генерация музыки имеет большой потенциал применения, как помогая творческим людям, так и заменяя их.

Ключевые слова: глубокое обучение, рекуррентные нейронные сети, состязательные сети, вариационные автоэнкодеры, трансформеры

DEEP LEARNING MODELS FOR MUSIC GENERATION

Zolotarev A.M., Belov Yu.S.

*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, Kaluga,
e-mail: artemmaxzolotarev@yandex.ru*

Annotation. One of the most popular applications of artificial intelligence today is music generation. The purpose of this work was to consider the currently existing models of audio data generation based on recurrent neural networks, generative adversarial networks, variational autoencoders and transformers. The research analyzed the latest developments in the field of music generation. The most modern architectures of audio data generation were presented in the article. The models described in this article are used to generate melodies, arrangements, and notes, while maintaining the style of the piece and generating fairly long compositions. The architectures presented in the text, such as MelodyRNN, C-RNN-GAN, MusicVAE and others, demonstrate the various approaches and techniques used to create musical content today. Each of these models has its own advantages and disadvantages, and often use combinations of different approaches to building algorithms. This study aims to show the variety of approaches to music generation based on deep learning models. Music generation has great potential for use both as an assistant to creative people and as a substitute for them.

Keywords: deep learning, recurrent neural networks, adversarial networks, variational auto-encoders, transformers

Все созданные на данный момент модели генерации музыки можно классифицировать в зависимости от вида использованного алгоритма на четыре вида: основанные на правилах, использующих марковскую модель, работающие на алгоритмах глубокого обучения и применяющие эволюционные вычисления. Наиболее распространенными из них являются модели, в основе которых лежат алгоритмы глубокого обучения.

Цель исследования – рассмотреть модели глубокого обучения для генерации музыки, такие как рекуррентные нейронные сети, генеративные состязательные сети, вариационные автоэнкодеры и трансформеры.

Общая структура модели

Генерация контента – это расширенная область глубокого обучения. Благодаря до-

стижениям Google black и CTRL в области создания музыки, глубокое обучение как метод создания музыки привлекает все большее внимание. В отличие от систем музыкальной генерации, которые оперируют грамматикой или правилами, системы, использующие глубокое обучение, способны анализировать распределение и актуальность сэмплов из различных музыкальных корпусов и создавать музыку в стиле исследуемого массива путем прогнозирования или классификации [1].

Рекуррентные нейронные сети

Рекуррентные нейронные сети (RNN) представляют собой класс нейронных сетей, предназначенных для анализа временных рядов, что делает их удобными для работы с музыкальными данными. Од-

нако проблема длительных временных зависимостей остается актуальной для RNN из-за проблемы градиентного исчезновения или взрыва, которая возникает при обучении на длинных временных последовательностях. LSTM, как вариант RNN, эффективно решает проблему длительной временной зависимости RNN, вводя состояния ячеек и используя три типа элементов управления, а именно входные элементы, элементы забывания и выходные элементы, предназначенные для хранения информации и управления ею [2].

Google Brain разработала MelodyRNN (рис. 1), где использовались lookback RNN и attention RNN для повышения способности RNN к запоминанию структур в длинных последовательностях. Кирти и его коллеги внедрили механизм внимания и использовали метод отсева для снижения переобучения при создании джазовой музыки [3]. RL Tuner использует сеть RNN для предоставления частичных значений вознаграждения для модели обучения с подкреплением. Нейронная сеть Anticipation-RNN для генерации мелодий интерактивных припевов в стиле Баха. Макрис и соавт. разработали индивидуальные сети LSTM для различных видов барабанов, при этом сеть прямой связи (FF) играла роль условного уровня [4]. StructureNet создает базовую монофоническую сопровождающую музыку, используя сети LSTM.

Что касается генерации аранжировок, Folk-RNN впервые применила LSTM для создания музыкальных последователь-

ностей, представленных в формате ABC для создания народной музыки. DeepBach использует Vi-LSTM для создания хоровой музыки в стиле Баха, учитывая двунаправленный поток времени: одно направление учитывает прошлое, а другое – будущее. XiaoIce Band предлагает сквозную китайскую многорожечную платформу для генерации поп-музыки, которая использует сеть GRU для обработки низкоразмерных аккордов и получение скрытых состояний с помощью кодеров и декодеров. Amadeus применяет явный подход к кодированию длительности, представляя несколько аудиопотоков в виде длительности нот и используя механизм вознаграждения RL для улучшения структуры создаваемой музыки. JamBot использует LSTM сеть аккордов для предсказания последовательностей аккордов и полифоническую LSTM сеть для генерации полифонической музыки на основе этих предсказанных последовательностей аккордов [5].

PerformanceRNN преобразует MIDI-файл живой фортепианной пьесы в музыкальное представление нескольких one-hot векторов с 413 измерениями и определяет временной «шаг» фиксированного размера (10 мс) вместо значения времени ноты. PerformanceNet – это первая попытка преобразования партитуры в аудио с использованием полностью сверточной нейронной сети с символическим представлением музыки в качестве входных данных и звуковым представлением в качестве выходных данных [6].

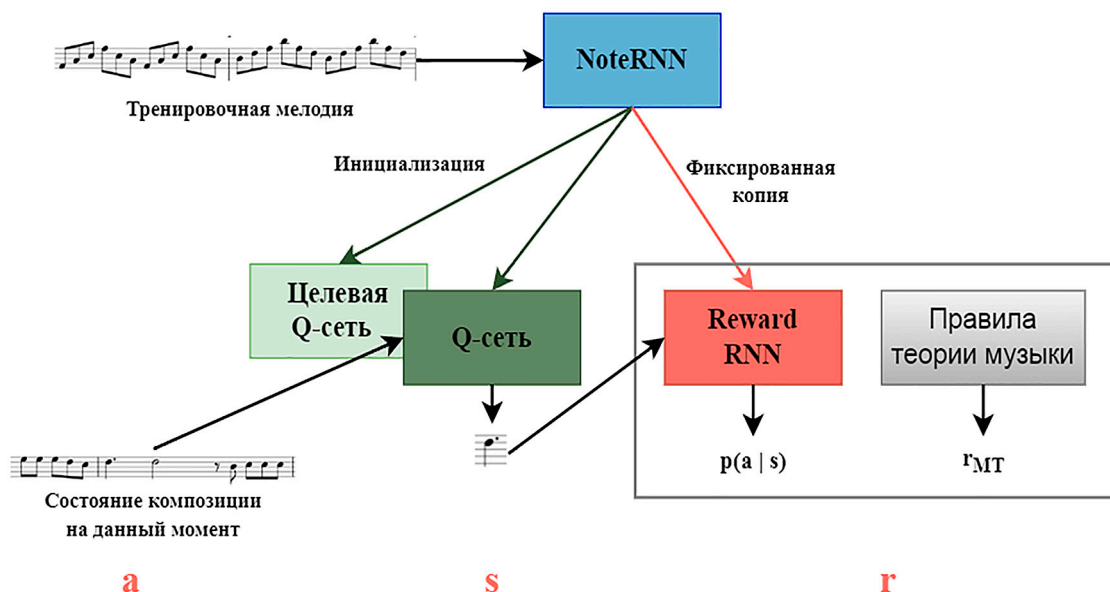


Рис. 1. Архитектура модели MelodyRNN

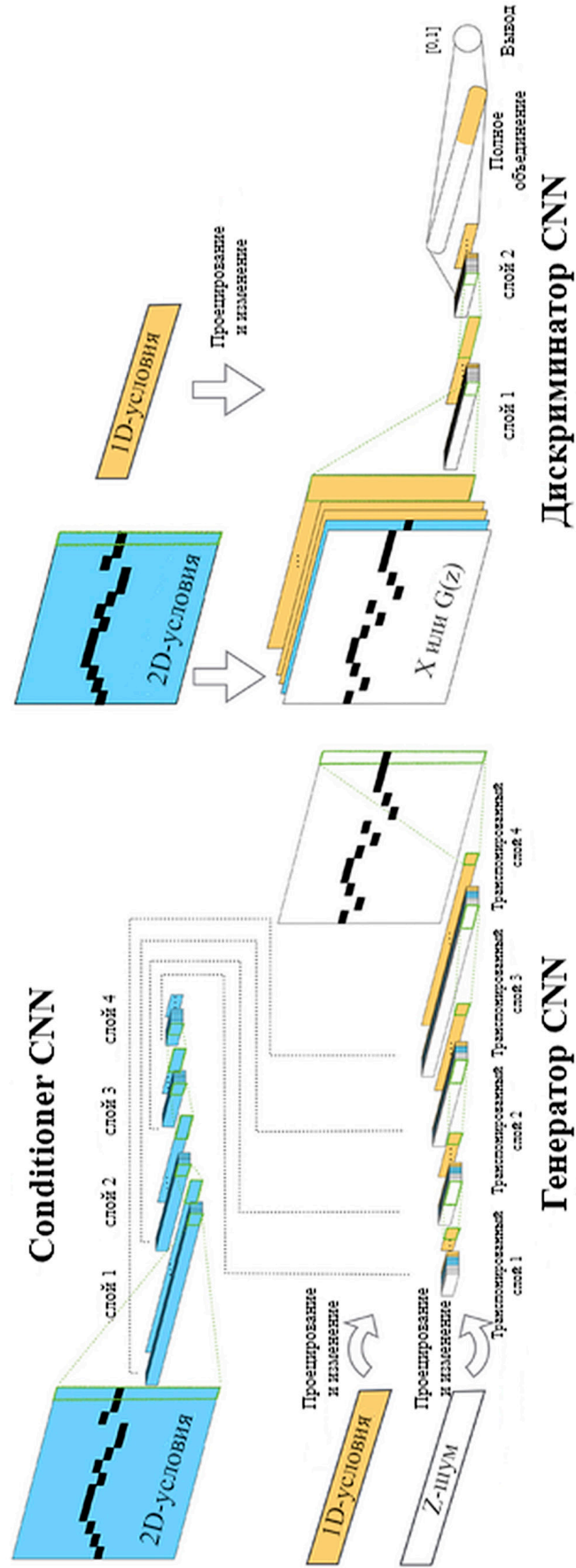


Рис. 2. Системная схема модели MidNet для генерации музыки в символьном представлении

Генеративные состязательные сети

Генеративные состязательные сети (GAN) работают по принципу соревнования между двумя нейронными сетями: генератором и дискриминатором. Генератор создает новые данные из случайного шума или других данных. Он стремится создать данные, которые похожи на обучающие. Дискриминатор принимает как настоящие обучающие данные, так и данные, созданные генератором, и пытается отличить их друг от друга.

C-RNN-GAN использует LSTM сети для создания музыкальных мелодий, однако он не имеет механизма для создания музыки с учетом определенного начального условия. MidiNet (рис. 2) улучшает метод, вставляя информацию о мелодии и аккорде, сгенерированных на предыдущем этапе, в качестве условного механизма на среднем уровне свертки генератора для ограничения генерации типов нот. JazzGAN разработал модель GAN для монофонической джазовой музыки, используя LSTM для музыкальной импровизации на основе последовательности аккордов. SSMGAN применил модель GAN для создания самоподобной матрицы (SSM) для отражения музыкальных самоповторов, которая затем была подана на сеть LSTM для генерации мелодий. Для генерации мелодии из текстов песен был разработан условный LSTM-GAN. Он содержит генератор LSTM и дискриминатор LSTM, оба с текстами песен в качестве условных входных данных.

Для генерации аранжировки MusGAN предложил модель GAN с тремя типами генераторов для построения корреляций между несколькими дорожками. BinaryMuseGAN усовершенствовал вышеупомянутый метод, введя бинарные нейроны (BN) в качестве входных данных для генератора.

Лян и соавт. провели исследования, в котором попытались воссоздать сианьскую барабанную музыку, обучив генеративную сеть на правилах теории музыки и характеристиках китайской народной музыки [7].

Когда речь идет о передаче стиля и создании звука, CycleGAN применяет функцию потерь стиля для изменений и функцию потерь контента для сохранения согласованности контента [8]. CycleBEGAN использует сеть BEGAN для стабилизации процесса обучения, а также вводит переходные соединения для улучшения четкости мелодии и текстов песен, а также рекурсивные слои для повышения точности высоты тона для достижения преобразования мужского и женского голоса. Кроме того, Джин и др. использовали сеть LSTM в качестве генератора, добавив музыкальные правила в качестве функции вознаграждения при обучении с подкреплением в управля-

ющую сеть [9]. В области генерации звука WaveGAN был первым, кто попытался использовать GAN для создания аудиосигналов в их необработанном виде, а GANSynth усовершенствовал этот подход, генерируя всю последовательность параллельно.

Вариационный автоэнкодер

Вариационный автоэнкодер (VAE) – это алгоритм сжатия для кодиров и декодеров, который способен анализировать и генерировать такую информацию, как динамику высоты тона и инструментовку в полифонической музыке.

Примерами таких моделей являются MIDI-VAE и MusicVAE (рис. 3). MIDI-VAE использует три пары кодиров/декодиров, которые вместе используют латентное пространство для автоматического восстановления высоты тона, интенсивности и инструментовки музыкальной композиции, с целью изменения музыкального стиля. MusicVAE использует иерархический декодер для улучшения моделирования последовательностей с долговременной структурой, используя двунаправленный RNN в качестве кодера. Вэй и соавт. не применяли сквозной подход к изучению иерархических представлений, а вместо этого представили новую модель, основанную на EC2-VAE [10]. Дубнов и соавт. разработали vanilla polyphonic VAE, используя только линейные слои, чтобы изучить скрытое представление музыкальной поверхности [11].

MG-VAE – первое исследование, где были использованы глубокие генеративные модели и методы состязательного обучения для создания восточной популярной и фолк-музыки [12].

MahlerNet построил условный VAE для моделирования распределения латентных состояний. Две двунаправленные сети RNN образуют кодер, а декодер выводит длительность, высоту звука и инструмент [13]. MIDI-Sandwich2 представляет иерархическую мультимодальную сеть, порожденную слиянием VAE (MFG-VAE), основанную на RNN. MusAE впервые применил состязательные автоэнкодеры для генерации музыки.

Трансформер

Основная идея этой архитектуры заключается в использовании механизма внимания для указания корреляций между входными данными.

Музыкальный трансформер существенно снижает пространственную сложность промежуточных векторов, представляющих относительное положение в порядке очередности длины, что делает его применимым для фортепианных музыкальных композиций.

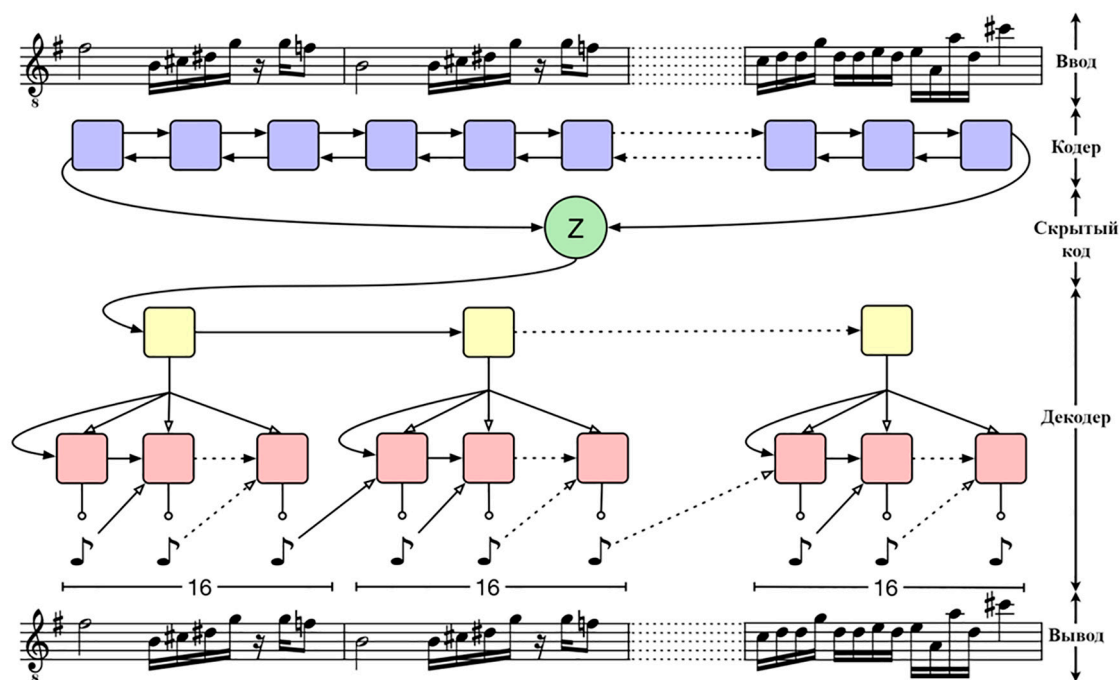


Рис. 3. Схема иерархической рекуррентной вариационной модели автоэнкодера MusicVAE

MuseNet использовала ту же сеть, что и GPT-2, которая обучается с использованием пересчитанного и оптимизированного ядра трансформера для генерации четырехминутной музыкальной композиции, состоящей из десяти различных инструментов. На рис. 4 показана блок-схема этого трансформаторного самокодера [5].

Цао с соавт. предложили метод, основанный на трансформере, для генерации высококачественной мультинструментальной музыки из входных данных аккордовой последовательности [14]. Muse Morphose

предлагает соединить воедино трансформер и вариационный автоэнкодер для того, чтобы добиться передачи стиля длинных пьес для фортепиано поп-музыки, где могут быть указаны различные атрибуты композиции. Transformer VAE объединяет трансформер с VAE, эффективно устраняя ограничения VAE в обработке структур временных рядов и невыясненной природы скрытых состояний трансформера. Чой и соавт. аналогичным образом использовали трансформер (декодер) для получения глобального представления музыки [15].

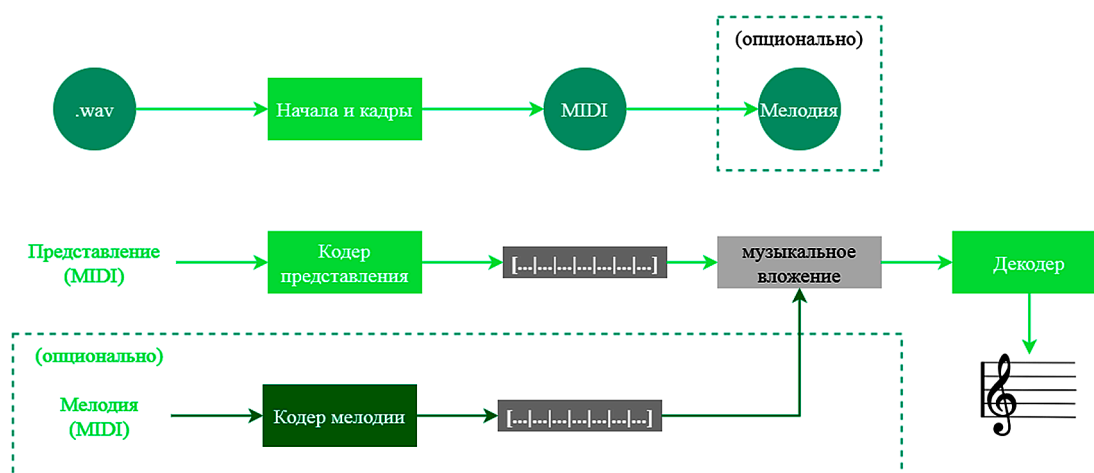


Рис. 4. Технологическая схема самокодера Transformer MuseNet

Заключение

В данной статье были рассмотрены существующие на сегодняшний день модели для генерации музыки, основанные на рекуррентных нейронных сетях генеративных состязательных сетей, вариационных автоэнкодерах и трансформерах.

Список литературы

1. Мосин Е.Д., Белов Ю.С. Основы генерации музыки в волновом и нотном форматах // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2022. С. 71–75.
2. Мосин Е.Д., Белов Ю.С. Генерация музыки с использованием двунаправленной рекуррентной нейронной сети // Научное обозрение. Технические науки. 2023. № 1. С. 10–14.
3. Keerti G., Vaishnavi V.A., Mukherjee P. Attentional networks for music generation // Multimedia tools and applications. 2020. P. 1–5.
4. Makris D., Kaliakatsos-Papakostas M., Karydis I. Conditional neural sequence learners for generating drums' rhythms // Neural Computing and Applications. 2019. № 31 (6). P. 1793–1804.
5. Natsiou A., O'Leary S. Audio representations for deep learning in sound synthesis: A review // IEEE/ACS 18th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA). 2021. P. 1–8.
6. Oore S., Simon I., Dieleman S. This time with feeling: learning expressive musical performance // Neural Computing and Applications. 2020. № 32 (4). P. 955–967.
7. Liang T., Li P., Cao Y. Research on Generating Xi'an Drum Music Based on Generative Adversarial Network // 2023 IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE). 2023. P. 1398–1402.
8. Brunner G., Wang Y., Wattenhofer R. Symbolic Music Genre Transfer with CycleGAN // IEEE 30th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). 2018. P. 786–793.
9. Jin C., Tie Y., Bai Y. A Style-Specific Music Composition Neural Network // Neural Processing Letters. 2020. № 52 (3). P. 1893–1912.
10. Wei S., Xia G. Learning long term music representations via hierarchical contextual constraints // 22nd International Society for Music Information Retrieval Conference. 2021. P. 738–745.
11. Wang T., Liu J., Jin C. An intelligent music generation based on Variational Autoencoder // International Conference on Culture-oriented Science & Technology (ICCST). 2020. P. 394–398.
12. Luo J., Yang X., Ji S. MG-VAE: Deep Chinese Folk Songs Generation with Specific Regional Styles // Proceedings of the 7th Conference on Sound and Music Technology (CSMT), 2020. P. 93–106.
13. Lousseief E., Sturm B. MahlerNet: Unbounded Orchestral Music with Neural Networks // Nordic Sound and Music Computing Conference. 2019. P. 57–63.
14. Cao B., Fukumori T., Yamashita Y. Multi-Instruments Music Generation Based on Chord Input // 2023 IEEE 12th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). 2023. P. 1082–1083.
15. Choi K., Hawthorne C., Simon I. Encoding musical style with transformer autoencoders // International Conference on Machine Learning. 2020. P. 1899–1908.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА ОЧИСТКИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ КАРБОНАТНЫМ РАСПЛАВОМ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ БЕДНЫХ ПО СОДЕРЖАНИЮ SO₂ ГАЗОВ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Клышбекова Ж.Е., Досмухамедов Н.К.

