



ISSN: 2686-7567

2023
№4(34)

ВЕСТНИК ГГТУ

Технические науки

| info@gstou.ru | www.gstou.ru



ISSN: 2686-7567

ВЕСТНИК ГГНТУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

HERALD OF GSTOU

ENGINEERING SCIENCES

SCIENTIFIC & TECHNICAL JOURNAL

2023

Том XIX

№ 4 (34)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

д. т. н., профессор Минцаев Магомед Шавалович

Зам. главного редактора – д. т. н., профессор
С-А. Ю. Мургазаев

Ответственный секретарь – д. т. н., доцент
М.Ш. Саламанова

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель – профессор, д. ф-м. н.
И. А. Керимов (АН ЧР)

д. т. н., профессор, член-корреспондент РАН
Б. А. Григорьев (ВНИИГаз)

д. т. н., профессор Д. С. Реченко (АГНИ)

к. т. н., доцент М. Я. Пашаев (ГТНТУ)

к. т. н., доцент М. С. Сайдумов (ГТНТУ)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Строительство. Архитектура

д. т. н., профессор Д. К-С. Батаев

д. т. н., профессор Г. Н. Хаджишалапов

д. т. н., доцент И. Г. Гайрабеков

д. т. н., профессор Х. Н. Мажиев

канд. архитектуры, доцент Ш. А. Насуханов

д. т. н., профессор Т. А. Хежев

Химическая технология

д. т. н., доцент С. П. Иванов

д. т. н., профессор Л. Ш. Махмудова

д. х. н. Х. М. Кадиев

д. т. н., профессор Х. Х. Ахмадова

д. т. н., профессор О. Н. Каратун

д. х. н., профессор Э. А. Александрова

к. т. н., доцент А. А. Эльмурзаев

Информатика, вычислительная техника и управление

д. п. н., профессор Э. Д. Алисултанова

д. т. н., доцент И. Н. Ажмухамедов

д. т. н., профессор А. В. Илюхин

к. т. н. М. Р. Исаева

д. т. н., профессор В. И. Марсов

д. т. н., профессор К. Е. Румянцев

д. т. н., профессор А. Л. Рутковский

д. т. н., профессор Е. А. Хадзарагова

к. т. н., доцент И. В. Хасамбиев

д. т. н. М. А. Хажмуратов

к. т. н. З. Л. Хакимов

EDITOR – IN-CHIEF

Magomed Mintsaeв, Doctor in Engineering

Associate Editor – Said-Alvi Murtazaev, Doctor
in Engineering

Executive Secretary – Madina Salamanova, Doctor
in Engineering

EDITORIAL COUNCIL

Chairman – Ibragim Kerimov, Doctor in Physics
and Mathematics

Boris Grigoryev, corresponding member of RAS,
Doctor in Engineering

Rechenko Denis, Doctor in Engineering

Magomed Pashaev, Phd in Engineering

Magomed Saidumov, Phd in Engineering

EDITORIAL BOARD

Construction. Architecture

Dena Bataev, Doctor in Engineering

Khadzhishalapov Gadzhimagomed, Doctor in Engineering

Ibragim Gayrabekov, Doctor in Engineering

Khasan Mazhiev, Doctor in Engineering

Shadid Nasukhanov, PhD in Architecture

Tolya Khezhev, Doctor in Engineering

Chemical Technology

Serguey Ivanov, Doctor in Engineering

Lyubov Makmudova, Doctor in Engineering

Khusain Kadiev, Doctor in Chemistry

Khava Akhmadova, Doctor in Engineering

Olga Karatun, Doctor in Engineering

Elvira Alexandrova, Doctor in Chemistry

Ayub Elmurzaev, PhD in Engineering

Computer Science, Computer Engineering and Management

Esmira Alisultanova, Doctor in Pedagogics

Iskandar Azhmukhamedov, Doctor in Engineering

Madina Isaeva, PhD in Engineering

Andrey Ilyukhin, Doctor in Engineering

Vadim Marsov, Doctor in Engineering

Konstantin Rumyantsev, Doctor in Engineering

Alexander Rutkovsky, Doctor in Engineering

Elena Khadzaragova, Doctor in Engineering

Manap Khazhmuradov, Doctor in Engineering

Ibragim Khasambiev, PhD in Engineering

Zaur Khakimov, PhD in Engineering

Учредитель: ФГБОУ ВО

«Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова»

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Российской Федерации (с 15.02.2022 г.), в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), доступный в интернете, по адресу <http://www.elibrary.ru> (Научная электронная библиотека).