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Алматы, e-mail: nurdos@bk.ru

Аннотация. Утилизация отходящих газов на предприятиях цветной металлургии проводится с использованием старых технологий, направленных на получение серной кислоты. Такие технологии оправдывают себя при дальнейшем использовании «крепких» газов, с высоким содержанием SO₂, таких как газы автогенных процессов и конвертирования. Переработка бедных газов восстановительных процессов требует значительных материальных затрат и усложняет технологию производства серной кислоты. В настоящей работе рассмотрена возможность использования раздельной утилизации отходящих газов с использованием нового способа химической абсорбции карбонатным расплавом щелочных металлов с дальнейшей регенерацией карбонатно-сульфатного расплава с получением богатых по SO₂ газов, пригодных для производства серной кислоты. На основании металлургических расчетов материального баланса электроплавки сульфидных медных концентратов, применительно к условиям Жезказганского медеплавильного завода (ЖМЗ), показана возможность глубокой очистки бедных по SO₂ газов путем химической их абсорбции карбонатным расплавом щелочных металлов. Установлено, что при использовании данной технологии до ~97% SO₂ улавливается карбонатным расплавом. Интеграция данного способа для производства серной кислоты, при имеющемся специальном оборудовании и технологической схеме на ЖМЗ, без особых усилий и затрат позволит значительно упростить процесс утилизации бедных по содержанию SO₂ газов и повысить технологико-экономические показатели сернокислотного цеха.

Ключевые слова: электроплавка, материальный баланс, отходящие газы, очистка от SO₂, химическая абсорбция, регенерация, серная кислота

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2023–2025 годы по приоритетному направлению «Геология, добыча и переработка минерального и углеводородного сырья, новые материалы, технологии, безопасные изделия и конструкции» проекта AP19676951: «Разработка ресурсосберегающей, комбинированной технологии комплексной переработки многокомпонентной пыли цветной металлургии с получением товарных продуктов».

TECHNOLOGICAL ASSESSMENT OF THE APPLICATION OF A METHOD FOR CLEANING WASTE GASES WITH CARBONATE MELT OF ALKALI METALS FOR SO₂ POOR GASES OF NON-FERROUS METALLURGY

Klyshbekova Zh.E., Dosmukhamedov N.K.

Satbaev University, Almaty, e-mail: nurdos@bk.ru

Annotation. Disposal of waste gases at non-ferrous metallurgy enterprises is carried out using old technologies aimed at obtaining sulfuric acid. Such technologies justify themselves with the further use of “strong” gases with a high SO₂ content, such as gases of autogenous processes and conversion. The processing of the poor gases of the reduction processes requires significant material costs and complicates the production technology of sulfuric acid. In this paper, the possibility of using separate disposal of waste gases using a new method of chemical absorption by carbonate melt of alkali metals with further regeneration of carbonate-sulfate melt to obtain SO₂-rich gases suitable for the production of sulfuric acid is considered. On the basis of metallurgical calculations of the material balance of electric smelting of sulfide copper concentrates, in relation to the conditions of the Zhezkazgan Copper Smelter (ZHCS), the possibility of deep purification of SO₂-poor gases by chemical absorption by carbonate melt of alkali metals is shown. It was found that when using this technology, up to ~97% of SO₂ is captured by the carbonate melt. The integration of this method for the production of sulfuric acid, with the available special equipment and technological scheme at the ZHCS, without much effort and cost will significantly simplify the process of utilization of gases poor in SO₂ content and increase the technological and economic indicators of the sulfuric acid workshop.

Keywords: electric melting, material balance, waste gases, SO₂ purification, chemical absorption, regeneration, sulfuric acid

The research was carried out within the framework of grant funding from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for 2023–2025 in the priority area “Geology, extraction and processing of mineral and hydrocarbon raw materials, new materials, technologies, safe products and designs” of the project AP19676951: “Development of resource-saving, a combined technology for the integrated processing of multicomponent dust from non-ferrous metallurgy to produce marketable products”.

Анализ современного состояния качества окружающей среды по регионам республики показывает, что наибольшее количество вредных веществ от стационарных источников выбрасывают предприятия цветной металлургии – 29%, второе место занимает теплоэнергетика – 23%, черная металлургия – 17%, нефтегазовая промышленность – 10%, прочие, включая горнодобывающую промышленность – 20%. Из всего количества источников выбросов загрязняющих веществ (152820 ед.) очистными сооружениями оборудовано всего 11590 источников (около 10%).

Критическая ситуация по загрязнению окружающей среды отходящими газами обусловлена в первую очередь повышенным содержанием в них сернистого ангидрида. Существующие методы очистки отходящих газов [1–3] уже не справляются с поставленной задачей. Положение усугубляется и тем, что сильно меняется качество первичного сырья, запускаются новые технологии для переработки техногенного вторичного сырья. В результате увеличиваются объемы отходящих газов с низким содержанием сернистого ангидрида, которые не утилизируются и напрямую выбрасываются в атмосферу. Следует утверждать, что в ближайшее время наступит «коллапс» как в части производства серной кислоты, так и в вопросе очистки отходящих газов от сернистого ангидрида.

К одному из примеров можно отнести производство меди на Жезказганском медеплавильном заводе (ЖМЗ), где в силу низкого содержания сернистого газа электропечей практически снижена производительность сернокислотного производства. Такую картину в настоящее время можно увидеть на многих предприятиях цветной металлургии постсоветского пространства. Особую актуальность решение данного вопроса приобретает на тех предприятиях, где в процессе производства получают отходящие газы с низким содержанием сернистого газа, непригодного для производства серной кислоты. В таких случаях, как отмечалось выше, газы выбрасываются в атмосферу без каких-либо дополнительных мер по их утилизации. Из вышеизложенного следует, что изыскание новых технологий, направленных на очистку отходящих газов от SO_2 , представляет актуальную задачу и требует принятия срочных мер.

Положительные результаты исследований зарубежных ученых [4–6] по очистке газов от SO_2 с использованием расплава, состоящего из эвтектической смеси карбоната калия, натрия и лития показывают перспективность направления. Невысокая

температура эвтектики ($\sim 500^\circ\text{C}$) позволяет практически полностью, до 97%, адсорбировать сернистый ангидрид при пропуске отходящих газов через расплав [7, 8]. Использование данной технологии для очистки отходящих газов бедных по содержанию SO_2 , получаемых при переработке различного вида сырья цветной металлургии, представляет большой интерес и требует совершенствования.

На ЖМЗ отходящие газы после электропечи содержат мало SO_2 (1,5–3%) и после разбавления их с крепкими газами конвертирования направляются на производство серной кислоты. Такая схема производства кислоты сопровождается большими затратами и усложняет общую технологическую схему производства серной кислоты. Температура отходящих газов из электропечи достаточно высока и составляет $\sim 450^\circ\text{C}$. Отходящие газы, выбрасываемые в атмосферу, содержат $\sim 2\%$ SO_2 .

Решение поставленной задачи усугубляется и тем, что в настоящее время завод испытывает определенные трудности со сбытом серной кислоты. Это может вызвать серьезные последствия с точки зрения охраны окружающей среды. Также это нанесет значительный ущерб и здоровью людей.

Цель настоящей работы – на основании металлургических расчетов выявить истинный объем и состав отходящих газов электроплавки сульфидных медных концентратов и провести оценку возможности очистки отходящих газов от SO_2 с использованием способа химической абсорбции серосодержащих компонентов эвтектическим расплавом карбонатов щелочных металлов.

В проведенном исследовании последовательно решены следующие задачи: рассчитан материальный баланс электроплавки сульфидных медных концентратов; изучено распределение металлов и серы между продуктами плавки; определены объемы и состав отходящих газов; определены оптимальные параметры очистки отходящих газов при использовании способа его пропускания через эвтектический расплав карбонатов, необходимые для осуществления глубокой очистки газов от серосодержащих компонентов (SO_2 , SO_3 и др.)

Материалы и методы исследования

Основной использованный в работе методологический принцип – подход к анализу процесса электроплавки сульфидных медных концентратов с определением истинных значений материальных потоков и составов получаемых продуктов. Ключевым ядром исследований является расчет материального и теплового баланса про-

цесса с использованием новой методики, обеспечивающей надежный расчет количественных соотношений формирующихся фаз: шлака, штейна и газовой фазы в зависимости от состава и количества исходных материалов. Технологические расчеты проведены с учетом заводских данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Работа электропечи на ЖМЗ осуществляется от трех трансформаторов, мощностью 17000 кВА каждый. Рабочая мощность печи – до 35 мВт. Производительность печи по твердой шихте – 50 т/ч. При электроплавке используются самообжигающиеся электроды диаметром 1200–1400 мм.

В табл. 1 показан химический состав продуктов, формирующих шихту электроплавки.

Анализ технологических показателей электропечи за месячный период работы печи показал, что получаемые продукты по содержанию основных металлов и шлаковых компонентов варьируют незначительно и сохраняют постоянство. Это свидетельствует о стабильности режима работы печи, что обеспечивает постоянство состава отходящих газов и содержания в них SO_2 .

Содержание серы в получаемых штейнах варьирует в незначительных пределах от 22 до 25%, и они содержат, % (мас.): 38–52 Cu, 9–22 Fe, до 11 Pb, 3,5 Zn и 0,04–0,085 As.

В составе шлака концентрируются, % мас.: до 0,5 Cu, 0,3–1,2 Pb и 0,1–0,13 As. Отличительной особенностью является высокое содержание цинка в шлаке до 10%.

Таблица 1

Химический состав продуктов плавки

Наименование продуктов	Содержание, % мас.							
	Cu	Pb	Zn	Fe	S	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃
Сульфидный медный концентрат	25–32	до 3,2	0,7–21	7–13	14–21	16–26	3,5–9	2,5–4,5
Известняк	–	–	–	0,3–1,5	–	1,7–5,5	50–56	0,2–1,5
Конв. шлак	4–11	2,5–8	3–6	26–33	–	21–28	1,0–4,5	3–4,5

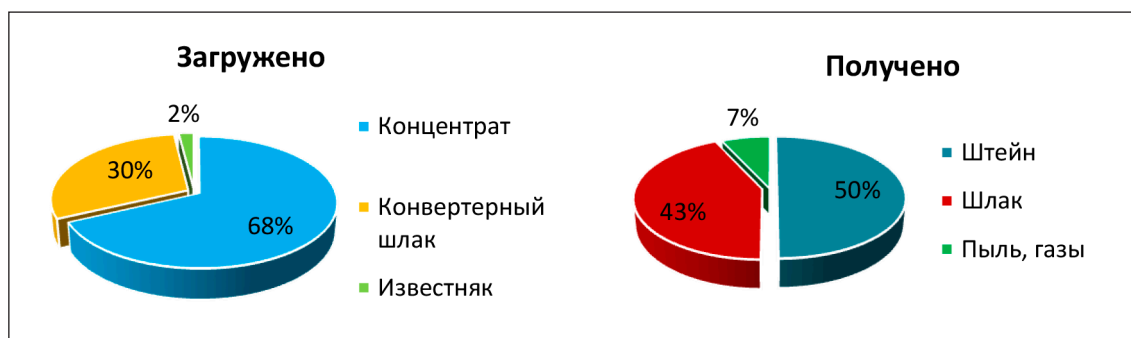


Рис. 1. Материальный баланс потоков электроплавки

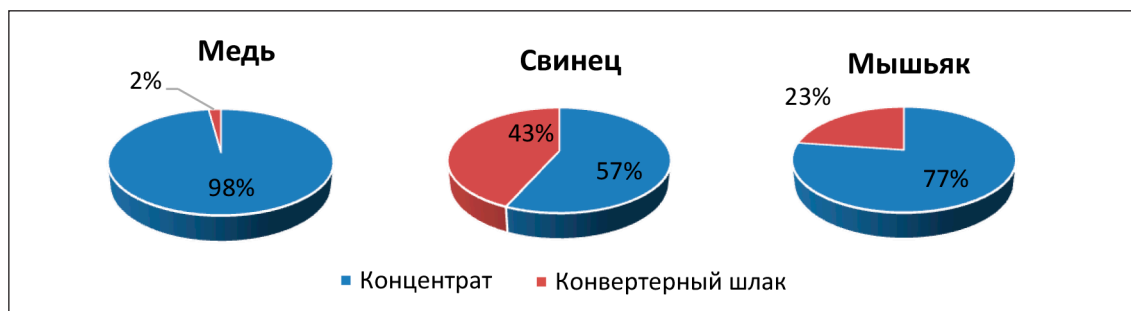


Рис. 2. Распределение металлов между исходными продуктами электроплавки

На основании статистической обработки массива ежесуточных данных химических составов реальных штейнов и шлаков рассчитан материальный баланс потоков и установлено распределение металлов между исходными продуктами электроплавки. Результаты проведенных расчетов показаны на рис. 1, 2.

При электроплавке образуется незначительный выход пылегазовой смеси ~7%.

После очистки от пыли отходящие газы содержат ~2–3% SO₂.

Перевод электропечных газов в трубу осуществляется при достижении температуры газа 178 °С и ниже.

В процессе электроплавки объем газа, выходящего из печи, составляет ~18–25 тыс. нм³/час. Расчетный состав отходящих газов электропечи показан в табл. 2.

Технологические расчеты по очистке газов электропечи от SO₂ с использованием карбонатной эвтектики

Исходные данные для расчета (табл. 3) выбраны исходя из теоретических основ процесса абсорбции сернистого ангидрида из отходящих газов.

Результаты материального баланса химической абсорбции отходящих газов карбонатным расплавом приведены в табл. 4.

Необходимое количество карбонатной эвтектики для максимального улавливания SO₂ из отходящих газов составляет ~138 т. При осуществлении процесса очистки газов содержание SO₂ в отходящих газах снижается с 2,1 до 0,02%. Извлечение серы в кар-

бонатный расплав – 97%. Отходящие газы, полученные после очистки от SO₂, выбрасываются в атмосферу. Установленное значение серы в газах полностью удовлетворяет международным нормам, предъявляемым к глубокой очистке отходящих газов.

Таблица 2

Состав отходящих газов электропечи

Наименование	Состав отходящих газов, % (об.)
SO ₂	2,18
CO ₂	4,59
H ₂ O	1,74
O ₂	20,33
N ₂	71,16

Таблица 3

Исходные данные, использованные для расчета

Наименование	Показатели
Температура отходящих газов, °С	400
Состав расплава щелочных металлов, %:	
Li ₂ CO ₃	43,5
Na ₂ CO ₃	31,5
K ₂ CO ₃	25
α	1

Таблица 4

Материальный баланс процесса химической абсорбции газов электропечи карбонатным расплавом щелочных металлов

Загружено	т	%	Получено	т	%
Отходящие газы, в том числе:	100	72,4	Газы после абсорбции, в том числе:	98,83	71,6
SO ₂	2,1		SO ₂	0,02	
CO ₂	4,5		CO ₂	4,5	
H ₂ O	1,7		H ₂ O	1,7	
O ₂	20,3		O ₂	21,3	
N ₂	71,1		N ₂	71,1	
Карбонатный расплав, в том числе:	37,9	27,5	Карбонатно-сульфатный расплав, в том числе:	39,1	28,3
Li ₂ CO ₃	16,5		K ₂ SO ₄	5,8	
Na ₂ CO ₃	11,9		Li ₂ CO ₃	17,2	
K ₂ CO ₃	9,4		Na ₂ CO ₃	16,0	
Всего	137,9	100	Всего	137,9	100

Таким образом, проведенные расчеты показывают возможность глубокой очистки отходящих газов электропечи от сернистого ангидрида. Применение технологии позволит существенно оздоровить экологическую обстановку региона, создать благоприятные условия для работы сернокислотного производства завода за счет вывода газов электропечи на самостоятельную утилизацию. Это позволит не разбавлять получаемые после электроплавки бедные по содержанию SO_2 газы с «крепкими» газами конвертерного передела, что обеспечит более стабильный технологический режим сернокислотного цеха и высокую его производительность по выпуску серной кислоты.

Рассмотренная в работе технология очистки отходящих газов электропечи не требует больших затрат на приобретение специального оборудования, которое вполне может быть изготовлено силами предприятия. Расходы реагентов, как показывают расчеты, незначительные, а их низкая стоимость (стоимость карбонатов ~30000 \$ США за тонну) не повысит существенно затраты предприятия.

С технологической точки зрения отметим, что высокие температуры отходящих газов электропечи (~700°C) могут быть использованы в качестве топлива для поддержания эвтектической температуры карбонатного расплава. Это намного снизит материальные затраты при очистке отходящих газов от SO_2 .

Предложенное в настоящей работе решение по очистке отходящих газов электропечи от SO_2 , при имеющемся на ЖМЗ специальном оборудовании для производства серной кислоты, легко может быть интегрировано в действующую технологическую схему, что положительно повлияет на улуч-

шение окружающей среды в регионе и здоровья населения.

Заключение

На основании полученных результатов показана возможность глубокой очистки бедных по SO_2 газов, применительно к условиям Жезказганского медеплавильного завода, путем химической их абсорбции карбонатным расплавом щелочных металлов. Установлено, что при использовании данной технологии до ~97% SO_2 улавливается карбонатным расплавом.

Список литературы

1. Путилов В.Я. Экология энергетики. М.: МЭИ, 2003. 715 с.
2. Tikhonov V.A., Slabodenyuk I.V., Zolkin A.L., Chistyakov M.S. Physico-chemical features of the process of cleaning of chloride-containing exhaust gases of metallurgical productions // Bulletin of higher educational institutions North Caucasus region Technical sciences. 2021. № 3 (211). P. 54–59.
3. Zolkin A.L., Kolesnikov A.S., Bityutskiy A., Saradzheva O.V., Stepina I.V. Study of the efficiency of gas purification systems for metallurgical productions // Journal of Physics Conference Series. 2022. № 2388 (1). P. 012139. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012139.
4. Lyubomirsky I., Kaplan V. Apparatus and Method for Removing Sulfur Dioxide from Flue Gases. US Patent. 2014. No. 8852540.
5. Kaplan V., Wachtel E., Lubomirsky I. Carbonate melt regeneration for efficient capture of SO_2 from coal combustion // The Royal Society of Chemistry Advances. 2013. Vol. 3, No. 36. P. 15842–15849.
6. Kaplan V., Wachtel E., Dosmukhamedov N., Lubomirsky I. Carbonate melt-based flue gas desulphurisation: Material balance and economic advantage // International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. 2018. Vol. 18, Is. 1–2. P. 25–38. DOI: 10.1504/IJOGCT.2018.091528.
7. Lee J., Ahn Y., Cho H., Kim J. Economic performance assessment of elemental sulfur recovery with carbonate melt desulfurization process // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 158. P. 123–133.
8. Dosmukhamedov N., Kaplan V. Flue gas purification from SO_2 and NO_x using molten mixture of alkali metal carbonates // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2021. DOI: 10.1080/19392699.2021.1931147.

УДК 621.18

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЛОАГРЕГАТОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА НА НЕПРОЕКТНЫХ УГЛЯХ

Хвостиков А.С., Агарков О.В.

*ГОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»,
Комсомольск-на-Амуре, e-mail: knastu@list.ru*

Аннотация. В настоящее время на электростанции и котельные Дальнего Востока поставляется уголь Переясловского, Ургальского и Тугнуйского месторождений. По результатам опытного сжигания можно сделать следующие выводы. Непроектные бурые угли Переясловского и Ургальского угольных разрезов имеют склонность к самовозгоранию на штабеле топлива угольного склада и в бункерах сырого угля котлов. Непроектный бурый уголь Переясловского угольного разреза не рекомендуется сжигать в чистом виде ввиду интенсивного заноса мокрых золоуловителей твердыми отложениями сульфита кальция, по причине высокого содержания оксида кальция в золе топлива. Непроектный Тугнуйский и Ургальский каменный уголь возможно сжигать в чистом виде в котлах с низкой экономичностью их работы ввиду высоких потерь с механическим недожогом. По уточненным параметрам энергетической эффективности работы котла был выполнен тепловой расчет парового котла. Расчет и материалы опытного сжигания показывают, что при общем снижении расхода топлива общая экономичность КПД брутто снижается, повышаются температуры горения, что не дает возможности при данной конструкции котельного агрегата полноценно использовать котельные агрегаты. Недостаток работы котельного агрегата связан с высоким коэффициентом механического недожога. Работа на непроектных топливах снижает эффективность работы котельного агрегата из-за возникающего механического недожога.