Подписной индекс АО «Почта России» ПА 753

Адрес редакции/издателя:

364024, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100

Тел./факс: (8712) 29-44-06

<http://gstou.ru/science/ggntu-works.php>

e-mail: trudy-ggntu@mail.ru

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

© ФГБОУ ВО Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. академика М.Д. Миллионщикова, 2023

© Редакционная коллегия

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Гончаров Д.В., Иващук О.А., Долгих Е.А., Гончарова И.И.

Разработка информационной системы для моделирования и визуализации роста сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата 5

Моргоева А.Д., Гудиев Т.Т., Хасцаев Б.Д., Хмара В.В.

Повышение эффективности функционирования автоматизированной системы диспетчерского управления с помощью разработки подсистемы прогнозирования электрической нагрузки на примере подстанции 110 кВ 15

Назари А., Данешманд Б., Мохаммади Р.

Энергосберегающая маршрутизация в сетях интернета вещей, сочетающая нечеткую систему и муравьиную колонию 26

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Воробьев А.Е., Мадаева М.З., Кожоголова Г.К., Удаева М.С-А.

Особенности механизмов формирования наночастиц в горной массе 39

Дадашев Р.Х., Джамбулатов Р.С., Элимханов Д.З.

Поверхностное натяжение тройных и четверных растворов органических веществ 49

Риккер Ю.О., Кузнецова Н.С., Кобылкин М.В., Салогуб Е.В., Дарбинян З.Г.

Использование цеолита в качестве фильтра в установке для определения концентрации бенз(а)пирена 58

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Висханов С.С., Сапаев Х.Х., Гацаев З.Ш., Точиев Д.С.

Использование минеральных наполнителей в полимерных композитах на основе полиамида 67

Нго Суан Хунг, Б.И. Булгаков, ЛЕ Чунг Хиеу

Определение коэффициента массопроводности гидроксидов кальция в бетоне для морских сооружений 76

Федоров В.Т., Кокоев М.Н., Илюхин А.В.

Гидротурбина – источник тепловой энергии для производства энергоемких стройматериалов 85

Рябков А.В., Тараканов А.Н., Хубаева Г.П.

Эффективность использования универсального автоматизированного укладчика в условиях крайнего севера и Арктики 96

Федосов С.В., Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М.Ш.

Термодинамический расчет реакционной способности минеральных порошков в щелочной среде 104

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

- D.V. Goncharov, O.A. Ivashchuk, E.A. Dolgich, I.I. Goncharova**
Development of an information system for modeling and visualization of crop growth under climate change5
- A.D. Morgoeva, T.T. Gudiev, B.D. Khastsaev, V.V. Khmara**
Increasing the efficiency of the automated dispatch control system by developing an electrical load prediction subsystem using the example of a 110 kv substation 15
- A. Nazari, B. Daneshmand, R. Mohammadi**
An energy-aware routing in internet of things networks combining fuzzy system and ant colony 26

CHEMICAL TECHNOLOGIES

- A.E. Vorobyov, M.Z. Madaeva, G.K. Kozhogulova, M.S-A. Udaeva**
Features of the mechanisms of nanoparticles in rock mass formation..... 39
- R.Kh. Dadashev, R.S. Dzhambulatov, D.Z. Elimkhanov**
Surface tension of ternary and quaternary solutions of organic substances 49
- Yu.O. Rikker, N.S. Kuznetsova, M.V. Kobylkin, A.G. Batukhtin, Z.G. Darbinyan**
Using zeolite as a filter in a device for determining the benz(a)pyrene concentration 58

CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

- S.S. Vikhanov, Kh.Kh. Sapaev, Z.Sh. Gatsaev, D.S. Tochiev**
Use of mineral fillers in polyamide-based polymer composites 67
- Ngo Xuan Hung, B.I. Bulgakov, Le Chung Hieu**
Determination of the mass conductivity coefficient of calcium hydroxides in concrete for marine structures 76
- V. T. Fedorov, M.N. Kokoev, A.V. Ilyukhin**
Water turbine as a source of thermal energy for energy intensive building materials production 85
- A.V. Ryabkov, A.N. Tarakanov, G.P. Khubaeva,**
Effectiveness of use of a universal automated stacker in the far north and arctic conditions 96
- S.V. Fedosov, S-A. Yu. Murtazaev, M.Sh. Salamanova**
Thermodynamic calculation of the reactivity of mineral powders in an alkaline environment 104