Ключевые слова: непроектный каменный уголь, опытное сжигание, экономичность, потери с механическим недожогом, котельный агрегат

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE BOILERS OF THE FAR EAST ON NON-PROJECT COALS

Khvostikov A.S., Agarkov O.V.

Stavropol state university, Stavropol, e-mail: eha007@bk.ru

Annotation. Currently, coal from the Pereyaslovsky, Urgalsky and Tugnuysky fields is supplied to power plants and boiler houses in the Far East. Based on the results of experimental combustion, the following conclusions can be drawn. Non-project brown coals from the Pereyaslovsky and Urgalsky coal mines tend to self-ignite on the fuel stack of the coal warehouse and in the bunkers of raw coal boilers. Non-project brown coal from the Pereyaslovsky coal mine is not recommended to be burned in its pure form due to the intensive drift of wet ash collectors by solid deposits of calcium sulfite, due to the high content of calcium oxide in the ash of the fuel. Non-project Tugnui and Urgali coal can be burned in pure form in boilers with low efficiency of their operation, due to high losses with mechanical underburning. According to the specified parameters of the energy efficiency of the boiler, the thermal calculation of the steam boiler was performed. The calculation and materials of experimental combustion show that with a general decrease in fuel consumption, the overall efficiency of gross efficiency decreases, gorenje temperatures increase, which makes it impossible for this design of the boiler unit to fully use boiler units. The lack of operation of the boiler unit is associated with a high coefficient of mechanical underburning. Working on non-project fuels reduces the efficiency of the boiler unit due to the resulting mechanical underburning.

Keywords: non-project coal, pilot combustion, efficiency, losses with mechanical underburning, boiler unit

В энергетике России в последнее время изменилась политика обеспечения топливом электрических станций. Во-первых, интенсивно растет доля использования угля в топливном балансе электрических станций. При этом использование проектного топлива для отдела закупок электростанции не является приоритетом. Топливо для питания энергетических котлов используется по принципу минимальной цены закупок с учетом доставки. Показатели эффективности, экономичности и надежности работы котельных установок снижаются в зависимости от того, на-

сколько сильно отличаются характеристики проектного топлива от используемого.

Первоначально основным топливом, поставляемым на Дальний Восток, был уголь Райчихинского месторождения, расположенного в Амурской области. В настоящее время на электростанции и котельные поставляется уголь Переясловского, Ургальского и Тугнуйского месторождений. Даже новые введенные электростанции Дальнего Востока, рассчитанные на уголь Ургальского месторождения [1], вынуждены работать на различных углях.

Таблица 1

Характеристики углей, поставляемых на дальневосточные электростанции

Показатели	Райчихинский	Ургальский	Переясловский	Тугнуйский
Низшая теплота сгорания, ккал/кг	3070	4700	4180	5650
Влажность рабочая, %	37	9,0	30	9,1
Зольность на рабочую массу, %	9,5	32,2	9,1	14,4
Содержание летучих, %	43	42	48	45,7
Углерод, %	37,8	46,6	46	53,7
Водород, %	2,3	3,4	3,15	3,8
Кислород, %	12,7	7,7	12,9	10,6
Азот, %	0,5	0,8	0,6	1,04
Сера, %	0,2	0,4	0,39	0,44
Температурная характеристика золы:				
начало деформации, °С	1050	1200	1150	1200
размягчение, °С	1150	1500	1210	1400
жидкоплавленное состояние, °С	1160	1500	1230	1500

Проведя анализ характеристик поставляемых углей (табл. 1), можно выявить, что поставляемые угли Переясловского, Ургальского и Тугнуйского месторождений имеют большую теплотворную способность по сравнению с проектным углем Райчихинского месторождения.

Основными условиями замещения проектного топлива непроектным является обеспечение надёжной, эффективной и экологически безопасной работы котельной установки с номинальными параметрами пара в рабочем диапазоне нагрузок при минимальной модернизации котла.

Целью работы является определение возможности использования на электрических станциях каменного угля, поставляе-

мого в настоящее время на электрические станции и котельные Дальнего Востока из Переясловского, Ургальского и Тугнуйского месторождений. Для выяснения возможности замены проектного топлива Райчихинского месторождения непроектными топливами проведен анализ опытного сжигания и выполнен нормативный поверочный расчет парового котла.

Материалы и методы исследования

Компоновка котла – П-образная. Расположение топki – восходящий газоход. В горизонтальном газоходе находится пароперегреватель. В нисходящем газоходе расположены воздухоподогреватель и водяной экономайзер.

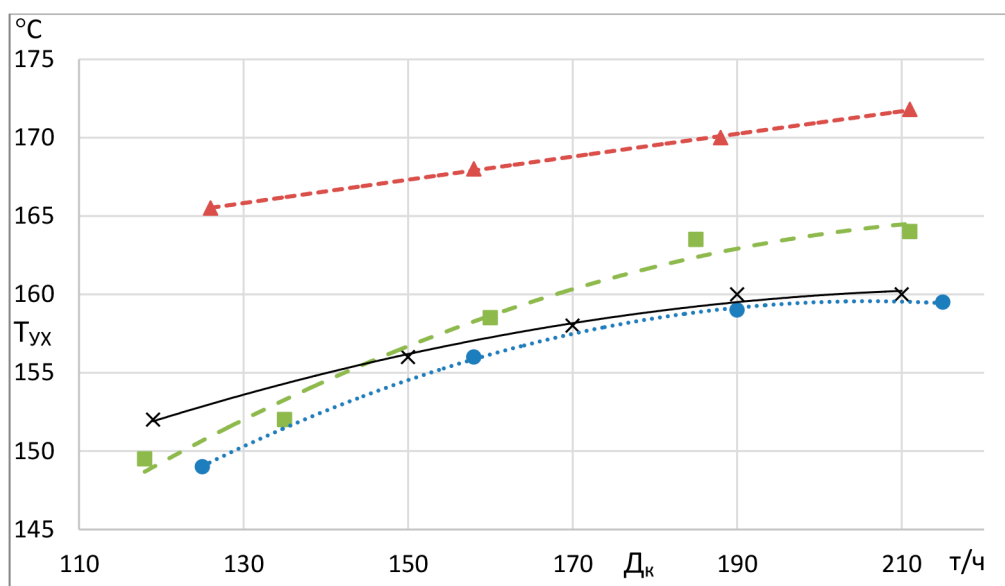


Рис. 1. Температура уходящих газов в диапазоне паровой нагрузки:

●●● Переясловский, ---▲--- Ургальский, ---■--- Тугнуйский, -x- нормативные ограничения

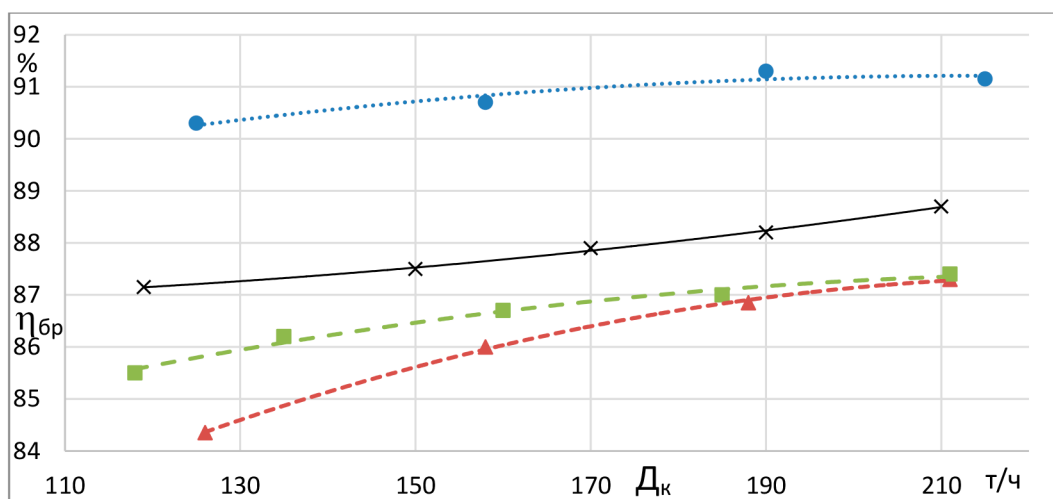
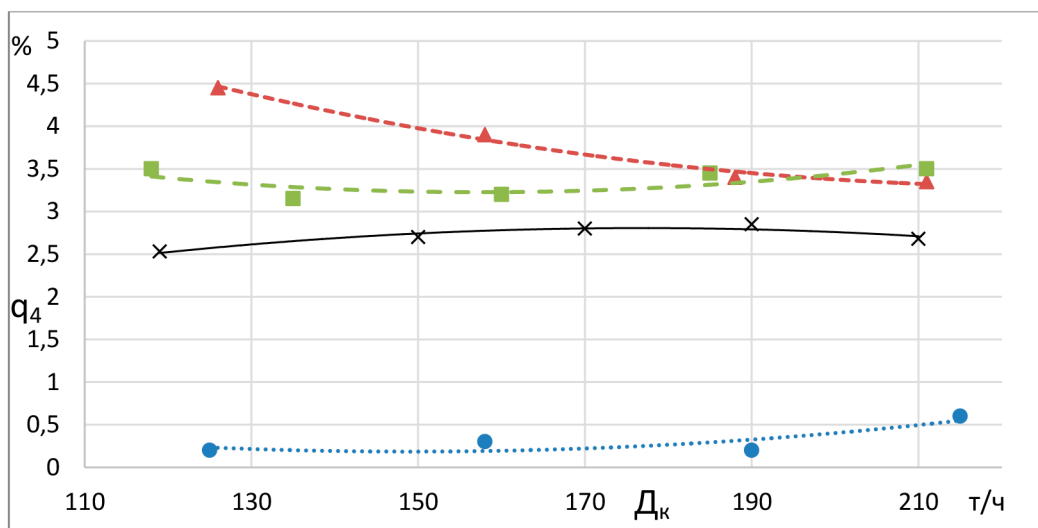
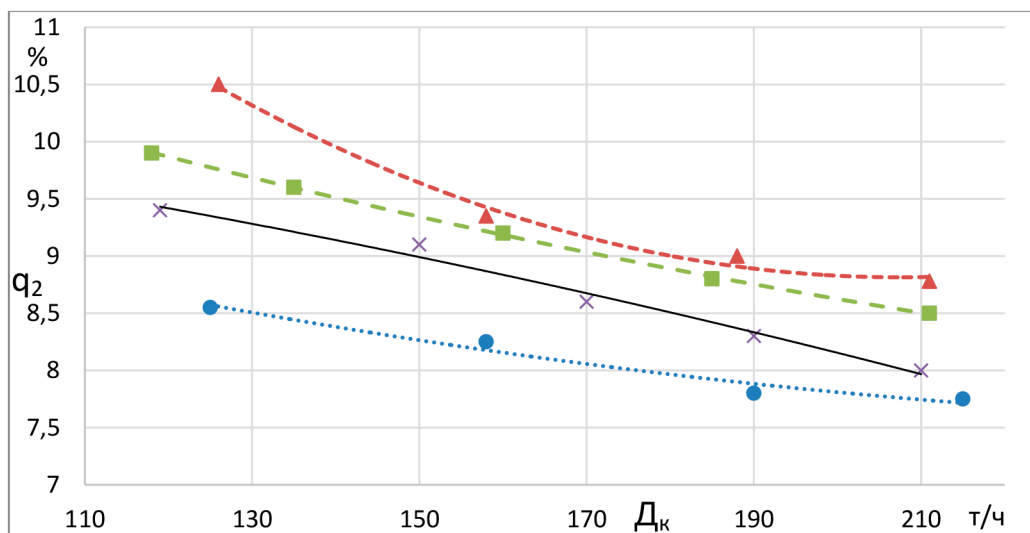


Рис. 2. Энергетические потери тепла в диапазоне паровой нагрузки:
 ●●● Переясловский, ---▲--- Ургальский, ---■--- Тугуньский, -x- нормативные ограничения

Котёл вертикально-водотрубный, одно-барабанный, радиационного типа, с естественной циркуляцией, П-образной компоновки, крупноблочной конструкции. Водяной объём котла составляет 64 м³, паровой объём – 34 м³. Топка расположена в первом восходящем газоходе.

Во втором нисходящем газоходе установлены водяной экономайзер и воздухоподогреватель, которые расположены в расщелку. В верхнем горизонтальном газоходе расположен пароперегреватель.

Перед принятием решения о возможности использования в работе непроектного топлива выполняют испытания с опытным

сжиганием. Во время испытаний появляется возможность проверить принятые решения, разработать мероприятия, улучшающие экономичность и надёжность работы оборудования, выявить дефекты в устройстве отдельных узлов, выбрать наиболее эффективные режимы эксплуатации котлоагрегатов [2]. На рисунке 1 показана зависимость температуры уходящих газов от паровой нагрузки котла.

В результате исследований по температуре уходящих газов рассчитываются потери тепла в котельном агрегате (рис. 2).

Потери тепла с уходящими газами рассчитываются по формуле:

$$q_2 = (K \times \alpha_{yx} + C) \times (v_{yx} - \alpha_{yx} \times t_{xb} / (\alpha_{yx} + b)) \times A_t \times (1 - 0.01 \times q_4) \times 10^{-2} \times K_Q, \%$$

где K, C и b – коэффициенты, зависящие от сорта и приведенной влажности топлива;

α_{yx} – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах;

v_{yx} – температура уходящих газов, °C;

t_{xb} – температура холодного воздуха, °C;

$A_t = 1 + 0.013 \times (v_{yx} - 150) / 100$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние температуры на теплоёмкость продуктов сгорания;

K_Q – коэффициент, учитывающий тепло, внесенное в топку с подогретым вне котла топливом.

Потери тепла от механического недожога определяются по формуле [3]:

$$q_4 = (0,95 \times \frac{\Gamma_{ун}}{100 - \Gamma_{ун}} + 0,05 \times \frac{\Gamma_{шл}}{100 - \Gamma_{шл}}) \times \frac{7830 \times A^P}{Q_n^P}, \%$$

где $\Gamma_{ун}$, $\Gamma_{шл}$ – содержание горючих в уносе, шлаке, %.

Тепловой и конструктивный расчет выполняется для определения эффективности работы котлоагрегата на различных видах топлива по методике, изложенной в [4]. В расчете определяют параметры горения топлива, воздуха и продуктов сгорания в различных элементах котла. Водопаровой тракт представлен следующими элементами: экономайзер первой ступени – экономайзер второй ступени – экранные трубы – потолочный пароперегреватель – холодный пакет – ширмовый пароперегреватель – конвективный пароперегреватель. Воздушно-газовый тракт: воздухоподогреватель первой ступени – воздухоподогреватель второй ступени – топка – ширмовый пароперегреватель – фестон – конвективный пароперегреватель – холодный пакет – экономайзер второй ступени – воздухоподогреватель второй ступени – экономайзер первой ступени – воздухоподогреватель первой ступени.

Результаты исследования и их обсуждение

Непроектный бурый уголь Переясловского угольного разреза имеет склонность к самовозгоранию на штабеле топлива

угольного склада и в бункерах сырого угля котлов. Отмечен интенсивный занос мокрых золоуловителей твердыми отложениями сульфата кальция. Продолжительность работы котла при сжигании Переясловского угля составляет не более 14 суток. При увеличении расхода воды продолжительность работы котла увеличивается до 20 суток. Однако при увеличении расхода воды на орошение скрубберов снижается температура дымовых газов ниже сернистой точки росы. Отключение воды на форсунки Вентури не увеличивает продолжительности работы котлоагрегатов и объясняется тем, что зона активных отложений смещается в нижнюю часть каплеуловителя и приводит к забитию входного сечения и гидрозатвора скруббера. Непроектный бурый уголь Переясловского угольного разреза не рекомендуется сжигать в чистом виде ввиду интенсивного заноса мокрых золоуловителей твердыми отложениями сульфата кальция, по причине высокого содержания оксида кальция в золе топлива.

При существующей схеме пылеприготовления с транспортировкой горячим воздухом угольной пыли высокорекреакционного

Тугнуйского каменного угля от мельницы к горелке, при определённых условиях (низкая влажность топлива и повышенная температура сушильного агента) существует высокая вероятность воспламенения аэросмеси в шахте гравитационного сепаратора до выхода пыли из устья горелки. При этом шахта сепаратора может раскалиться докрасна, что вызывает необратимые негативные изменения свойств металла шахты, а также риск её повреждения из-за температурной деформации. Повышение температуры обслуживаемых материалов связано с опасностью выхода оборудования из строя [5]. Присосы холодного воздуха в газовый тракт котла, приведенные к номинальной тепловой нагрузке, составили: в топку и пароперегреватель – 15% (норма – 8%); в конвективную шахту – 16% (норма – 10%); в ЗУУ и дымососы – 11% (норма ПТЭ – 5%). Непроектный Тугнуйский каменный уголь возможно сжигать в чистом виде в котлах с низкой экономичностью их работы, ввиду высоких потерь с мехнедожогом.

При испытаниях работы котлоагрегата присосы холодного воздуха, приведенные к номинальной паропроизводительности, превышают нормативные значения и составляют: в топку и пароперегреватель – 18% (норма ПТЭ – 8%); в конвективную шахту – 15% (норма ПТЭ – 10%); в ЗУУ и дымососы – 13% (норма ПТЭ – 5%). Высокое содержание горючих веществ в шлаке и уносе обусловлено низкой эффективностью орга-

низации подготовки аэросмеси каменного угля в существующих пылесистемах и её дальнейшего сжигания в горелках. Непроектный Ургальский каменный уголь возможно сжигать в чистом виде в котлах с низкой экономичностью их работы, ввиду высоких потерь с мехнедожогом.

По уточненным параметрам энергетической эффективности работы котла был выполнен тепловой расчет парового котла. Основные результаты расчета представлены в таблице 1. Расчет и материалы опытного сжигания показывают, что при общем снижении расхода топлива общая экономичность КПД брутто снижается, повышаются температуры горения, что не дает возможности при данной конструкции котельного агрегата полноценно использовать котельные агрегаты. Недостаток работы котельного агрегата связан с высоким коэффициентом механического недожога. Борьба с механическим недожогом возможна с помощью регулировки системы подачи угля, описанной в [6].

Для безопасного сжигания угля Переясловского и Тугнуйского месторождений необходимо организовать безопасную подготовку топлива к сжиганию с помощью сушки уходящими газами.

Наиболее сложный в обеспечении безопасного сжигания – непроективный бурый уголь Переясловского угольного разреза из-за высокого содержания сульфата кальция, вследствие чего наблюдается занос золоуловителей и постепенное забивание системы гидрозолоудаления.

Таблица 2

Результаты расчета работы котельных агрегатов на непроективных топливах

Параметр	Размерность	Обозначение	Райчинский	Переясловский	Ургальский	Тугнуйский
Теоретический объем воздуха для полного сгорания	м ³ /кг	V ⁰	3,56	3,74	4,80	4,9
КПД брутто	%	η _к	92	91,44	87,22	87,3
Расчетный часовой расход топлива	В	кг/ч	44600	37914	31368	22560
Температура газов на выходе						
из топки	°С	v _т ^{''}	1118	1092	1169	1185
-* - за 2-й ст. п/перегревателя	°С		1047	1085	1101	1103
-* - за фестонными трубами	°С		1037	960	955	1035
-* - за 3-й ст. п/перегревателя	°С		822	857	782	833
-* - на входе в 4-ю ст. п/перегревателя	°С		754	762	748	786
-* - за п/перегревателем	°С		678	695	685	725
за 2-й ст. водяного экономайзера	°С		461	455	423	480
за 2-й ст. воздухоподогревателя	°С		370	380	349	411
за 1-й ст. водяного экономайзера	°С		284	280	310	325
за 1-й ст. воздухоподогревателя	°С		146	140	165	155

Для безопасной работы котла необходимо осуществить переход к сухому золоудалению, что требует значительной модернизации электростанций. Возможность работы на данном непроектном угле при минимальных вложениях осуществима только с добавлением его в качестве доли к другим поставляемым топливам.

Заключение

Проведя анализ опытного сжигания непроектных топлив Переясловского, Ургальского и Тугнуйского месторождений, можно сделать вывод о повышении температуры горения из-за более высокой низшей теплоты сгорания топлива. Температура остается более высокой в топке и в пароперегревателе. Работа на непроектных топливах снижает эффективность работы котельного агрегата из-за возникающего механического недожога.

Уголь Переясловского и Тугнуйского месторождений имеет склонность к самовозгоранию, вследствие чего для сжигания угля Переясловского и Тугнуйского месторождений необходимо организовать безопасную подготовку топлива к сжиганию с помощью сушки уходящими газами. Уголь Переясловского месторождения имеет повышенное содержание сульфата кальция, из-за чего наблюдается занос золоуловителей и постепенное забивание системы гидрозолоудаления. Непроектный бурый уголь Переясловского угольного разреза

не рекомендуется сжигать в чистом виде ввиду интенсивного заноса мокрых золоуловителей твердыми отложениями сульфата кальция, по причине высокого содержания оксида кальция в золе топлива.

Список литературы

1. Шаломов В.И. Предварительный анализ эксплуатационных показателей паротурбинных установок новой Советско-Гаванской теплоэлектроцентрали // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 3(67). С. 28-34.
2. Шаломов В.И. Численное исследование эффективности замещающей турбины с повышенной температурой свежего пара для технического перевооружения турбоустановок семейства т-100 // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 5(53). С. 11-18.
3. Шаломов В.И. Оценка эффективности применения повышенных докритических начальных параметров пара для теплофикационного энергоблока мощностью 200-250 МВт // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 5(45). С. 4-11.
4. Леонтьев В.И., Хвостиков А.С. Тепловой расчет барабанного парового котла с естественной циркуляцией: учебное пособие. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2018. 164 с.
5. Андрианов И.К. Построение обобщенного критерия оптимизации конкурирующих параметров тепловой защиты оболочечных элементов в условиях теплового и силового нагружения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 1(49). С. 4-9.
6. Гордин С.А., Гринкруг М.С., Зайченко И.В. К вопросу повышения эффективности систем управления дутьём твердотопливных котлов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 5(45). С. 25-30.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 664.3

ВЛИЯНИЕ ВАЛОРИЗОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ И ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПИЩЕВУЮ ЦЕННОСТЬ И УСВОЯЕМОСТЬ. ОБЗОР ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ

Бурак Л.Ч., Карбанович В.И.

ООО «БЕЛПРОСАКВА», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com, info@belrosakva.by

Аннотация. Влияние фенольных соединений растительного происхождения на пищевую ценность продуктов в последние десятилетия вызывает повышенный интерес со стороны как потребителей, так и научного сообщества. Цель статьи – обзор результатов научных исследований извлечения растительных белков и фенольных соединений из отходов растительного сырья с целью устойчивого развития, ресурсосбережения и создания продуктов с высокой пищевой ценностью. В качестве материалов исследования послужили научные статьи, опубликованные в период с 2015 по 2024 гг. Научный поиск провели в научных базах данных PubMed, Scopus и Web of Science. Поиск проводился с применением дескрипторов: «фенолы, фенольные соединения», «извлечение», «усвояемость», «белки», «углеводы», «пищевая ценность», «биодоступность». Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 48 исследований. Критический обзор результатов научных исследований показал, что последние тенденции в валоризации пищевых продуктов из отходов подчеркивают возможность использования соединений, полученных из побочных продуктов жизнедеятельности, во время переработки и производства, для создания новых продуктов питания с высокой пищевой ценностью и благотворно влияющих на организм. Валоризация растительной пищи для получения фенольных соединений включает в себя оптимизацию методов экстракции, максимальное использование побочных продуктов растительного происхождения и изучение различных способов применения в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности. Дальнейшие научные исследования должны быть сосредоточены на оптимизации методов извлечения фенольных соединений, белков и других функциональных ингредиентов из отходов пищевой промышленности с целью максимального применения, обеспечивая ресурсосбережение и дальнейшее устойчивое развитие. Данный обзор может быть использован в качестве материала для дальнейших исследований по извлечению фенольных соединений и их применению в создании функциональных продуктов.

Ключевые слова: валоризация, овощи, фрукты, отходы, фенольные соединения, растительные белки, усвояемость, пищевая ценность, устойчивое развитие

INFLUENCE OF VALORIZED PLANT PROTEINS AND PHENOLIC COMPOUNDS ON NUTRITIONAL VALUE AND DIGESTIBILITY. REVIEW OF RECENT ADVANCES

Burak L.Ch., Karbanovich V.I.

BELROSAKVA Limited Liability Company, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com, info@belrosakva.by

Annotation. The influence of plant phenolic compounds on the nutritional value of foods has attracted increased interest from both consumers and the scientific community over the past decade. The purpose of the article is to review the results of scientific research on the extraction of plant proteins and phenolic compounds from waste plant materials, with the aim of sustainable development, resource conservation and the creation of products with high nutritional value. The research materials were scientific articles published between 2015 and 2024. A scientific search was conducted in scientific databases PubMed, Scopus and Web of Science. The search was carried out using the following descriptors: «phenols, phenolic compounds», «extraction», «digestibility», «proteins», «carbohydrates», «nutritional value», «bioavailability». Among the articles meeting the inclusion criteria, 48 studies were selected for this review. A critical review of scientific research has shown that recent trends in waste-to-food valorization highlight the potential for using compounds derived from waste by-products during processing and production to create new food products with high nutritional value and beneficial effects on the body. Valorization of plant foods for phenolic compounds involves optimizing extraction methods, maximizing the use of plant by-products, and exploring various applications in the food, pharmaceutical, and cosmetic industries. Further research should focus on optimizing methods for extracting phenolic compounds, proteins and other functional ingredients from food processing waste, with the aim of maximizing utilization, ensuring resource conservation and further sustainable development. This review can be used as material for further research on the extraction of phenolic compounds and their use in the creation of functional products.

Keywords: valorization, vegetables, fruits, waste, phenolic compounds, vegetable proteins, digestibility, nutritional value, sustainable development

В последние десятилетия внимание научного сообщества, потребителей и производителей направлено на важнейшие вопросы устойчивости в сельском хозяйстве

и продовольственных системах. Результаты многочисленных научных публикаций показывают значительные потери продуктов питания по всей цепочке поставок пищевой

промышленности и за ее пределами. Последние тенденции в валоризации пищевых продуктов из отходов подчеркивают возможность использования соединений, полученных из побочных продуктов жизнедеятельности, во время переработки и производства, с целью создания новых продуктов с высокой пищевой ценностью и оказывающих благотворное влияние на здоровье человека. Говоря о больших потерях пищевых продуктов в гостиничном и потребительском секторах, необходимо отметить глобальную парадигму как избытка продуктов питания, так и многочисленного количества отходов в пищевой промышленности, что оказывает значительное негативное влияние на экологию, связанное с устойчивым развитием, а также на безопасность продуктов питания для потребителя [1]. Образование большого количества пищевых отходов провоцирует экологические и социальные проблемы, такие как проблемы социальной структуры, чрезмерная эксплуатация земель, экономические проблемы, а также проблемы продовольственной безопасности, парниковый эффект и неравномерное глобальное распределение продовольствия. Существует острая необходимость в разработке глобального соглашения о стратегиях, обеспечивающих устойчивость в пищевой промышленности, для определения национальных и региональных проблем продовольственной безопасности [2]. Следует отметить работу ученых Martindale и соавторов, которые в своем последнем обзоре возможных решений расширили это требование, которое нужно соблюдать для повышения устойчивости и достижения целей устойчивого развития. К активным действиям перед лицом глобальных кризисов, связанных с изменением климата, призывают авторы Jagar et al. в своем недавнем сборнике научных статей, посвященном продовольственной безопасности и устойчивости [3, 4]. Потенциальная возможность заключается в извлечении биологически активного материала из отходов и путем тщательного отбора компонентов – использовании этих восстановленных продуктов для повышения пищевой ценности пищевых продуктов и удовлетворения растущего спроса на такие продукты со стороны потребителя [5]. Как отмечают многие исследователи, существует потенциал в извлечении активных ингредиентов из потоков отходов при производстве продуктов питания, например в производстве продуктов переработки плодоовощного сырья [6–9]. Это обусловило цель статьи – обзор результатов научных исследований извлечения растительных белков и фенольных соединений

из отходов растительного сырья с целью устойчивого развития, ресурсосбережения и создания продуктов с высокой пищевой ценностью

Материалы и методы исследования

В качестве материалов исследования послужили научные статьи, опубликованные в период с 2015 по 2024 гг. Научный поиск провели в научных базах данных PubMed, Scopus и Web of Science. Поиск проводился с применением дескрипторов: «фенолы, фенольные соединения», «извлечение», «усвояемость», «белки», «углеводы», «пищевая ценность», «биодоступность». Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 48 исследований.

Критерии включения:

1) Статья написана в период 2015–2024 гг.

2) Статья соответствует теме исследования.

3) Типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, материалы конференций, краткие отчеты.

Критерии исключения:

1) Статья не соответствует теме данного обзора: извлечения растительных белков и фенольных соединений из отходов растительного сырья, ресурсосбережения и создания продуктов с высокой пищевой ценностью.

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

Валоризация растительной пищи для получения фенольных соединений включает в себя оптимизацию методов экстракции, максимальное использование побочных продуктов растительного происхождения и изучение различных вариантов применения в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности. Нет сомнения в том, что инновации в методах экстракции, способах устойчивого развития и изучение новых источников фенольных соединений будут стимулировать будущие достижения в этой области. Существует необходимость в решении проблем, связанных со стоимостью, масштабируемостью и безопасностью, что будет способствовать широкому использованию фенольных соединений, полученных из растительных источников, их применению в различных отраслях про-

мышленности и продвижению устойчивых практик в сельском хозяйстве и производстве продуктов питания.

В последнее время извлечение этих веществ из многочисленных отходов в основном сосредоточено на возможности извлекать фенольные соединения из отходов кофе, а также овощных и фруктовых выжимок [10–12]. Эти выжимки также являются богатым источником фитохимических веществ и соединений пищевых волокон, использование которых благотворно влияет на здоровье [13, 14]. Разработка инновационных систем доставки для повышения стабильности и биодоступности фенольных соединений и волокон в различных областях применения в пищевой промышленности потребует понимания их функциональности, а также их роли в изменении физиологического пищевого статуса людей. Многие полезные свойства биологически активных ингредиентов с точки зрения здоровья и питательности обусловлены связью между фенольными соединениями и белками. Связь между вторичными метаболитами в растениях, обладающими разнообразной химической структурой, антиоксидантными и биологически активными свойствами, и белками основана на понимании структуры и функциональных взаимосвязей этих соединений. Так, например, Zhang et al. показали значение роли пищевых белково-фенольных взаимодействий в изменении молекулярных конфигураций биологически активных ингредиентов и, следовательно, их опосредующего влияния на питание и благополучие с клеточной точки зрения. Часть этих процессов связана как с ковалентной, так и с нековалентной связью между биологически активными ингредиентами и функциональными макромолекулами в пищевых продуктах [15]. Примером этого также являются интенсивные исследования роли пищевых волокон в укреплении здоровья потребителей в возможностях управления усвояемостью углеводов [16–18], а также сделан акцент на роли данных соединений в изменении ферментативного поведения микробиоты кишечника [19]. Связывание фенольных соединений с белковыми компонентами может влиять на усвояемость белков и, следовательно, на их доступность с точки зрения клеточного поглощения. Фенольные соединения также могут воздействовать на переваривание белка, ингибируя протеолитические ферменты (например, трипсин и пепсин), которые играют важную роль в изменении расщепления белка в пищеварительной системе. Некоторые фенольные соединения вместе с белками могут служить пребиотиками, способ-

ствуя росту полезных кишечных бактерий и улучшая здоровье кишечника. Установлено, что катехины, антоцианы и проантоцианидины обладают выраженным пребиотическим действием [20]. Исследователи показали, что фенольные соединения во время ферментации увеличивают количество *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Akkermansia*, *Roseburia* и *Faecalibacterium spp.*, что, в свою очередь, приводит к увеличению производства и высвобождению вторичных метаболитов, таких как короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК), включая бутират. С этим наблюдением связано исследование, которое достоверно показывает потенциал фенольных соединений в регулировании кардиометаболических заболеваний, а также в снижении частоты воспаления [21, 22]. Как уже отмечалось ранее, влияние фенольных соединений на усвояемость компонентов пищи было изучено на молекулярной основе, также определено, что эти процессы связаны с интерференцией фенольных соединений на расщепляющие ферменты во время пищеварения [23, 24].

Установлено, что фенольные соединения из жмыха черной смородины могут быть включены в пасты, богатые углеводами, и влиять на усвояемость этих паст, управляя активностью в отношении альфа-амилазы и альфа-глюкозидазы. В то же время было показано, что фитохимические вещества черной смородины взаимодействуют с молочными белками, такими как сывороточный белок в печенье, тем самым воздействуя на структуру белковых и фитохимических компонентов, а также изменяя общую усвояемость продуктов. Понимая молекулярные взаимодействия между фенольными соединениями и белками и углеводами, исследователи смогли смоделировать меж- и внутримолекулярные взаимодействия, которые являются мощным ресурсом для определения стратегий управления усвояемостью и ферментируемостью биологически активных соединений из ряда растительных источников [25]. Исследование Нао и соавторов продемонстрировало это при обсуждении роли молекулярной конформации полифенолов в их потенциальной пользе для здоровья, такой как антиоксидантная активность и взаимодействие с метаболитическими ферментами, участвующими в переваривании пищи после приема внутрь [26]. Н. Kaur, Н. Bobade, R. Sharma, S. Sharma оценили влияние фенольных соединений на усвояемость богатых углеводами продуктов, таких как макароны, и то, как различные операции обработки могут также влиять на процесс взаимодействия фенольных соединений, особенно при использо-

вании цельного зерна [27]. Аналогичным образом Chang и соавторы оценили способность фенольных соединений из нетрадиционных злаков (в данном случае проса) регулировать усвояемость пищи и общее восстановление питательных веществ [28]. Данные процессы, в сущности, основаны на предыдущей работе ученых Kataria et al., которые определили взаимосвязь фенольных соединений в теффе, в частности роль термической обработки в изменении антиоксидантных свойств и пищевой ценности продуктов из этих соединений при рассмотрении чувствительности этих материалов к теплу во время обработки [29]. Совсем недавно Huang и соавторы исследовали роль фенольных соединений в сочетании с традиционно рассматриваемыми непищевыми компонентами при исследовании биологической активности опосредованного биосинтеза наночастиц золота на здоровье человека. Это показывает, что положительная роль фенольных соединений может выходить далеко за рамки обычных пищевых взаимодействий [30]. То, как эти фенольные соединения изменяют микробиоту кишечника и ее функциональность, представляет интерес при рассмотрении здоровья кишечника и ферментационного расщепления продуктов [31, 32]. В работе Loo в соавторстве с другими учеными проведена оценка модуляции микробиоты кишечника человека фенольными веществами и продуктами, богатыми фенольной клетчаткой. Один из вопросов, связанных с ролью фенольных соединений, изменяющих популяцию микробиоты во время пищеварения, заключается в том, что фенольные соединения в растениях, как правило, неразрывно связаны с клеточными компонентами фруктов и семян и, следовательно, связаны с пищевыми волокнами. Взаимосвязь этих фенольных соединений с волокнами и белками может придать им некоторые свойства с точки зрения усвояемости и ферментации. Ученые Matsumura и соавторы связали эту функциональность и проиллюстрировали, что, например, фенольные соединения из чая (и их метаболиты) в процессах пищеварения проявляют антибактериальные свойства, которые защищают микробиоту кишечника от патогенных бактерий (*Clostridium perfringens*, *Escherichia coli*, *Salmonella* и *Pseudomonas*) [33]. Такая защита системы микробиоты кишечника может помочь в поддержании и улучшении общего баланса кишечных микробов. Таким образом, катехиновые соединения и их димеры, такие как теафлавины и теазинензины, могут быть полезны для изменения динамической популяции в кишечнике. Аналогичным об-

разом флаван-3-олы в продуктах какао могут оказывать непосредственное влияние на распределение микробиоты кишечника по всему кишечнику, что, в свою очередь, влияет на общее состояние кишечника.

Данные результаты научных исследований, основанные на традиционном использовании растительных ингредиентов, важно учитывать при оценке потенциальных преимуществ обогащенных растительных продуктов пищевой промышленности [34]. Ликопин, который извлекают из отходов при переработке томатов, уже давно ассоциируется с рядом эффективных свойств, способствующих укреплению здоровья. Вместе с тем он может быть восприимчив к термическому разложению, поэтому для его извлечения необходимо использовать процессы нетермической экстракции для извлечения функциональных биологически активных веществ [35, 36].

В последние несколько лет внимание было сосредоточено на определении того, какие пищевые отрасли могут обеспечить наилучшую отдачу от инвестиций с точки зрения валоризации отходов. Особое внимание было обращено к четырем отраслям, а именно: производство соков, маслоперерабатывающая промышленность, винодельческая промышленность и, в более широком смысле, бродильная или ферментативная промышленность, а также отходы, образующиеся на линиях по переработке свежих фруктов и овощей. В связи с этим возник значительный интерес к процессам производства цитрусового сока и восстановлению флавоноидных и волокнистых компонентов [9, 37, 38]. Они используются в различных продуктах питания, таких как экструдированные закуски, хлебобулочные изделия, макаронные изделия и напитки в целях увеличения антиоксидантной способности обработанных пищевых продуктов, а также для роста их влияния на метаболические функции, такие как гликемическое воздействие. При переработке цитрусовых пектин, каротиноиды и другие природные соединения, содержащиеся в кожуре и мякоти, могут быть использованы в функциональных продуктах питания. В последнее время многие исследования сосредоточены на оливковой промышленности и на том, как переработка растительного материала для масла приводит к производству большого количества излишков жмыха и мякоти – богатых источников высокофункциональных биологически активных ингредиентов. Отходы, образующиеся в процессе экстракции оливкового масла, даже если они оказывают негативное воздействие на окружающую среду, содер-

жат несколько биологически активных соединений, которые приносят значительную пользу для здоровья. После соответствующей экстракции и очистки эти соединения можно использовать в качестве пищевых антиоксидантов или в качестве активных ингредиентов в нутрицевтических и косметических продуктах [39]. В прикладном плане следует отметить исследования, связанные с извлечением ингредиентов из отходов производства таких видов, как оливки, зерновые и другие семенные культуры [40–42]. А. Vaiano и А. Fiore продемонстрировали большой потенциал зерна для получения биологически активных ингредиентов, которые могут быть восстановлены после первичной обработки, и объяснили, как, например, дробина может служить богатым источником клетчатки, фенольных соединений и белков при правильном использовании [43]. Пивная дробина является хорошим сырьем для извлечения фенольных соединений либо путем экстракции, либо с помощью новых ультразвуковых или микроволновых технологий. Дробина богата белками, поэтому в этой области также проводились исследования. Экстракция белка была эффективной при использовании гидротермической предварительной обработки (60°C) ферментной протеазой. Экстрагировали полифенолы с помощью ультразвука, а с помощью ферментов в качестве конечного продукта получили белковый гидролизат, в котором преобладали глутаминовая кислота и пролин [44]. Фенольные соединения, содержащиеся в зернах масличных культур, эффективно извлекаются из отходов после прессования масличного масла. Эти соединения, извлеченные из множества отходов, включают изофлавоны, феруловую кислоту, *p*-кумариновую кислоту, хлорогеновую кислоту, кофейную кислоту, сиригеновую кислоту, ванилиновую кислоту, салициловую кислоту, протокатеховую кислоту, антоцианы и связанные с ними полифенольные соединения. Было показано, что все они имеют ценность с точки зрения метаболической функциональности в клеточной функции и, таким образом, представляют собой потенциально важные ценные продукты для питания человека. Уи и соавторы, используя побочные продукты моркови, кормили мышей ферментированной мякотью моркови (оставшейся после производства сока) и измеряли микробные популяции, которые развились после таких вмешательств. Полифенолы и флавоноиды в материале оказывали непосредственное влияние на популяционную динамику микробных сообществ в кишечнике мышей (наблюдалось увеличение *Bacteroidetes*,

Proteobacteria, *Firmicutes*), что повышало эффективность абсорбции и утилизации фенольных соединений [45]. При воздействии антибиотиков ферментированные выжимки, содержащие фенольные соединения, показали устойчивость к микробному восстановлению и сохраняли разнообразный микробиологический баланс. Исследование показало, что фенольные соединения из компонентов ягод усиливают антиоксидантную активность *in vitro* и снижают активные формы кислорода в стимулированных липополисахаридами макрофагах Raw264.7, и это, в свою очередь, можно постулировать как связь с изменениями в микробном сообществе и регуляцией клеточной активности [46]. Проведены многочисленные исследования по оценке эффективности применения экстрактов полифенолов яблока. В этих исследованиях доказано, что различные продукты, такие как хлеб, мясо, рыба, печень и сок, произведенные с добавлением яблочного порошка или яблочного экстракта, улучшили как антиоксидантный статус, так и окислительную стабильность во время хранения [47].