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.9:504.056

DOI: 10.26200/GSTOU.2023.46.48.006

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РОСТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

© Д.В. Гончаров, О.А. Иващук, Е.А. Долгих, И.И. Гончарова
Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия

Цифровая трансформация растениеводства является частью федеральной стратегии, направленной на адаптацию сельскохозяйственных территорий к изменениям климата и получению стабильно высокого урожая посредством внедрения цифровых технологий Индустрии 4.0 и платформенных решений. В статье рассматриваются основные аспекты технологий моделирования и визуализации сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата, вызванного парниковым эффектом. Исследуются подходы к визуализации построения поэтапного роста сельскохозяйственных культур, структура и функции которых позволяют провести оперативный анализ интеграции факторов окружающей среды, влияющих на эффективность развития культур. Применение технологии дополненной реальности позволит визуализировать рост и развитие сельскохозяйственных культур с максимально возможным количеством параметров, тем самым моделируя не только рост и развитие сельскохозяйственных растений, но и саму среду, в которой они растут. Проводимое исследование направлено на возможность применения предлагаемой информационной системы в растениеводческой отрасли сельского хозяйства и в ряде других сфер. В работе предложен прототип инструментария, который позволит модернизировать процесс принятия решений при проведении посевных работ благодаря учету влияния динамики парниковых газов в приземном слое атмосферы на фотосинтетическую активность сельскохозяйственных растений.

Ключевые слова: моделирование; сельскохозяйственные культуры; визуализация; поэтапный рост сельскохозяйственных культур; парниковый эффект.

Формат цитирования: Гончаров Д.В., Иващук О.А., Долгих Е.А., Гончарова И.И. Разработка информационной системы для моделирования и визуализации роста сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX, №4 (34). С. 5-14. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.46.48.006

В эпоху цифровизации сельского хозяйства вопрос принятия решений становится ключевым в аграрной науке и практике, сталкиваясь при этом со сложностью одновременного учета различных факторов. Эти факторы характеризуются множественностью аспектов, полиструктурностью; они охватывают разные периоды, принимая во внимание сезонность и меняющиеся погодные условия; их можно отметить многомерностью, большим

количеством параметров и показателей [1, 2]. Вышесказанное указывает на необходимость использования современных цифровых технологий, перспективных методов моделирования, которые позволят не только определять урожайность сельскохозяйственных культур на исследуемой территории, но и формировать и визуализировать управленческие решения, направленные на стабильное получение высокой урожайности растений и обеспечение про-

довольственной безопасности страны.

Современные автоматизированные системы, функционирующие в агропромышленном комплексе, должны быть наделены функциями прогнозирования и интеллектуального анализа данных, обеспечивать регулярное обновление и оперативный анализ результатов прогноза на базе отраслевых центров мониторинга. Одной из важнейших функций при актуализации автоматизированных систем данного класса становится визуализация результатов мониторинга и моделирования [3]. Эффективное использование наглядного пространственного представления сложных природно-технологических процессов способствует оперативному выявлению проблем и разработке научно обоснованных сценариев управления [3, 4].

Одной из важных и широко обсуждаемых экологических проблем настоящего времени является парниковый эффект (ПЭ), влияние которого на состояние окружающей среды усиливается с развитием производственных, сельскохозяйственных технологий. Основным фактором, воздействующим на динамику ПЭ, является концентрация парниковых газов (ПГ) в атмосфере, а точнее – углекислого газа, который задерживает тепловое излучение и способствует климатическим изменениям [5]. Но существует и положительная сторона, крайне важная для стран: Россия, Польша, Чехия, Германия, Канада, у которых большая часть территории относится к зонам рискованного земледелия. Это связано с влиянием ПЭ на гумусовое состояние почвы и увеличение фотосинтетической активности растений.

Эффективное управление развитием роста сельскохозяйственных культур с учетом условий изменения климата возможно благодаря использованию современных цифровых технологий, средств автоматизации и моделирования, построения на этой основе оценки и визуализации роста и развития растений для последующей передачи обработанной информации лицу, принимающему решения.

Так, на данный момент существуют способы оценки фотосинтетической активности и последующей продуктивности растений. Одним из возможных способов является метод

дистанционного зондирования сельскохозяйственных территорий [6, 7]. В основе предложенных в настоящий момент времени методов оценки урожайности сельскохозяйственных культур часто лежит использование регрессионных моделей, при помощи которых возможно установить зависимости урожайности от дистанционно измеренных значений нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (1).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где NIR и RED – значения коэффициента спектральной яркости в красном и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн [1].