Заключение

С целью создания экономики замкнутого цикла, достижения устойчивого развития и снижения нагрузки на экологию необходимо обеспечить максимальное использование отходов пищевой промышленности. Отходы переработки плодоовощной, бродильной, маслоперерабатывающей и других отраслей являются хорошими источниками биоактивных соединений, которые в большей своей части не извлекаются и не используются. Неправильное обращение с отходами пищевой промышленности приводит к выбросу CO₂, который вызывает парниковый эффект и потребность в энергоёмких и дорогостоящих методах утилизации отходов. Поэтому для извлечения биоактивных компонентов из этих отходов целесообразно использовать экологически чистые и экономичные подходы, современные нетермические и термические технологии. Извлекаемые фенольные и другие биологически активные соединения обладают высокой антиоксидантной активностью и проявляют лечебные и функциональные свойства. Следовательно, эти соединения могут быть использованы в пищевой и фармацевтической промышленности в процессе производства новых продуктов профилактического и функционального назначения. Будущие исследования могут быть сосредоточены на повышении ценности отходов молочной, зерновой, плодоовощной и винодельческой отраслей пищевой промышленности.

Список литературы

1. Huang C.-H., Liu S.-M., Hsu N.-Y. Understanding global food surplus and food waste to tackle economic and environmental sustainability // *Sustainability*. 2020. V. 12. P. 2892. DOI: 10.3390/su12072892.
2. Martindale W., Swainson M., Choudhary S. The impact of resource and nutritional resilience on the global food supply system // *Sustainability*. 2020. V. 12. P. 751. DOI: 10.3390/su12020751.
3. Martindale W., Hollands T. A., Jagtap S., Hebshy E., Duong L. Turn-key research in food processing and manufacturing for reducing the impact of climate change // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 58. P. 5568–5577. DOI: 10.1111/ijfs.16543.
4. Jagtap S., Litos L., Raut R., Gupta S., Grover A. Ensuring food security and sustainability in the face of crises // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 58. P. 5430–5432. DOI: 10.1111/ijfs.16630.
5. Villacis-Chiriboga J., Elst K., Van Camp J., Vera E., Ruales J. Valorization of byproducts from tropical fruits: extraction methodologies, applications, environmental and economic assessment – a Review (Part I: general overview of the byproducts, traditional biorefinery practices and possible applications) // *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2020. V. 19. P. 405–447. DOI: 10.1111/1541-4337.12542.
6. Leichtweis M.G., Oliveira M.B.P.P., Ferreira I.C.F.R., Pereira C., Barros L. Sustainable recovery of preservative and bioactive compounds from food industry bioresidues // *Antioxidants*. 2021. V. 10. P. 1827. DOI: 10.3390/antiox10111827.
7. Bhatkar N.S., Shirkole S.S., Brennan C., Thorat B.N. Pre-processed fruits as raw materials: part I – different forms, process conditions and applications // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2022. V. 57. P. 4945–4962. DOI: 10.1111/ijfs.15891.
8. Bhatkar N.S., Shirkole S.S., Brennan C., Thorat B.N. Pre-processed fruits as raw materials: part II—process conditions, demand and safety aspects // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2022. V. 57. P. 4918–4935. DOI: 10.1111/ijfs.15887.
9. Romano R., De Luca L., Aiello A., Rossi D., Pizzolongo F., Masi P. Bioactive compounds extracted by liquid and supercritical carbon dioxide from citrus peels // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2022. V. 57. P. 3826–3837. DOI: 10.1111/ijfs.15712.
10. Beltrán-Medina E.A., Guatemala-Morales G.M., Padilla-Camberos E., Corona-González R. I., Mondragón-Cortez P.M., Arriola-Guevara E. Evaluation of the use of a coffee industry by-product in a cereal-based extruded food product // *Foods*. 2020. V. 9. P. 1008. DOI: 10.3390/foods9081008.
11. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Биологически активные вещества бузины: свойства, методы извлечения и сохранения // *Пищевые системы*. 2023. Т. 6, № 1. С. 80-94. DOI: 10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94.
12. Бурак Л.Ч. Использование выжимок бузины в пищевой промышленности // *Новые технологии*. 2020. Т. 16, № 5. С. 20-27. DOI: 10.47370/2072-0920-2020-16-5-20-27.
13. Wu G., Hui X., Stipkovits L., Rachman A., Tu J., Brennan M. A., et al. Whey protein-blackcurrant concentrate particles obtained by spray-drying and freeze-drying for delivering structural and health benefits of cookies // *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.* 2021. V. 68. P. 102606. DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102606.
14. Pop C., Suharschi R., Pop O.L. Dietary fiber and prebiotic compounds in fruits and vegetables food waste // *Sustainability*. 2021. V. 13. P. 7219. DOI: 10.3390/su13137219.
15. Zhang Q., Cheng Z., Wang Y., Fu L. Dietary protein-phenolic interactions: characterization, biochemical-physiological consequences, and potential food applications // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2021. V. 61. P. 3589–3615. DOI: 10.1080/10408398.
16. Tu J., Brennan M.A., Hui X., Wang R., Peressini D., Bai W., et al. Utilisation of dried shiitake, black ear and silver ear mushrooms into sorghum biscuits manipulates the predictive glycaemic response in relation to variations in biscuit physical characteristics // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2022. V. 57. P. 2715–2728. DOI: 10.1111/ijfs.15500.
17. Tu J.C., Adhikari B., Brennan M.A., Cheng P., Bai W.D., Brennan C.S. Shiitake polysaccharides acted as a non-competitive inhibitor to α -glucosidase and inhibited glucose transport of digested starch from Caco-2 cells monolayer // *Food Res. Int.* 2023. V. 173. P. 113268. DOI: 10.1016/j.foodres.2023.113268.
18. He M., Condict L., Richardson S.J., Brennan C.S., Kasapis S. Molecular characterization of interactions between lectin – a protein from common edible mushroom (*Agaricus bisporus*) – and dietary carbohydrates // *Food Hydrocoll.* 2023. V. 146. P. 109253. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.109253.
19. Ratanpaul V., Stanley R., Brennan C., Eri R. Manipulating the kinetics and site of colonic fermentation with different fibre combinations – a review // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 58. P. 2216–2227. DOI: 10.1111/ijfs.16373.
20. Alves-Santos A.M., Sugizaki C.S.A., Lima G.C., Naves M.M.V. Prebiotic effect of dietary polyphenols: a systematic review // *J. Funct. Foods*. 2020. V. 74. P. 104169. DOI: 10.1016/j.jff.2020.104169.
21. Paquette M., Larqué A.S.M., Weisnagel S.J., Desjardins Y., Marois J., Pilon G., et al. Strawberry and cranberry polyphenols improve insulin sensitivity in insulin-resistant, non-diabetic adults: a parallel, double-blind, controlled and randomised clinical trial // *Br. J. Nutr.* 2017. V. 117 (4). P. 519–531. DOI: 10.1017/S0007114517000393.
22. Chai S. C., Davis K., Zhang Z., Zha L., Kirschnner K.F. Effects of tart cherry juice on biomarkers of inflammation and oxidative stress in older adults // *Nutrients*. 2019. V. 11. P. 228–310. DOI: 10.3390/nu11020228.
23. Huang Y., He M., Kasapis S., Brennan M., Brennan C. The influence of the fortification of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) powder on the in vitro digestion, physical parameters, nutritional profile, polyphenols and antioxidant activity in the oat-wheat bread // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2022. V. 57. P. 2729–2738. DOI: 10.1111/ijfs.15530.
24. Hui X., Wu G., Han D., Stipkovits L., Wu X., Tang S., et al. The effects of bioactive compounds from blueberry and blackcurrant powders on the inhibitory activities of oat bran pastes against α -amylase and α -glucosidase linked to type 2 diabetes // *Food Res. Int.* 2020. V. 138. P. 109756. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109756.
25. Guan H., Zhang W., Sun-Waterhouse D., Jiang Y., Li F., Waterhouse G.I.N., et al. Phenolic-protein interactions in foods and post ingestion: switches empowering health outcomes // *Trends Food Sci Technol.* 2021. V. 118. P. 71–86. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.08.033.
26. Hao L., Sun J., Pei M., Zhang G., Li C., Li C., et al. Impact of non-covalent bound polyphenols on conformational, functional properties and in vitro digestibility of pea protein // *Food Chem.* 2022. V. 383. P. 132623. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132623.
27. Kaur H., Bobade H., Sharma R., Sharma S. Influence of extruded whole wheat flour addition on quality characteristics of pasta // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 59. P. 1129–1137. DOI: 10.1111/ijfs.16697.
28. Chang L., Liu Y., Niu R., Yang Q., Liang J., Li R., et al. Antioxidant activities, structure, physicochemical properties and in vitro digestibility of different millets (foxtail and proso) // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 58. P. 5017–5026. DOI: 10.1111/ijfs.16597.
29. Kataria A., Sharma S., Dar B.N. Changes in phenolic compounds, antioxidant potential and antinutritional factors of Teff (*Eragrostis tef*) during different thermal processing methods // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2022. V. 57. P. 6893–6902. DOI: 10.1111/ijfs.15210.
30. Huang H., Devi S., Bordiga M., Brennan K.S., Xu B. Phenolic compounds mediated biosynthesis of gold nanoparticles and assessment of their biological activity: a review // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 58. P. 1673–1694. DOI: 10.1111/ijfs.16346.

31. Ashaolu T.J., Suttikhana I. Plant-based bioactive peptides: a review of their relevant production strategies, in vivo bioactivities, action mechanisms and bioaccessibility // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 58. P. 2228–2235. DOI: 10.1111/ijfs.16384.
32. Ibrahim S.A., Yeboah P.J., Ayivi R.D., Eddin A.S., Wijemanna N.D., Paidari S., et al. A review and comparative perspective on health benefits of probiotic and fermented foods // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 58. P. 4948–4964. DOI: 10.1111/ijfs.16619.
33. Matsumura Y., Kitabatake M., Kayano S-I., Ito T. Dietary phenolic compounds: their health benefits and association with the gut microbiota // *Antioxid.* 2023. V. 12. P. 880. DOI: 10.3390/antiox12040880.
34. Luo J., Lin X., Bordiga M., Brennan C., Xu B. Manipulating effects of fruits and vegetables on gut microbiota – a critical review // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2021. V. 56. P.2055–2067. DOI: 10.1111/ijfs.14927.
35. Szabo K., Cătoi A.-F., Vodnar D. C. Bioactive compounds extracted from tomato processing by-products as a source of valuable nutrients // *Plant. Foods Hum. Nutr.* 2018. V. 73. P. 268–277. DOI: 10.1007/s11130-018-0691-0.
36. Madia V.N., De Vita D., Ialongo D., Tudino V., De Leo A., Scipione L., et al. Recent advances in recovery of lycopene from tomato waste: a potent antioxidant with endless benefits. // *Molecules.* 2021. V. 26. P. 4495. DOI: 10.3390/molecules26154495.
37. Anticono M., Blesa J., Frigola A., Esteve M.J. High biological value compounds extraction from citrus waste with non-conventional methods // *Foods.* 2020. V. 9. P. 811. DOI: 10.3390/foods9060811.
38. Russo C., Maugeri A., Lombardo G.E., Musumeci L., Barreca D., Rapisarda A., et al. The second life of citrus fruit waste: a valuable source of bioactive compounds // *Molecules.* 2021. V. 26. P. 5991. DOI: 10.3390/molecules26195991.
39. Madureira J., Margaça F.M.A., Santos-Buelga C., Ferreira I.C.F.R., Cabo Verde S., Barros L. Applications of bioactive compounds extracted from olive industry wastes: a review // *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2022. V. 21. P. 453–476. DOI: 10.1111/1541-4337.12861.
40. Harzalli Z., Willenberg I., Medfai W., Matthäus B., Mhamdi R., Oueslati I. Potential use of the bioactive compounds of the olive mill wastewater: monitoring the aldehydes, phenolic compounds, and polymerized triacylglycerols in sunflower and olive oil during frying // *J. Food Process. Preserv.* 2022. V. 46. P. e17006. DOI: 10.1111/jfpp.17006.
41. Pestana-Bauer V.R., Mendonça C.R., Bruscatto M.H., Krumreich F.D., Otero D.M., Costa I.H., et al. Fatty acid distillation residues from rice oil bran refining as a source of phytochemicals // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 58. P. 4627–4637. DOI: 10.1111/ijfs.16567.
42. Yao Z., Huaming X., Xin L., Dan W., Hong C., Fang W. Comprehensive review of composition distribution and advances in profiling of phenolic compounds in oilseeds // *Front. Nutr.* 2022. V. 9. P. 1044871. DOI: 10.3389/fnut.2022.1044871.
43. Baiano A., Fiore A. Sustainable food processing: single and interactive effects of type and quantity of brewers' spent grain and of type of sweetener on physicochemical and sensory characteristics of functional biscuits // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 58. P. 5757–5772. DOI: 10.1111/ijfs.16674.
44. Бурак Л.Ч. Использование отходов пивоваренной отрасли // *The Scientific Heritage.* 2022. № 86-1(86). С. 9-20. DOI: 10.12731/WOREPK.
45. Yu C., Liu Y., Xuemei Z., Ma A., Jianxin T., Yiling T. Fermented carrot pulp regulates the dysfunction of murine intestinal microbiota // *Oxidative Med. Cell. Longev.* 2022. P. 2479956. DOI: 10.1155%2F2022%2F2479956.
46. Hui X.D., Wu G., Han D., Gong X., Wu X.Y., Tang S.Z., et al. The effects of bioactive compounds from blueberry and blackcurrant powder on oat bran pastes: enhancing in vitro antioxidant activity and reducing reactive oxygen species in lipopolysaccharide-stimulated Raw264.7 Macrophages // *Antioxidants.* 2021. V. 1. P. 388. DOI: 10.3390/antiox10030388.
47. Бурак Л.Ч., Яблонская В.В. Использование антиоксидантной активности яблок и продуктов их переработки в пищевой промышленности // *Norwegian Journal of Development of the International Science.* 2023. № 115. С. 38-46. DOI: 10.5281/zenodo.8298199.

СТАТЬИ

УДК 003.63:91:629.3

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СЕТИ
МАССОВОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ГОРОДА ОШ****Адиева Г.М., Сатыбаев А.Дж.***Ошский технологический университет имени академика М. Адышева, Ош,
e-mail: gulzinaadieva@gmail.com, satybaev@mail.ru*

Аннотация. Пассажирский транспорт является главным средством передвижения населения города. В г. Ош функционируют три вида наземного общественного транспорта: троллейбус, автобус и мини-маршруты. В данной статье рассматривается сеть пассажирского транспорта г. Ош. Целью исследования являлось создание геоинформационной картографии пассажирского транспорта г. Ош, которая в дальнейшем являлась бы основой для мониторинга обеспеченности населения пассажирским транспортом, и оценка доступности остановочных пунктов. Картографирование пассажирского транспорта выполнено с применением программы ArcGIS. С помощью модуля ArcMAP были оцифрованы территориальные управления города. В базу данных включены основные улицы города, территориальные управления, остановочные пункты и конечные точки маршрутных линий пассажирского транспорта. Анализ работы общественного транспорта города проведен с помощью инструментов Spatial analyst. По результатам сетевого анализа определена обеспеченность населения общественным транспортом. Визуальный анализ сети пассажирского транспорта с применением геоинформационных технологий позволил выявить ряд ключевых аспектов организации общественного транспорта в г. Ош. Анализ показал, что основными видами наземного общественного транспорта в городе являются троллейбусы, автобусы и мини-маршруты. Остановочные пункты в центральной части города распределены равномерно и служат ключевыми пассажирообразующими точками. Однако в приграничных районах обнаружены проблемы с организацией пассажирских перевозок: некоторые участки лишены остановочных пунктов, что создает неудобства для населения. В ходе исследования также выявлены проблемы в работе общественного транспорта, такие как несоблюдение графика и систематические нарушения правил дорожного движения. Эти факторы приводят к увеличению времени поездки пассажиров и создают проблемы на узловых остановках, особенно в центральной части города, где проходят главные городские маршруты. Для решения обнаруженных проблем рекомендуется проведение дополнительных исследований с учетом результатов сетевого анализа. Необходимо разработать меры по оптимизации маршрутов и распределению остановочных пунктов с учетом потребностей населения, что позволит повысить качество перевозок общественного транспорта для населения г. Ош.

Ключевые слова: общественный транспорт, пассажиропоток, автобус, обслуживание, перевозка пассажиров, маршрут, качество обслуживания

**GEOINFORMATION MAPPING OF THE NETWORK
OF MASS PASSENGER TRANSPORT OF THE CITY OF OSH****Adieva G.M., Satybaev A.Dzh.***Osh Technological University named by M. Adyshev, Osh,
e-mail: gulzinaadieva@gmail.com, satybaev@mail.ru*

Annotation. Passenger transport is the main means of transportation for the city's population. There are three types of ground public transport in Osh: trolleybus, bus and mini-routes. This article discusses the Osh city passenger transport network. The purpose of the study was to create a geoinformation cartography of passenger transport in the city of Osh, which in the future would be the basis for monitoring the provision of passenger transport to the population and assessing the accessibility of stopping points. Passenger transport mapping was performed using the ArcGIS program. The city's territorial administrations were digitized using the ArcMap module. The database includes the main streets of the city, territorial administrations, bus stops and endpoints of passenger transport route lines. The analysis of the work of the city's public transport was carried out using Spatial analyst tools. According to the results of the network analysis, the provision of public transport to the population has been determined. A visual analysis of the passenger transport network using geoinformation technologies has revealed a number of key aspects of the organization of public transport in the city of Osh. The analysis showed that the main types of ground public transport in the city are trolleybuses, buses and mini-routes. The stops in the central part of the city are evenly distributed and serve as key passenger-forming points. However, problems with the organization of passenger transportation were found in the border areas: some sections are devoid of stopping points, which creates inconveniences for the population. The study also identified problems in the operation of public transport, such as non-compliance with schedules and systematic violations of traffic rules. These factors lead to an increase in the travel time of passengers and create problems at the hub stops, especially in the central part of the city, where the main routes of the city pass. To solve the detected problems, it is recommended to conduct additional research taking into account the results of network analysis. It is necessary to develop measures to optimize routes and distribute stopping points taking into account the needs of the population, which will improve the quality of public transport for the population of Osh.

Keywords: route, passenger flow, bus, service, passenger transportation, quality of service, public transport

Эффективная и развитая сеть пассажирского транспорта является неотъемлемой составляющей инфраструктуры любого крупного города. А для городов с высокой плотностью населения, обширной территорией и неравномерным расселением качество работы и уровень развития пассажирского транспорта становятся вопросами жизненной важности.

Для эффективного управления транспортной системой города городские транспортные службы осуществляют мониторинг транспортного обслуживания населения. Полученные результаты позволяют контролировать движение автотранспорта, распределять поток пассажиров между частными и государственными перевозчиками и оптимизировать распределение пассажиров по различным видам городского общественного транспорта [1].

В настоящее время в г. Ош наблюдается увеличение числа автомобилей, что приводит к затрудненной ситуации на магистралях города. Одной из основных проблем является постоянное образование пробок на дорогах, что увеличивает время перемещения горожан по городу. При разработке планов по совершенствованию инфраструктуры транспорта в крупных городах необходимо учитывать уникальные особенности процессов формирования и развития транспортной системы, которые можно более детально изучить с помощью геоинформационного картографирования. Поэтому особенно важным становится составление карты транспортной сети г. Ош и анализ данных с использованием геоинформационных технологий.

Исследованием пассажирского транспорта занимались многие ученые, была показана роль геоинформационного картографирования в изучении города и степень возможности геоинформатики в изучении урбанизированных территорий [2]. Другие авторы в исследовании представляют свой метод для оценки объема пассажиропотоков на остановках общественного транспорта с использованием геоинформационных технологий [3]. Работа авторов описывает инновационный подход к агрегированию транспортных сетей на картах различных масштабов, который базируется на автоматическом определении основных транспортных магистралей [4].

Нужно отметить особенности г. Ош, расположенного на юге страны, где население города составляет 302100 чел., а плотность населения – 4935 чел./км² [5]. Общая длина города с юга на север составляет более 10 км, а с запада на восток – более 9 км.

Большинство жителей города предпочитают ежедневно использовать общественный транспорт для передвижения. Количество пользователей общественного транспорта превышает число тех, кто отдает предпочтение личному автотранспорту. Перевозку пассажиров обеспечивают и государственные транспортные предприятия, и частные перевозчики. Пассажирские перевозки осуществляются с помощью троллейбусов, автобусов и маршрутных такси. Микроавтобусы охватывают те новые районы города, для которых не подходят автобусы или троллейбусы из-за особых условий местности [6].

Целью исследования являлось создание геоинформационной картографии транспортной инфраструктуры общественного транспорта г. Ош, которая будет использоваться для осуществления мониторинга с целью оценки эффективности функционирования общественного транспорта в связи с ухудшением качества обслуживания горожан общественным транспортом и увеличением числа автомобилей на дорогах.

Материалы и методы исследования

Объектом для исследования послужил пассажирский транспорт г. Ош. Геоинформационная картография пассажирского транспорта была осуществлена с использованием инструментальных средств ArcGIS. Векторная карта г. Ош масштаба 1:10000, которая была получена из открытого источника OpenStreetMap (OSM), послужила основой маршрутной сети пассажирского транспорта. Векторная карта содержит векторные слои, такие как улицы, дома и границы города.

На сегодня маршрутная сеть г. Ош состоит из 53 маршрутов, из них 2 троллейбусных, 6 автобусных, и 45 маршрутов обслуживаются микроавтобусами частных перевозчиков. Для оценки состояния сети массового пассажирского транспорта сформирован ее граф, в качестве базы применялись схемы микроавтобусов, курсирующих по 45 маршрутам, количество которых превышает 1000. Разработанная модель включает следующие объекты: схему маршрутов, конечные остановки по маршрутам, остановочные пункты, границы муниципальных территориальных управлений г. Ош (рис. 1).

Результаты исследования и их обсуждение

В результате полученных данных произведена оценка обеспеченности муниципальных районов г. Ош пассажирским транспортом.

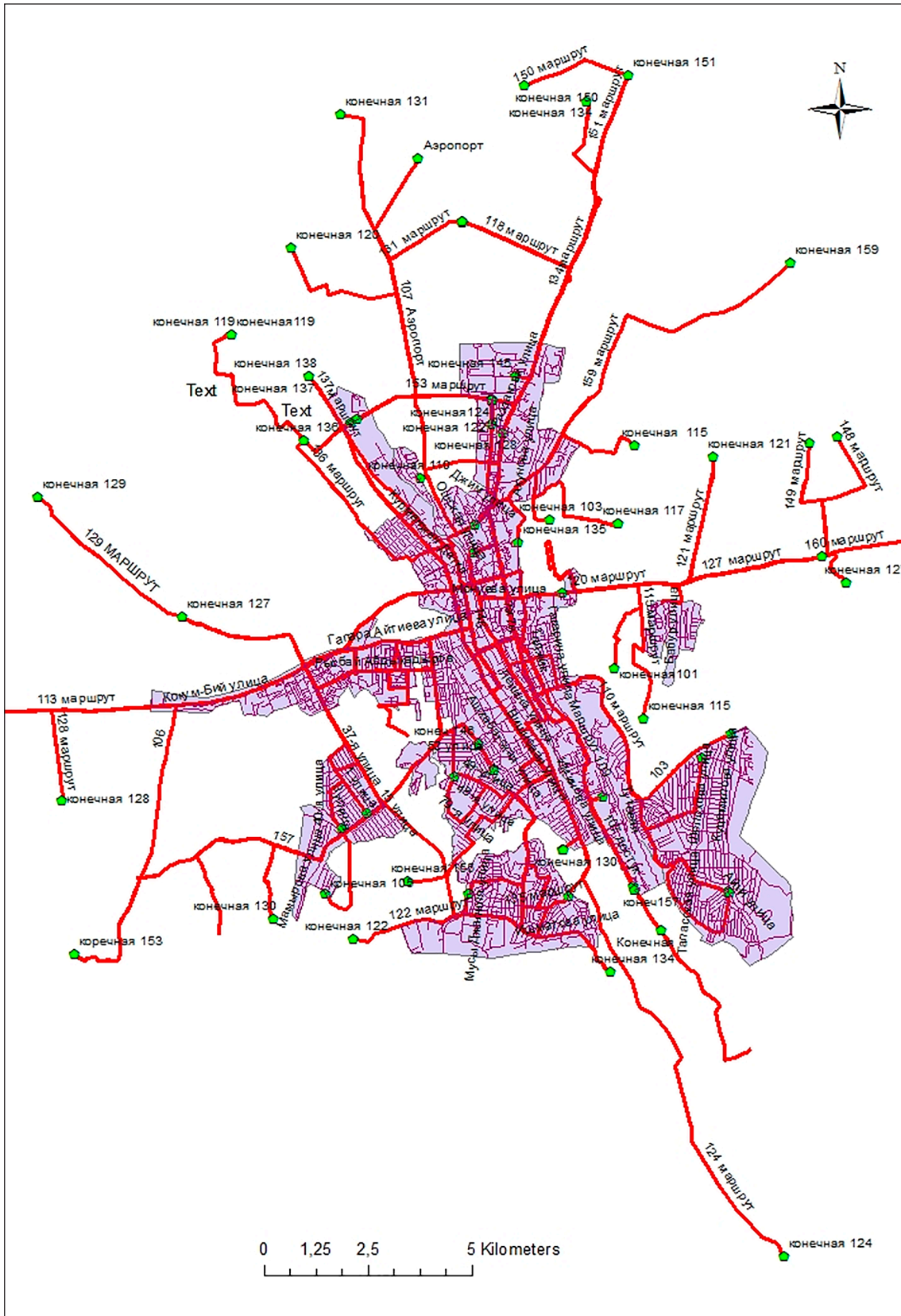


Рис. 1. Маршрутная схема пассажирского транспорта г. Ош

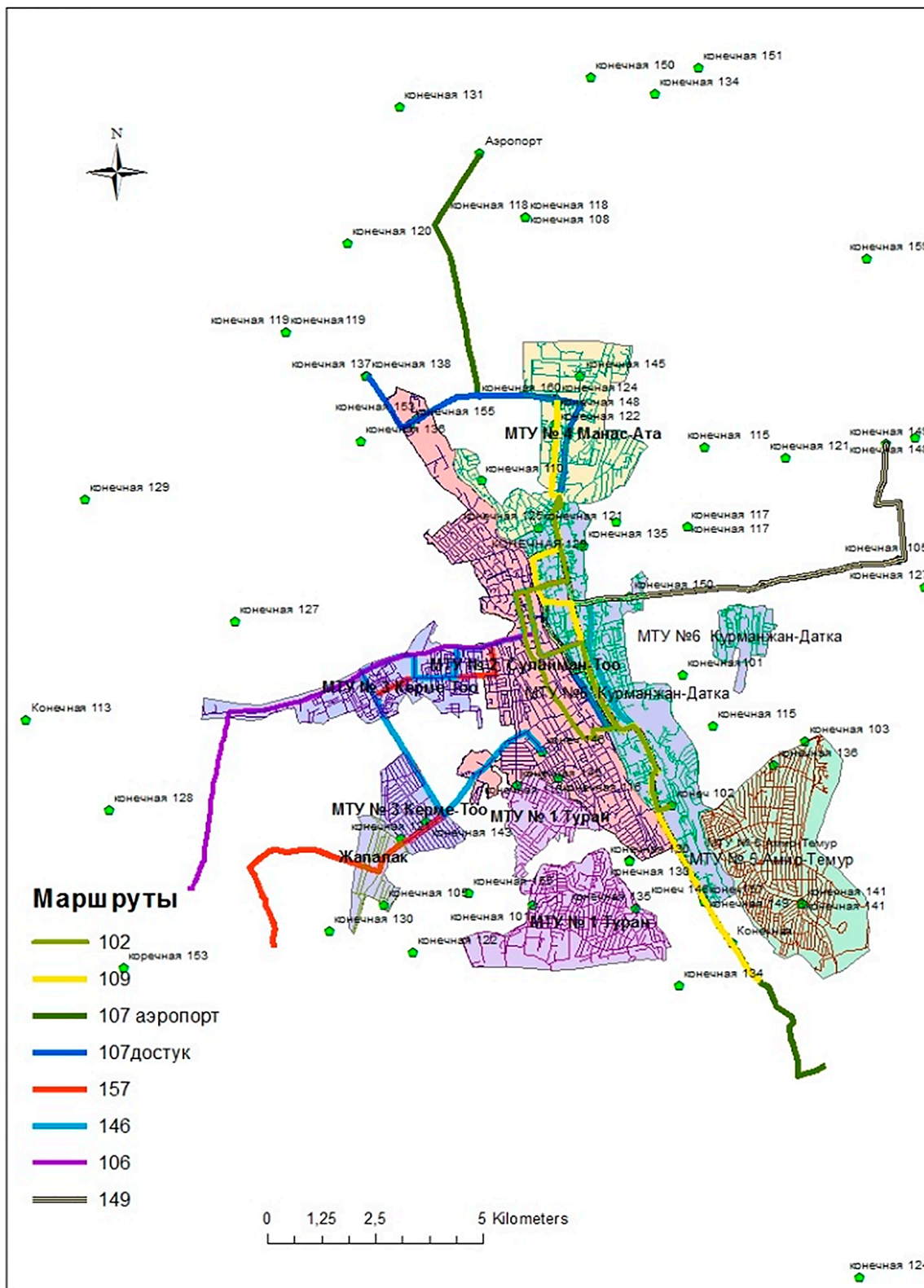


Рис. 2. Маршруты, обслуживающие МТУ Курманжан Датка

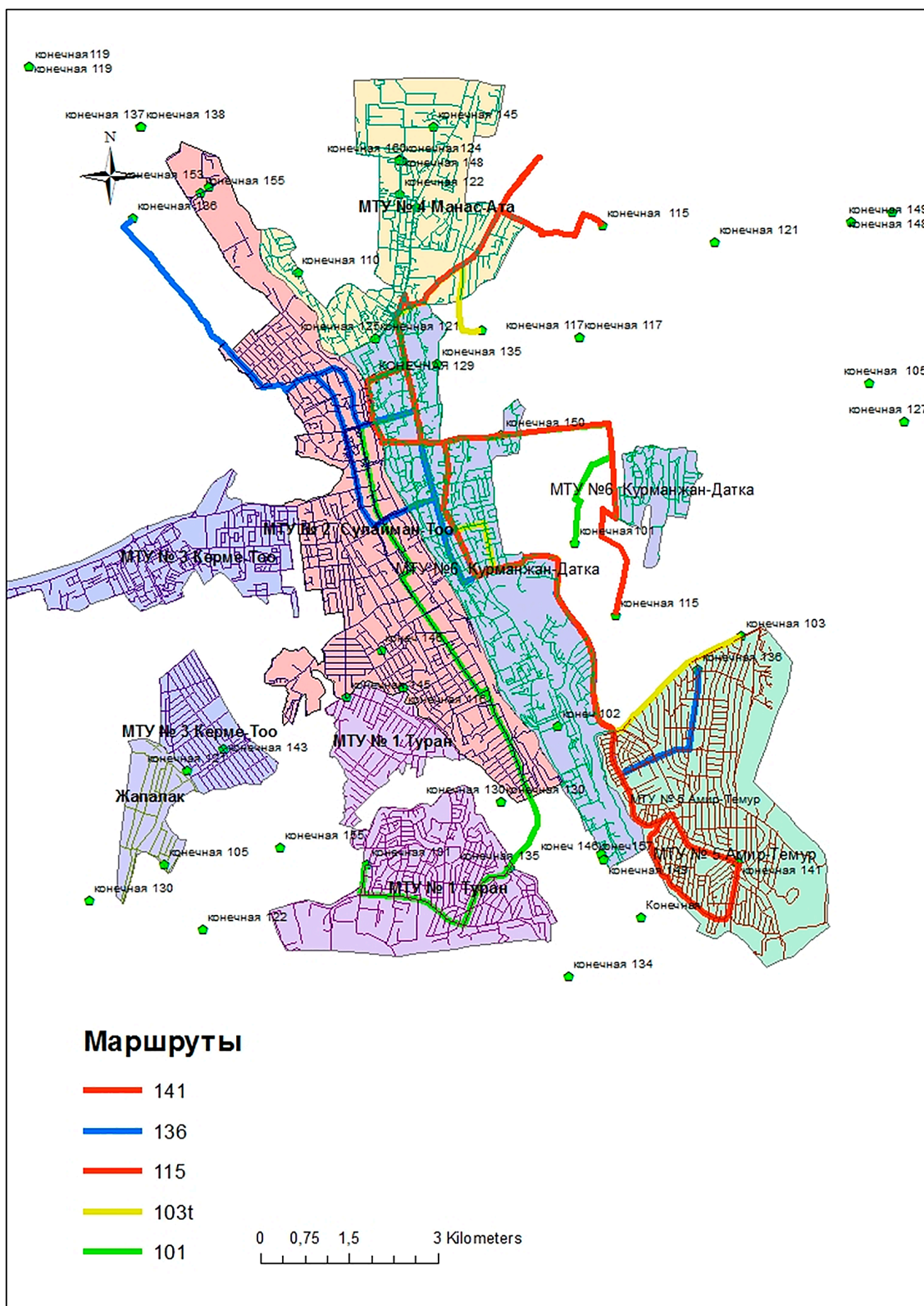


Рис. 3. МТУ Амур-Темур

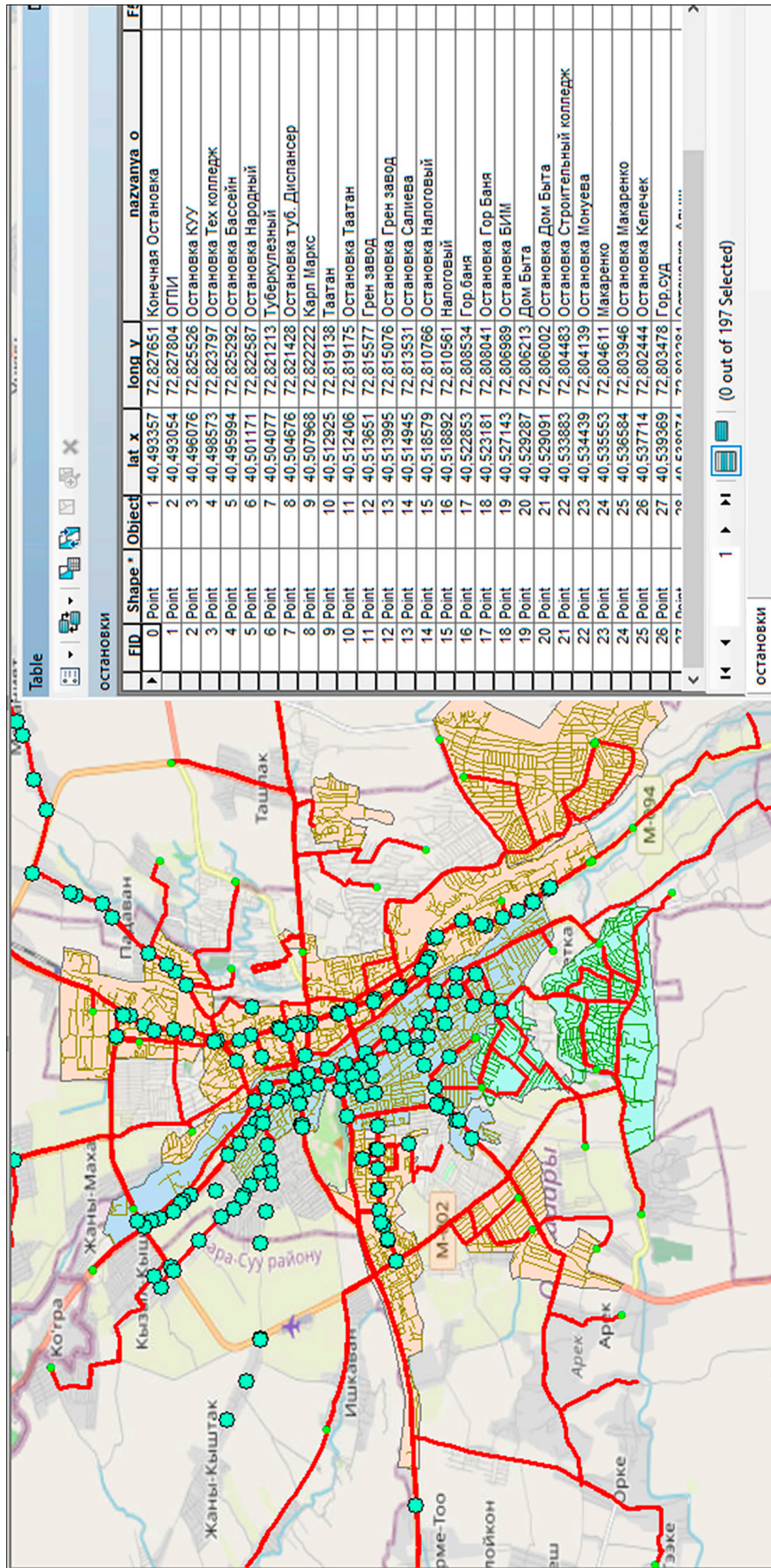


Рис. 4. Остановочные пункты города

На основе схемы градостроительного деления город разбит на территориальные управления:

- МТУ Курманжан Датка;
- МТУ Амир-Темур;
- МТУ Манас-Ата;
- МТУ Керме-Тоо;
- МТУ Туран;
- МТУ Сулайман-Тоо;
- МТУ Жапалак.

По МТУ Курманжан-Датка курсируют следующие маршруты: маршрут 107 (Юго-Восток – Достук), 107 (Юго-Восток – Аэропорт), 107 (Юго-Восток – Монок), 109 (Озгур – Манас-Ата), 157 (Юго-Восток – Арек), 146, 142, 102 (кольцевая), 149 (Юго-Восток – Фуркат) (рис. 2).

По МТУ Амир-Темур курсируют следующие маршруты: 141, 136, 115, 101 (рис. 3).

По МТУ Манас-Ата курсируют следующие маршруты: 109, 160, 148, 122, 124.

По МТУ Керме-Тоо проезжают следующие маршруты: 143, 121, 157, 146, 127.

По МТУ Туран проезжают следующие маршруты: 101, 130, 135, 105.

По МТУ Сулайман-Тоо проезжают большинство маршрутов.

Все остальные маршруты связывают город с приграничными селами.

Основными пассажирообразующими и пассажиропоглощающими пунктами в любом городе являются остановки общественного транспорта. На территории г. Ош имеется около 200 остановочных пунктов общественного транспорта (рис. 4).

Для анализа доступности остановочных пунктов общественного транспорта применялся сетевой анализ.

На рис. 5 изображены области, охватываемые остановочными пунктами, которые обслуживаются транспортными предприятиями. Круги, закрасленные зеленым цветом, обозначают территории с радиусом 1000 м в жилых зонах. Центры этих кругов – остановочные пункты маршрутов отмечены точками.

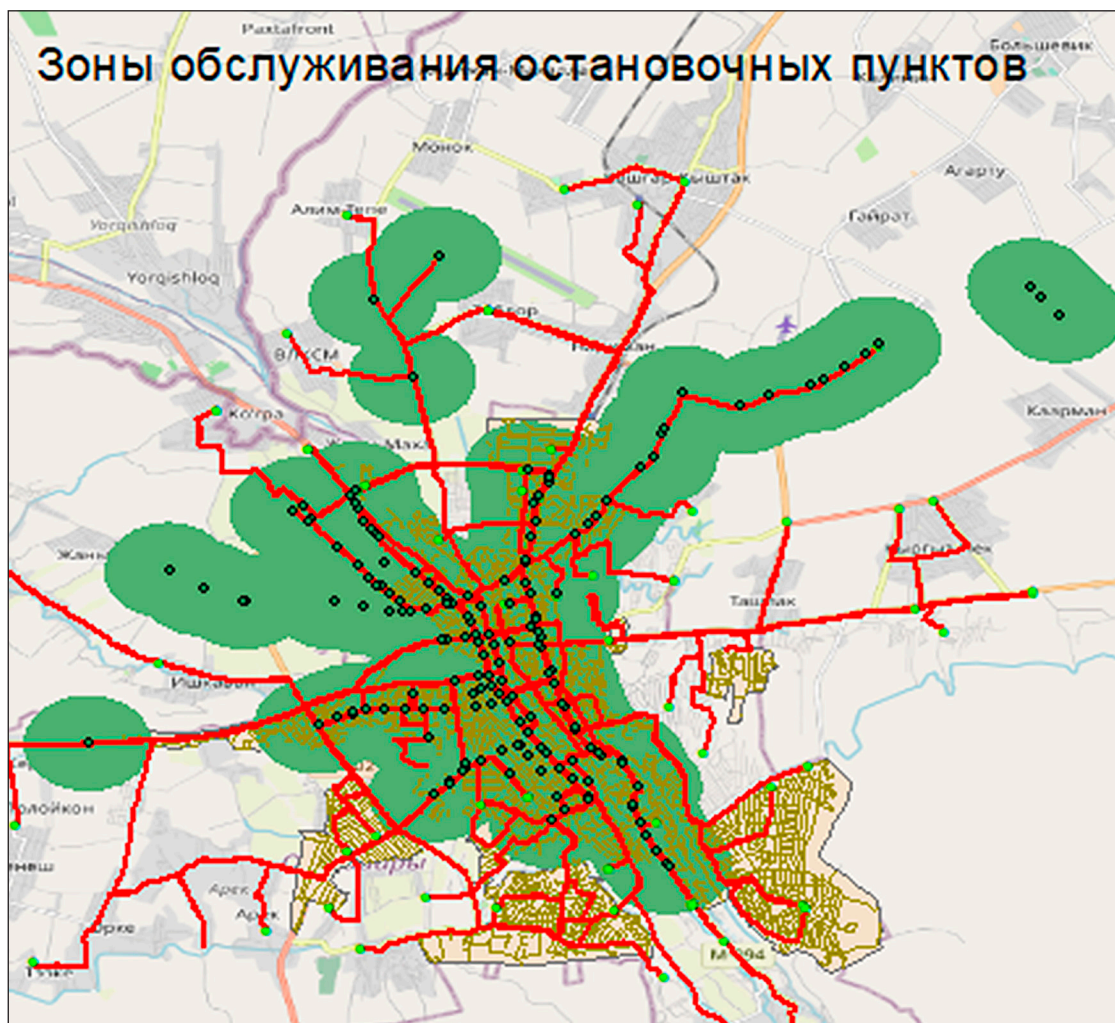


Рис. 5. Зоны обслуживания остановочных пунктов

По результатам проведенного анализа можно отметить, что остановочные пункты достаточно равномерно расположены внутри города, но в приграничных районах города их явно недостаточно. В некоторых местах приграничных районов остановочные пункты для пассажиров не предусмотрены. Это приводит к неудобству и нарушению безопасности пассажиров при ожидании транспорта.