Для решения задачи прогнозирования урожайности культур эффективно применяется анализ результатов моделирования многолетних рядов урожайности на основе динамико-стохастической многоуровневой трендовой модели. Так, использование алгоритма вычисления отклонений эмпирических данных от значений тренда нижних уровней временного ряда и построения закона распределения вероятностей в виде функции Пирсона III типа позволяет учесть разнообразные риски, которые связаны с трендами возрастания либо снижения урожайности.

Однако ни одна из моделей не учитывает изменение параметров приземного слоя атмосферы. Так, на данный момент не существует методов и моделей оценки продуктивности растений в условиях динамики ПЭ. С участием авторов предложен метод оценки продуктивности территорий на основе оценки приземного слоя атмосферы посредством использования нечеткой логики и гибридных нейронных сетей [2, 3, 4].

Визуализация результатов моделирования развития сельскохозяйственных культур в условиях динамики ПЭ позволяет провести оперативный анализ интеграции факторов окружающей среды, доступности водных ресурсов и минералов, фотосинтетической активности, влияния техносферы без проведения затратных и трудоемких полевых экспериментов. Использование таких технологий позволяет

моделировать не только рост и развитие сельскохозяйственных растений, но и окружающую среду, в которой они развиваются.

Авторским коллективом предлагается создание соответствующей базы данных 3D моделей сельскохозяйственных культур, которая может стать основой для разработки информационной системы по визуализации роста и развития сельскохозяйственных растений в условиях динамики ПЭ, основным аспектом которой является использование технологии дополненной реальности. Выбор соответствующей 3D модели из базы данных происходит за счет нечеткой оценки продуктивности территории в условиях динамики ПЭ, которая включает в себя почвенную эмиссию и фотосинтетическую активность сельскохозяйственных растений на исследуемой территории [4]. Визуализация сельскохозяйственных растений необходима лицам, принимающим решения для своевременной корректировки агротехнических планов выращивания и обеспечения высокой продуктивности территории.

Учет рассеивания и накопления ПГ в приземном слое атмосферы необходим из-за влияния на процесс фотосинтеза сельскохозяйственных растений. Для развития растений и формирования урожая необходимо органическое вещество, которое образуется благодаря воде, содержащейся в почве, и углекислому газу из приземного слоя атмосферы. Таким образом, выявление зон, которые в большей

степени подходят для произрастания тех или иных культур, позволяет своевременно проводить адаптационное зонирование сельскохозяйственных территорий для обеспечения стабильной урожайности [3].

Для визуализации роста и развития сельскохозяйственных растений с использованием дополненной реальности информационная система строится на основе следующих основных компонентов:

1. подсистема трекинга, отвечающая за отображение объекта в реальном мире;
2. база данных, предназначенная для хранения трехмерных моделей сельскохозяйственных культур, представленных в разных этапах роста, и другой релевантной информации;
3. подсистема визуализации, обеспечивающая отображение сельскохозяйственных культур, располагающихся в базе данных (хранилище объектов) с помощью компьютерной графики;
4. графический интерфейс информационной системы необходим для ввода параметров пользователем и визуализации результатов работы (рисунок 1).

При использовании оптического слежения видеосигнал с камеры передается в подсистему отслеживания. В этой подсистеме производится анализ отдельных кадров для определения наличия определенного маркера. Затем происходит вычисление матрицы преобразования модели, которая включает в себя измене-



Рис. 1. Схематичное представление информационной системы для визуализации роста и развития сельскохозяйственных культур в условиях динамики ПЭ

ние масштаба, вращение и перемещение. Это позволяет определить начальное положение отображаемого объекта в пространстве. Для преобразования 3D моделей необходимо сначала определить координаты точек объектов в трехмерном пространстве с использованием канонической системы координат. Затем вычисляются координаты соответствующих точек на плоскости изображения 3D модели, которые отображают положение пикселей.

Этот расчет выполняется через следующие преобразования:

1. Преобразование камерой осуществляется путем перевода пространственных координат в систему координат, связанную с камерой.

2. Проекционное преобразование проецирует все точки из пространства камеры на квадрат с координатами x и y в диапазоне от -1 до 1.

3. Оконное преобразование преобразует изображение в пиксельные координаты.