Проведенный анализ показывает, что транспортная инфраструктура города многофункциональна. Один и тот же маршрут обеспечивает связь для различных целей, включая поездки на работу, учебу и культурно-бытовые мероприятия. Система организации маршрутов объясняется особенностями рельефа города. Большинство маршрутов проходят через центральную часть города. Например, одна часть маршрута предназначена для доставки жителей из пригородных районов в центральную часть города, а другая часть осуществляет внутригородские перевозки. В утренний час пик связь между жилыми районами, такими как Жапалак, Толойкон, Аэропорт, Озгур, Фуркат, Он Адыр, Нариман и др. ориентирована на движение в сторону города, а вечером – на обратное направление. Следовательно, транспортные маршруты, охватывающие указанные районы, предназначены для перевозки пассажиров из центральной части города в соответствующие районы в течение дня. Сюда включены автобусные линии: 121, 149, 108, 127, 159, 150, 151, а также частично 107, 109 и др. Некоторые маршруты, такие как 102, 113, 125, обеспечивают межрайонные, внутрирайонные связи и осуществляют кольцевые и полукольцевые схемы движения.

Отметим, что центральная часть города полностью обеспечена пассажирским транспортом, также территориальные управления достаточно обеспечены пассажирским транспортом. Но в приграничных участках

города имеются затруднения с транспортными линиями. Некоторые линии приграничных участков недостаточно обеспечены пассажирским транспортом. Маршруты на этих линиях работают с интервалом 30 и более минут, тем самым доставляя неудобства жителям этих участков. Некоторые участки обходятся межрайонными маршрутами. Также из-за дублирующих маршрутов на центральных магистралях города образуются заторы. Вследствие чего маршруты, осуществляющие перевозку на этих улицах, отстают от своих графиков.

Заключение

Для решения обнаруженных проблем рекомендуется проведение дополнительных исследований с учетом результатов данного сетевого анализа. Необходимо разработать меры по оптимизации маршрутов и распределению остановочных пунктов с учетом потребностей населения, что позволит повысить качество перевозок общественного транспорта и обеспечит более удобные условия перемещения для жителей г. Ош.

Список литературы

1. Бобылев А.В., Бобылева Т.В. Геоинформационное картографирование сети массового пассажирского транспорта г. Челябинска для общей оценки транспортного обслуживания населения // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2009. № 2. С. 215–218.
2. Евдокимова Н.М. Город как объект геоинформационного картографирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2006. № 2. С. 227–229.
3. Митрофанова А.А. Геоинформационный анализ степени транспортной обеспеченности Новосибирска // АМТ. 2017. № 2 (39). С. 353–363.
4. Самсонов Т.Е., Прохорова Е.А. Генерализация транспортных сетей при мультимасштабном картографировании // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 1. С. 107–117.
5. Адиева Г.М. Анализ общественного транспорта г. Ош // Проблемы автоматизации и управления. 2021. № 1. С. 68–74.
6. Адиева Г.М., Сатыбаев А.Д., Мэлс Уулу С. Анализ пассажиропотока общественного транспорта г. Ош // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8, № 12. С. 385–395.

УДК 519.876.5

MATHCAD АДАПТАЦИЯ ГИПЕРУПРУГИХ МОДЕЛЕЙ**Муслов С.А., Зайцева Н.В., Чистяков М.В., Фищенко К.А.***ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Министерства здравоохранения
Российской Федерации, Москва, e-mail: muslov@mail.ru*

Аннотация. Данная статья предназначена специалистам, занимающимся расчетом гиперупругих моделей материалов и биоматериалов. Цель работы: систематизировать рабочие формулы $F(\lambda)$ для расчета параметров гиперупругих моделей и представить основные фрагменты алгоритмов расчета в пакете Mathcad. Материалы и методы. Расчеты постоянных гиперупругих моделей выполнены в системе компьютерной алгебры Mathcad 15.0. Прогностическая близость модельных данных к экспериментальным оценивалась с помощью показателей математической статистики (среднеквадратичного отклонения, максимального абсолютного отклонения Δ , приведенной погрешности δ , % и коэффициента корреляции R). Перечень моделей соответствует их «рейтингу» в обширной мировой литературе, посвященной механике больших деформаций. Всего проанализировано 9 моделей (из них: неогуковская, 4 модели Муни – Ривлина с различным числом параметров, Огдена, полиномиальная, Веронда-Вестманн и Йео). Приведен пример расчета биоматериала – ногтевой пластины человека на основе опытных литературных данных. Система Mathcad достаточно адаптирована для расчета параметров гиперупругих моделей материалов. Относительная простота и точность вычислительных процедур выгодно выделяют ее среди других математических пакетов менее доступных и требующих специальной подготовки. При этом полиномиальная модель имеет наилучшие показатели качества аппроксимации рассматриваемых экспериментальных данных, взятых для расчета.

Ключевые слова: гиперупругие модели, Mathcad, моделирование, вычислительная математика

MATHCAD ADAPTATION OF HYPERELASTIC MODELS**Muslov S.A., Zaytseva N.V., Chistyakov M.V., Fischenko K.A.***Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation,
Moscow, e-mail: muslov@mail.ru*

Annotation. This article is intended for specialists involved in the calculation of hyperelastic models of materials and biomaterials. The purpose of the work is to systematize the working formulas $F(\lambda)$ for calculating the parameters of hyperelastic models and present the main fragments of calculation algorithms in the Mathcad package. Materials and methods. Calculations of permanent hyperelastic models are performed in the Mathcad 15.0 computer algebra system. The predictive proximity of the model data to the experimental data was estimated using mathematical statistics (standard deviation, maximum absolute deviation Δ , reduced error δ , % and correlation coefficient R). The list of models corresponds to their “rating” in the extensive world literature on the mechanics of large deformations. A total of 9 models were analyzed (among them: neo-Zhukovsky, 4 Mooney-Rivlin models with a different number of parameters, Ogden, polynomial, Veronda-Westmann and Yeo). An example of calculating a biomaterial – a human nail plate based on experimental literature data is given. Conclusion. The Mathcad system is sufficiently adapted to calculate the parameters of hyperelastic material models. The relative simplicity and accuracy of computational procedures favorably distinguish it from other mathematical packages that are less accessible and require special training. At the same time, the polynomial model has the best indicators of the quality of approximation of the considered experimental data taken for calculation.

Keywords: hyperelastic models, Mathcad, modeling, computational mathematics

Для гиперупругих материалов (неорганических и органических) закон Гука не выполняется [1, 2], и для описания деформационных свойств требуется применение различных нелинейных моделей, при этом выбор модели, которая была бы адекватной опытным данным, представляет актуальную задачу механики [3]. С точки зрения медицины оценка этих параметров может служить диагностическим показателем состояния биотканей, а знание характеристик их деформационных свойств может быть применено при реконструктивных вмешательствах и разработке замещающих искусственных аналогов – эндопротезов. Хорошо известна также востребованность

гиперупругих моделей деформирования при проектировании изделий технического назначения с использованием так называемых эластомерных материалов.

Целью исследования было систематизировать рабочие формулы $F(\lambda)$ для расчета гиперупругих моделей и представить основные фрагменты алгоритмов вычислений параметров моделей в пакете Mathcad.

Материалы и методы исследования

Расчет параметров гиперупругих моделей [4–6] производили в системе компьютерной алгебры Mathcad 15.0 (PTC Inc., США). Результаты расчетов верифицировались с помощью параллельных вычис-

лений в многофункциональном пакете ANSYS 2022 R2.

В качестве примера рассмотрен биоматериал – ткани ногтевой пластины человека. Исходные данные пластины были

представлены кривыми напряжение – деформация σ - ε [7]. Для удобства размещения в тексте статьи они представлены векторами (матрицами) в транспонированном и сокращенном виде:

$$\varepsilon^T = \begin{matrix} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 1.061 \cdot 10^{-3} & 0.025 & 0.044 & 0.05 & 0.054 & \dots \end{matrix}$$

$$\lambda^T = \begin{matrix} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 0 & 1.001 & 1.025 & 1.044 & 1.05 & 1.054 & 1.056 & 1.058 & 1.061 & \dots \end{matrix}$$

$$\sigma^T = \begin{matrix} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1.477 \cdot 10^{-3} & 6.962 \cdot 10^{-3} & \dots \end{matrix}$$

где σ – инженерные (условные) напряжения, $[\sigma] = \text{ГПа}$.

Результаты исследования и их обсуждение

Неогуковская модель

Алгоритм расчета основан на применении функции «подгонки» *linfit* – функции аппроксимации по методу наименьших квадратов (она возвращает вектор с параметрами, которые используются для создания линейной комбинации функций):

$$F(\lambda) := 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

$$K := \text{linfit}(\lambda, \sigma, F) \quad \sigma_{NH}(t) := F(t) \cdot K$$

$$K = 0.066$$

где K – это материальная константа μ неогуковской модели (ГПа).

Модель Муни – Ривлина (2-параметрическая)

$$F(\lambda) := \begin{pmatrix} 2 \cdot \lambda - \frac{2}{\lambda^2} \\ 2 - \frac{2}{\lambda^3} \end{pmatrix}$$

$$K := \text{linfit}(\lambda, \sigma, F)$$

$$\sigma_{MR}(t) := F(t) \cdot K$$

$$K = \begin{pmatrix} -0.144 \\ 0.262 \end{pmatrix}$$

где строки в столбце (компоненты вектора) – постоянные модели C_{10} и C_{01} (ГПа).

Модель Муни – Ривлина (3-параметрическая)

$$F(\lambda) := \begin{pmatrix} 2 \cdot \lambda - \frac{2}{\lambda^2} \\ 2 - \frac{2}{\lambda^3} \\ 6 \left(\lambda^2 - \lambda - 1 + \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda^3} - \frac{1}{\lambda^4} \right) \end{pmatrix}$$

$$K3 := \text{linfit}(\lambda, \sigma, F)$$

$$\sigma_{MR3}(t) := F(t) \cdot K3$$

$$K3 = \begin{pmatrix} 0.043 \\ 0.059 \\ -0.085 \end{pmatrix}$$

где строки в столбце (компоненты вектора) – постоянные C_{10} , C_{01} и C_{11} .

Модель Муни – Ривлина
(5-параметрическая)

$$F(\lambda) := \begin{bmatrix} 2 \cdot \lambda - \frac{2}{\lambda^2} \\ 2 - \frac{2}{\lambda^3} \\ 6 \left(\lambda^2 - \lambda - 1 + \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda^3} - \frac{1}{\lambda^4} \right) \\ 4\lambda \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \\ 4 \left(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} - 3 \right) \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \end{bmatrix}$$

$K5 := \text{linfit}(\lambda, \sigma, F)$
 $\sigma_{MR5}(t) := F(t) \cdot K5$

$$K5 = \begin{pmatrix} 8.375 \\ -8.572 \\ 168.948 \\ -62.812 \\ -119.018 \end{pmatrix}$$

где строки в столбце (компоненты вектора) – постоянные C_{10} , C_{01} , C_{11} , C_{20} и C_{02} .

Модель Йео

$$F(\lambda) := \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \\ 3 \cdot \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right)^2 \end{bmatrix} \cdot \left[2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \right]$$

$K := \text{linfit}(\lambda, \sigma, F)$
 $\sigma_{Йео}(t) := F(t) \cdot K$

$$K = \begin{pmatrix} 0.104 \\ -0.165 \\ 0.169 \end{pmatrix}$$

где строки в столбце (компоненты вектора) – постоянные C_1 , C_2 и C_3 .

Модель Муни – Ривлина
(9-параметрическая)

Самая многочисленная по числу параметров модель Муни – Ривлина.

$$F(\lambda) := \begin{bmatrix} 2 \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \\ 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \\ 6 \left(\lambda^2 - \lambda - 1 + \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda^3} - \frac{1}{\lambda^4} \right) \\ 4\lambda \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \\ 4 \left(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} - 3 \right) \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \\ 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \left(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} - 3 \right) \left(2\lambda^3 - 4\lambda + \frac{1}{\lambda^2} + 1 \right) \\ 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \left(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} - 3 \right) \left(4\lambda^2 - \frac{5}{\lambda} - 3\lambda - 6 \right) \\ 6 \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right)^2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \\ 6 \left(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} - 3 \right)^2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \end{bmatrix}$$

$K9 := \text{linfit}(\lambda, \sigma, F)$

$\sigma_{MR9}(t) := F(t) \cdot K9$

$$K9 = \begin{pmatrix} -58.517 \\ 59.096 \\ -1.257 \times 10^8 \\ 3.928 \times 10^7 \\ 8.643 \times 10^7 \\ -1.98 \times 10^7 \\ -3.089 \times 10^6 \\ 7.436 \times 10^5 \\ 1.21 \times 10^6 \end{pmatrix} +$$

где строки в столбце (компоненты вектора) – постоянные C_{10} , C_{01} , C_{11} , C_{20} , C_{02} , C_{21} , C_{12} , C_{30} и C_{03} .

Отметим, что 9-параметрическая модель рекомендована к применению для деформационных кривых, содержащих две и более точек перегиба.

Модель Огдена (1-го порядка)

Полиномиальная модель (2-го порядка)

$$\sigma_{\text{теор}}(\lambda) = \mu \cdot \left(\lambda^\alpha - \lambda \frac{-\alpha}{2} \right)$$

Задаем вспомогательную матрикс-функцию:

$$F_0(z, u) := \begin{bmatrix} u_0 \cdot \left(z^{u_1} - z \frac{-u_1}{2} \right) \\ z^{u_1} - \frac{1}{\frac{u_1}{z^2}} \\ u_0 \cdot \left(\frac{\ln(z)}{\frac{u_1}{2 \cdot z^2}} + z^{u_1} \cdot \ln(z) \right) \end{bmatrix}$$

Определяем коэффициенты:

$$v := \begin{pmatrix} 1550 \\ 0.0002 \end{pmatrix}$$

$$k := \text{genfit}(\lambda, \sigma, v, F_0) = \begin{pmatrix} 7.522 \times 10^4 \\ 3.181 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$$

где строки в столбце (компоненты вектора) – постоянные μ и α .

$$F(\lambda) := \begin{bmatrix} 2 \cdot \lambda - \frac{2}{\lambda^2} \\ 2 - \frac{2}{\lambda^3} \\ 4 \cdot \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \\ 4 \frac{1}{\lambda} \left(2\lambda + \frac{1}{\lambda^2} - 3 \right) \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \\ 6 \left(\lambda - 1 - \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right) \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \end{bmatrix}$$

$$K := \text{linfit}(\lambda, \sigma, F)$$

$$\sigma_{\text{Polynom}}(t) := F(t) \cdot K$$

$$K = \begin{pmatrix} 8.375 \\ -8.572 \\ -62.812 \\ -119.018 \\ 168.948 \end{pmatrix}$$

где строки в столбце (компоненты вектора) – постоянные C_{10} , C_{01} , C_{11} , C_{20} и C_{02} .

Модель Веронда-Вестманн

$$\sigma_{\text{теор}}(\lambda) = 2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \exp \left[C_2 \cdot \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \right] \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) + 2C_3 \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right)$$

Задаем вспомогательную матрикс-функцию:

$$F_0(\lambda, u) := \begin{bmatrix} 2 \cdot u_0 \cdot u_1 \cdot \exp \left[u_1 \cdot \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \right] \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) + 2u_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \\ 2 \cdot u_1 \cdot \exp \left[u_1 \cdot \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) \right] \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \\ 2 \cdot e^{u_1 \cdot \left(\frac{2}{\lambda} + \lambda^2 - 3 \right)} \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \cdot u_0 + 2 \cdot u_1 \cdot e^{u_1 \cdot \left(\frac{2}{\lambda} + \lambda^2 - 3 \right)} \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \cdot \left(\frac{2}{\lambda} + \lambda^2 - 3 \right) \cdot u_0 \\ 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) \end{bmatrix}$$

Определяем коэффициенты (первое приближение):

$$v := \begin{pmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad k0 := \text{genfit}(\lambda, \sigma, v, F_0) = \begin{pmatrix} -0.016 \\ -4.051 \\ 0.039 \end{pmatrix}$$

$$\sigma^{\text{VW}}(\lambda) := 2 \cdot k0_0 \cdot k0_1 \cdot \exp\left[k0_1 \cdot \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3\right)\right] \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right) + 2k0_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right)$$

$$\begin{pmatrix} C1 \\ C2 \\ C3 \end{pmatrix} := k0 = \begin{pmatrix} -0.016 \\ -4.051 \\ 0.039 \end{pmatrix}$$

где строки в столбце (компоненты вектора) – постоянные C_1 , C_2 и C_3 .

Близость экспериментальных и модельных данных и прогностические качества моделей оценивали с помощью показателей математической статистики: среднеквадратичного отклонения (СКО), максимального абсолютного отклонения (Δ), приведенной погрешности (δ , %) и коэффициента корреляции R:

Записываем СКО:

$$i := 1.. \text{длина}(\lambda) - 1$$

$$\sqrt{\frac{1}{\text{длина}(\lambda) - 1} \cdot \sum_i (\sigma^{\text{MR9}}(\lambda_i) - \sigma_i)^2} = 2.803 \times 10^{-3}$$

Определяем максимальное абсолютное отклонение:

$$\Delta_i := (\sigma^{\text{MR9}}(\lambda_i) - \sigma_i) \quad \Delta := \max(\Delta)$$

Определяем максимальную приведенную погрешность:

$$\delta := \frac{\Delta}{\max(\sigma)} = 6.365 \cdot \%$$

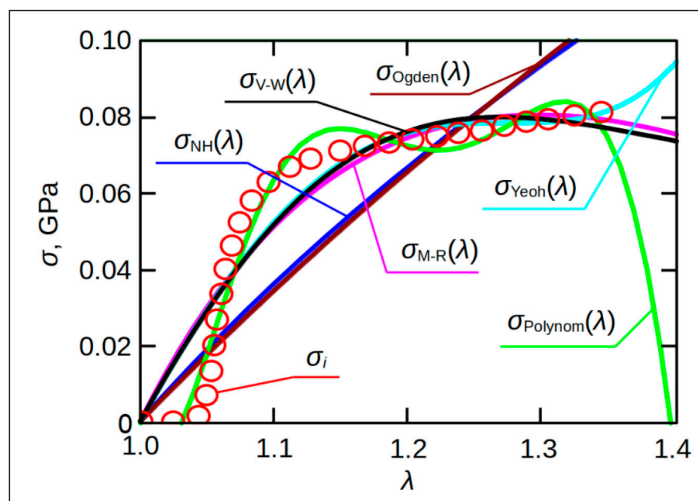
Вычисляем коэффициент корреляции:

$$A_i := \sigma_i \quad B_i := \sigma^{\text{MR9}}(\lambda_i) \quad \text{corr}(A, B) = 0.99507$$

В качестве примера расчета статистических показателей использованы данные 9-параметрической модели Муни – Ривлина ногтевой пластины человека.

Результаты вычислений параметров гиперэластичных моделей представлены на рисунке.

Из графика, представленного на рисунке, наглядно видно, что полиномиальная модель имеет наилучшие показатели качества аппроксимации рассматриваемых экспериментальных данных ногтевой пластины, взятых для расчета.



Сравнение рассмотренных прогностических гиперупругих моделей (сплошные линии): неогоуговской (NH), 2-параметрической Муни – Ривлина (M-R), Огдена 1-го порядка (Ogden), Йео 3-го порядка (Yeoh), полиномиальной 2-го порядка (Polynom) и Веронда-Вестманн (V-W) и опытных данных (точками). Ногтевая пластина человека

Заключение

Таким образом, система Mathcad достаточно удобна и может быть рекомендована для расчета параметров гиперупругих моделей материалов. Относительная простота и точность, а также прозрачность вычислительных процедур выгодно выделяют ее среди других математических пакетов ANSYS, Comsol, MATLAB, MECHANICA и других, более рутинных, менее доступных и требующих специальной подготовки.

Список литературы

1. Biomechanics of Living Organs. Hyperelastic Constitutive Laws for Finite Element Modeling. Yohan Payan and Jacques Ohayon (Eds.). Academic Press, 2017. 575 p.
2. Муслон С.А., Перцов С.С., Арутюнов С.Д. Физико-механические свойства биологических тканей / Под ред.

акад. РАН О.О. Янушевича. М.: МГМСУ им. А.И. Евдокимова, 2023. 456 с.

3. Шмурак М.И., Кучумов А.Г., Воронова Н.О. Анализ гиперупругих моделей для описания поведения мягких тканей организма человека // Master's Journal. 2017. № 1. С. 230–243.

4. Stephen K. Melly, Liwu Liu, Yanju Liu, Jinsong Leng. A review on material models for isotropic hyperelasticity // Int J Mech Syst Dyn. 2021. № 1. P. 71–88.

5. Ogden R.W. Large deformation isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids, proceedings of the Royal Society of London // Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1972. Vol. 326. № 1567. P. 565–584. DOI: 10.5254/1.3542910.

6. Michael Rackl. Curve Fitting for Ogden, Yeoh and Polynomial Models. ScilabTEC 2015, 7th International Scilab Users Conference. Paris, France, 21st and 22nd May, 2015. 18 p.

7. Farran L., Ennos A.R., Starkie M., Eichhorn S.J. Tensile and shear properties of fingernails as a function of a changing humidity environment // J Biomech. 2009. № 42(9). P. 1230–1235. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2009.03.020.

УДК 621.391.82

ТЕХНОЛОГИЯ NR REDCAP (ФАЗА 2) УСЛУГ IOT НА СЕТИ 5G**Шепелев С.В., Бабин А.И., Коротков М.В.***АО «МТУ Сатурн», Москва,**e-mail: SSHepelev@k-tech.ru, ABabin@k-tech.ru, MKorotkov@k-tech.ru*

Аннотация. Стандартизация оборудования 5G-NR продолжается. Технология RedCap, с появлением ее в релизе Rel.17 3GPP (фаза 1) разрабатывалась для более экономичного обеспечения различных вариантов использования, которым не всегда требуются высокопроизводительные возможности обычной технологии 5G. Целью исследования в статье авторы ставят рассмотрение особенностей эволюции технологии NR RedCap в последних версиях спецификаций Rel.17 и Rel.18 3GPP, как фазы 2 технологии Интернета вещей на сети 5G-Advanced и оказание содействия отечественным разработчикам оборудования 5G в этой области. При стандартизации технологии 5G-Advanced в релизе Rel.18 3GPP рассматривается вторая фаза технологии RedCap, этапы проведения модернизации с учетом упрощения технических возможностей и уменьшения будущей стоимости оборудования RedCap, особенно оконечных устройств. Переход от релиза 17 к релизу 18 означает согласованные усилия в отрасли по совершенствованию технологии NR-RedCap. 5G RedCap хорошо подходит для широкого спектра приложений Интернета вещей и сыграет важную роль в будущих развертываниях Интернета вещей IoT и IIoT. Авторы статьи рассматривают эволюционное развитие технологии RedCap на сетях 5G-NR/5G-Advanced с целью будущей реализации услуг Интернета вещей на будущих сетях пятого поколения России. Разработчикам отечественного оборудования 5G работы по оборудованию RedCap целесообразно начать с учетом доступности чипсетов из дружественных России стран.

Ключевые слова: технология с ограниченными возможностями 5G, NR-RedCap, NR-Light, устройства Интернет вещей, IoT

NR REDCAP TECHNOLOGY (PHASE 2) OF IOT SERVICES ON A 5G NETWORK**Shepelev S.V., Babin A.I., Korotkov M.V.***Joint-stock company "MTU Saturn", Moscow,**e-mail: SSHepelev@k-tech.ru, ABabin@k-tech.ru, MKorotkov@k-tech.ru*

Annotation. The standardization of 5G-NR equipment continues. RedCap technology, with its introduction in the Rel.17 3GPP release (Phase 1), was developed to provide more cost-effective support for various use cases that do not always require the high-performance capabilities of conventional 5G technology. The purpose of the research in the article is to consider the features of the evolution of the NR RedCap technology in the latest versions of the Rel.17 and Rel.18 3GPP specifications, as phase 2 of the Internet of Things technology on the 5G-Advanced network and to assist domestic developers of 5G equipment in this area. When standardizing 5G-Advanced technology, the Rel.18 3GPP release examines the second phase of RedCap technology, the stages of modernization, taking into account the simplification of technical capabilities and reducing the future cost of RedCap equipment, especially terminal devices. The transition from release 17 to release 18 signifies a concerted effort in the industry to improve the NR-RedCap technology. 5G RedCap is well suited for a wide range of IoT applications and will play an important role in future IoT and IIoT deployments. The authors of the article consider the evolutionary development of RedCap technology on 5G-NR/5G-Advanced networks with the aim of future implementation of Internet of Things services on future fifth-generation networks in Russia. It is advisable for developers of domestic 5G equipment to start work on RedCap equipment, taking into account the availability of chipsets from Russia-friendly countries.

Keywords: 5G technology with limited capabilities, NR-RedCap, NR-Light, Internet of Things devices, IoT

5G Reduced Capability, или 5G с ограниченными возможностями (RedCap), также известная как *5G NR-Light*, представляет собой версию технологии 5G, предназначенную для случаев использования для услуг среднего уровня, в основном Интернета вещей. 5G RedCap предлагает сочетание возможностей по умеренной пропускной способности, меньшей сложности и увеличенному времени автономной работы и плотности устройств, необходимых для экономичного обеспечения различных вариантов использования, которым не всегда требуются высокопроизводи-

тельные возможности обычной технологии 5G. Данная концепция была представлена в релизе Rel.17 3GPP для 5G NR в 2022 г. Стандартизация 5G-Advanced продолжается в релизе Rel.18 3GPP. Рассмотрим особенности модернизации фазы 2 технологии NR-RedCap.

Целью работы являлось исследование особенностей эволюции технологии NR RedCap в последних версиях Rel.17 и Rel.18 3GPP, как фазы 2 технологии Интернета вещей на сети 5G-Advanced и оказание содействия отечественным разработчикам оборудования 5G в этой области.

Материалы и методы исследования

При проведении исследований применялись теоретические (анализ, синтез) и логические методы (факты и умозаключения).

Технология NR-RedCap (NR-Light) разработана в релизе Rel.17 3GPP как фаза 1, для решения вариантов использования между высокоскоростной мобильной широкополосной связью (*eMBB*), сверхнадежной связью с низкой задержкой (*uRLLC*) и технологиями массовой машинной связи с низкой пропускной способностью и экономией заряда батареи (*mMTC*) [1]. Для сетей 5G она будет критически важной технологией, но сегодня основная часть Интернета вещей по-прежнему обслуживается 4G/LTE и подключениями, такими как *LTE-M*, *NB-IoT*, а также широкополосными сетями с низким энергопотреблением (LPWA). На рис. 1 приведена диаграмма основных параметров режимов услуг 5G в части IoT, рейтинг параметров NR по десятибалльной шкале.

NR-RedCap фаза 1 (Rel. 17 3GPP) охватывает варианты использования с более высокими требованиями к скорости передачи данных, чем *LTE-M* или *NB-IoT*, и меньшим энергопотреблением и размерами устройства, чем *eMBB*. Многие варианты использования сотовой сети IoT среднего уровня могут быть реализованы с помощью технологий LTE – например, *LTE Cat 1bis* и *LTE Cat 4*. При сравнении *RedCap* с *LTE Cat 1* или *Cat 4* основные преимущества касаются пиковой скорости передачи данных, которая может быть выше, меньшей задержки, чем у *LTE Cat 4*, и улучшенного энергопотребления [1].

NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) – технология сотовой связи на основе стандарта LTE и 5G, предназначенная для стационарных устройств с низкими объемами передаваемых данных и малым потреблением.

С выпуском релизов Rel.15 и Rel.16 3GPP усовершенствованный аспект мобильной широкополосной связи (*eMBB*) стал основой для надежной высокоскоростной связи, которая может похвастаться сегодня скоростью нисходящей линии связи до 2,3 Гбит/с и скоростью восходящей линии связи до 468 Мбит/с. Релиз Rel.17 3GPP заложил базу для *NR-RedCap*, оптимизировав широкие возможности 5G NR для обслуживания устройств Интернета вещей, уделив основное внимание созданию приложений Интернета вещей, которым не требуется полный спектр возможностей 5G, но которые извлекают выгоду из достижений технологии 5G [2].

Для промышленности, согласно Rel.17 3GPP, сегодня требуются три начальных варианта использования устройств Интернета вещей (IoT): промышленные беспроводные датчики, видеонаблюдение и носимые устройства [2, с. 17]. К каждой из них предъявляются несколько разные требования по скорости передачи данных, задержке, надежности и времени автономной работы, как показано в табл. 1.

Умные часы и другие носимые устройства должны поддерживать высокую скорость передачи данных в небольших форматах при относительно низком энергопотреблении, чего невозможно достичь с помощью *eMBB* или *mMTC*.

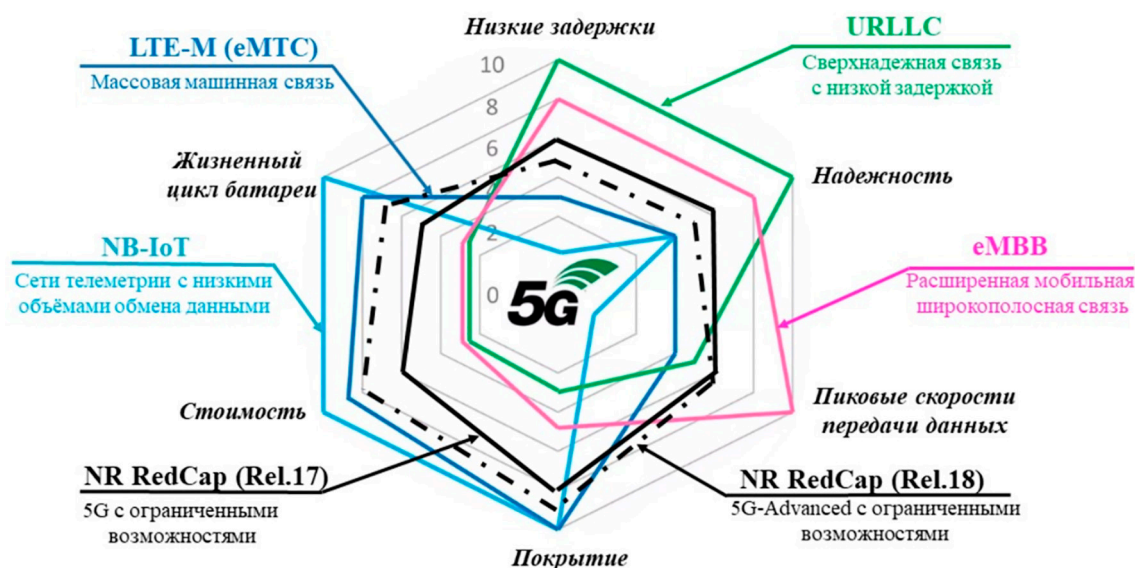


Рис. 1. Диаграмма основных параметров режимов услуг 5G

Таблица 1

Технические требования вариантов оконечных устройств RedCap (Rel.17)

Пример использования	Примеры устройств	Скорость передачи данных	Задержка	Доступность и надежность	Время автономной работы
Носимые устройства	Умные часы, гарнитуры виртуальной реальности, мониторы здоровья	5–50 Мбит/с DL, 2–5 Мбит/с UL (пиковая скорость до 150 Мбит/с DL/50 Мбит/с UL)	< 10 мс	99,99 – 99,999%	до 1–2 недель
Промышленные беспроводные датчики	Датчики движения, давления, температуры, влажности и др.	2 Мбит/с	< 100 мс	99,99%	несколько лет
Видеонаблюдение	Умные города, фабрики, заводы, сельское хозяйство	2–4 Мбит/с для базовых приложений 7,5–25 Мбит/с для высокопроизводительных приложений	< 500 мс	99–99,9%	н/д

Многие видеоприложения для умных городов, домашней безопасности и даже для использования на интеллектуальных заводах не требуют высоких скоростей передачи данных, предлагаемых eMBB, что позволяет использовать 5G RedCap в меньших форм-факторах и с меньшим энергопотреблением. Телематические приложения, которые в настоящее время подключаются через LTE Cat 1 и Cat 4, также являются хорошими кандидатами для RedCap.

Сравнивая возможности устройств Rel. 17 RedCap по сравнению с устройствами Rel. 15 eMBB, можно выделить пять существенных сокращений: максимальная полоса пропускания, приемные антенны устройства, максимальное количество уровней MIMO нисходящей линии связи (DL), максимальный порядок модуляции нисходящей линии связи и дуплексный режим. При сравнении RedCap с LTE Cat 1 или Cat 4 основные преимущества касаются пиковой скорости передачи данных, которая может быть выше, меньшей задержки, чем у LTE Cat 4, и улучшенного энергопотребления [3]. В табл. 2 приведены характеристики технологий IoT на сетях мобильной связи, включая сеть 5G для eMBB и NR-RedCap (фаза 1) согласно Rel.17 3GPP.

Результаты исследования и их обсуждение

В преддверии релиза Rel.18 3GPP NR-RedCap (фаза 2) готовится к серии улучшений, основанных на последних спецификациях Rel.17 3GPP, для удовлетворения растущих требований рынка Интернета вещей. Хотя все еще находится на стадии разработки,

ожидается, что Rel.18 3GPP обеспечит пиковую скорость передачи данных в 10 Мбит/с как для нисходящей, так и для восходящей линии связи, эти усовершенствования, по прогнозам, будут включать [4]:

– *Дальнейшее снижение сложности устройства*: За счет дальнейшего упрощения архитектуры устройства NR-RedCap стремится стать еще более экономичным и энергоэффективным, делая технологию более доступной для широкого спектра устройств Интернета вещей.

– *Улучшенная сетевая интеграция*: Благодаря усовершенствованиям в том, как устройства NR-RedCap интегрируются с существующими сетями 5G, делается упор на эффективное использование сетевых ресурсов и упрощение оперативного развертывания для поставщиков услуг.

– *Передовые технологии энергосбережения*: Ожидаются новые функции энергосбережения, которые будут иметь решающее значение для продления срока службы батарей устройств Интернета вещей, особенно в отдаленных или труднодоступных районах.

– *Повышенная гибкость развертывания*: Внедрение более разнообразных вариантов конфигурации для NR-RedCap обеспечит поддержку расширенного диапазона вариантов использования с учетом конкретных потребностей в покрытии или пропускной способности.

Переход от релиза 17 к релизу 18 означает согласованные усилия в отрасли по совершенствованию технологии NR-RedCap. Эволюция NR RedCap в последних версиях Rel.17 и Rel.18 3GPP представлена на рис. 2.

Таблица 2

Характеристики технологий IoT на сетях мобильной связи LTE/5G

Технологии IoT/ параметры	LTE Cat 1	LTE Cat 0	EC-GSM-IoT	LTE Cat M1 (eMTC)	LTE Cat NB1 (NB-IoT)	5G-NR eMBB	NR RedCap фаза 1
Релизы 3GPP	Rel.8	Rel.12	Rel. 13	Rel. 13	Rel. 13/14	Rel. 15/16	Rel. 17
Пиковая скорость нисходящей линии связи	10 Мбит/с	1 Мбит/с	474 кбит/с (EDGE) 2 Мбит/с (EGPRS)	1 Мбит/с	250 кбит/с	до 20 Гбит/с (30 бит/с/Гц)	85 Мбит/с (до 227 Мбит/с)
Пиковая скорость восходящей линии связи	5 Мбит/с	1 Мбит/с	474 кбит/с (EDGE) 2 Мбит/с (EGPRS)	1 Мбит/с	250 кбит/с 20 кбит/с	до 10 Гбит/с (15 бит/с/Гц)	50 Мбит/с (до 122 Мбит/с)
Задержка сети	50–100 мс	100 мс	700 мс–2 с	10–15 мс	1.6–10 с	до 1 мс	2–5 мс
Кол-во антенн	2	1	1–2	1	1	2TX4RX	1–2
Режимы работы	полный дуплекс	полный и полудуплекс	полудуплекс	полный и полудуплекс	полудуплекс	полный и полудуплекс	полный и полудуплекс
Полоса пропускания ПРМ	1,4–20 МГц	1,4–20 МГц	200 кГц	1,4 МГц	180 кГц	100 МГц (FR1) 200 МГц (FR2)	5–20 МГц (FR1) 100 МГц (FR2)
Приемные антенны	2 (MIMO)	1 (SISO)	1–2	1 (SISO)	1 (SISO)	1–2 (SISO)	2×2 MIMO DL 1 SISO UL
Мощность передатчика	23 дБм	23 дБм	23/33 дБм	20/23 дБм	20/23 дБм	20/23 дБм	14 дБм

1) Полосы частот FR1 для 5G от 410 МГц до 7125 МГц (3GPP).

2) Полосы частот FR2 для 5G от 24,25 ГГц до 52,55 ГГц и дальнейшим расширением до 71,05 ГГц (3GPP).



Рис. 2. Эволюция NR RedCap в последних версиях Rel.17 и Rel.18.

Таблица 3

Обзор возможностей технологии NR RedCap фаза 1/фаза 2

Особенности технологии	Новая мобильная широкополосная связь с улучшенной радиосвязью (eMBB) (релиз 15/16)	RedCap (фаза 1) Новые возможности радиосвязи с ограниченным доступом (релиз 17)	RedCap (фаза 2) Новые возможности радиосвязи с ограниченным доступом (релиз 18)
Пропускная способность устройства	100 МГц (FR1) 200 МГц (FR2)	20 МГц (FR1) 100 МГц (FR2)	20 МГц или 5 МГц (только FR1)
Режимы сигнала	Полный дуплекс / полудуплексный режим, разделение по времени	Полный дуплекс / полудуплексный режим, разделение по времени	Полный дуплекс / полудуплексный режим, разделение по времени
Тип антенны	Одиночный передатчик, двойной приемник	Одиночный передатчик, одиночный приемник / Двойной передатчик, одиночный приемник	Одиночный передатчик, одиночный приемник / Двойной передатчик, одиночный приемник
Высочайшая модуляция	256 QAM для нисходящего канала, 64 QAM для восходящего канала	64 QAM (256 QAM опционально)	64 QAM (256 QAM опционально)
Максимальная скорость передачи данных (DL)	2,3 Гбит/с	220 Мбит/с	10 Мбит/с
Максимальная скорость передачи данных (UL)	468 Мбит/с	120 Мбит/с	10 Мбит/с

Обзор возможностей технологии NR RedCap фаза 1/фаза 2 представлен в табл. 3, приведены данные спецификаций 3GPP TR 23.700-68 релиза Rel.18 [5]

Релиз 18 3GPP включает в себя дальнейшее развитие 5G RedCap, завершение которого запланировано на 2–3 квартал 2024 г. [6]. Это включает в себя дополнительные

сокращения сложности, которые должны расширить спецификацию RedCap, приблизив ее к возможностям LTE Cat 1. Однако, учитывая доступность сети и наборов микросхем после того, как 3GPP опубликует новую версию, выход на рынок устройств фазы 2 на базе Rel. 18, скорее всего, произойдет до 2028 г. [7, с. 41]. Сегодня на рынке IoT вышел модем NR-RedCap Snapdragon X35 Qualcomm, который обратно совместимый и с LTE (Cat-4). На выставке Mobile World Congress 2024 компания MediaTek презентовала модем M60 и платформу MediaTek T300 для устройств RedCap (фаза 1).

Заключение

Тестирование и внедрение технологии RedCap на фрагментах сетей 5G операторам мобильной связи России необходимо проводить с появлением коммерческих устройств Интернета вещей NR-RedCap. Разработчикам отечественного оборудования 5G работы по оборудованию RedCap целесообразно начать с учетом доступности чипсетов из дружественных России стран (Китай, ОАЭ и Индия). Компания Fibocom (Китай) в начале 2024 г. представила серию модулей RedCap FG132-NA для подключения к сети 5G RedCap среднего уровня согласно Rel.17 3GPP. Это может стать отправной точкой работ в области IoT на сетях 5G России.

Список литературы

1. Тихвинский В.О., Девяткин Е.Е., Пастух А.С., Савочкин А.А., Смирнов Ю.Я. Применение технологии RedCap для оказания услуг IoT в сетях мобильной связи 5G // Первая мила. 2024. № 1. С. 58–66.
2. ETSI 3GPP TR 38.875. Technical Specification Group Radio Access Network; Study on support of reduced capability NR devices. Release 17. Version 17.0.0. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/3733> (дата обращения: 21.02.2024).
3. Toward Smaller and Lower-Cost 5G Devices with Longer Battery Life: An Overview of 3GPP Release 17 RedCap // IEEE Communications Standards Magazine, 2022. Vol. 6, Issue 3. [Электронный ресурс]. URL: <https://icceexplore.ieee.org/document/9927258> (дата обращения: 1.03.2024).
4. 5G NR RedCap: The Advanced IoT for 5G Network, 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://stellarix.com/article/5g-nr-redcap-the-advanced-iot/12ruf354.pdf> (дата обращения: 1.03.2024).
5. ETSI 3GPP TR 23.700-68 Study on Support of reduced capability NR devices; Phase 2, Release 18. Version 18.1.0, 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/3996> (дата обращения: 12.01.2024).
6. The evolution of cellular technologies for Internet of Things applications in the 5G Era – the importance of 5G NR RedCap, 2022. [Электронный ресурс]. URL: https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/5G-red-cap_whitepaper_online.pdf (дата обращения: 12.03.2024).
7. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А., Девяткин Е.Е. Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G: Проекты, технологии, архитектура. М.: Техносфера, 2023. 528 с.