Преобразование сводится к параллельному переносу и повороту в трехмерном пространстве и производится согласно формуле

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ 1 \end{bmatrix} = M_{cam}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где

$$M_{cam} = \begin{bmatrix} \vec{u} & \vec{v} & \vec{w} & \vec{s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} x_u & y_u & z_u & 0 \\ x_v & y_v & z_v & 0 \\ x_w & y_w & z_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_s \\ 0 & 1 & 0 & -y_s \\ 0 & 0 & 1 & -z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

(x, y, z) – координаты точки объекта в системе координат сцены, (u, v, w) – координаты точки объекта в системе координат камеры.

Допустим, камера находится в начале координат, и взгляд направлен в противоположную ось z сторону \vec{s} . В этом случае при проекции размер изображения объекта на экране будет пропорционален $1/z$. Чтобы получить более точное значение, используется следующая формула:

$$y_s = \frac{d}{z} y \quad (4)$$

Для представления проекционного преобразования в виде произведения матриц мы рассматриваем вектор $[x \ y \ z \ w]^T$, где каждая координата представляет точку с координатами $(x/w, y/w, z/w)$. Здесь использование w в знаменателе позволяет вычислять так называемые дробно-линейные функции от x, y, z при условии, что знаменатель одинаков для всех координат точки в формулах преобразований.

Формулы для расчета выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{a_1x + b_1y + c_1z + d}{ex + fy + gz + h} \\ y' &= \frac{a_2x + b_2y + c_2z + d}{ex + fy + gz + h} \\ z' &= \frac{a_3x + b_3y + c_3z + d}{ex + fy + gz + h} \end{aligned} \quad (5)$$

Данные формулы для выражения проекционного преобразования можно выразить в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \\ \tilde{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{и } (x', y', z', x', y', z') = \left(\frac{\tilde{x}}{\tilde{w}}, \frac{\tilde{y}}{\tilde{w}}, \frac{\tilde{z}}{\tilde{w}}, \frac{\tilde{x}}{\tilde{w}}, \frac{\tilde{y}}{\tilde{w}}, \frac{\tilde{z}}{\tilde{w}} \right),$$

если камера расположена в начале координат, а направление взгляда противоположно оси z . Получаем выражение для «матрицы перспективы», учитывая, что плоскость изображения находится на расстоянии p .

Структура информационной системы

Авторским коллективом была разработана следующая информационная система, архитектура которой представлена на рисунке 2. Входными параметрами для функционирования информационной системы по визуализации роста и развития сельскохозяйственных культур в условиях динамики ПЭ являются метеорологические, почвенные и техносферные параметры, которые указываются пользователем. Используемый севооборот и технология обработки почвы отмечаются пользователем для определения питательного режима расте-

ний и улучшения фитосанитарных условий в севообороте. Проводимый интеллектуальный мониторинг динамики парниковых газов, формируемый соседствующими с исследуемой территорией техносферными стационарными источниками, позволяет визуализировать концентрацию ПГ в приземном слое атмосферы [8, 9]. Результатом работы информационной системы является визуализация сельскохозяйственной культуры относительно смоделированных внешних условий.

Данная схема включает в себя следующие подсистемы.

В подсистеме обработки информации происходит построение этапов роста сельскохозяйственных культур, также пользователем в подсистеме ввода информации осуществляется ввод почвенных показателей и текущей влагообеспеченности территории, осуществляется выбор сельскохозяйственных культур и вызов ее 3D модели из соответствующей базы данных [10, 11, 12]. Каждая сельскохозяйственная культура в базе данных представлена относительно четырех этапов роста, а также реакция растений на окружающую среду показана на рисунке 3.

Далее на основании введенных пользователем почвенных показателей, указания текущего севооборота и данных интеллектуальной системы мониторинга по рассеиванию и накоплению ПГ в приземном слое атмосферы осуществляется комплексная оценка продуктивности территории и выбор 3D модели сельскохозяйственной культуры, определяющей эффективность произрастания на данной территории, из базы данных [13, 14, 15]. Это позволяет сформировать конкретное управляющее воздействие на исследуемой территории относительно выбранной сельскохозяйственной культуры, подобрать наиболее оптимальные в данных условиях технологии высадки и обработки, сформировать рекомендации по выбору севооборота и плана внесения удобрений для обеспечения повышения эффективности развития культур. Следует отметить, что в местах с повышенной концентрацией CO_2 и бедными показателями почвы может быть рекомендована высадка карбоновых растений для поглощения и накопления почвой CO_2 , что способствует обогащению гумусового слоя и дальнейшему использованию территории в сельскохозяйственной деятельности.

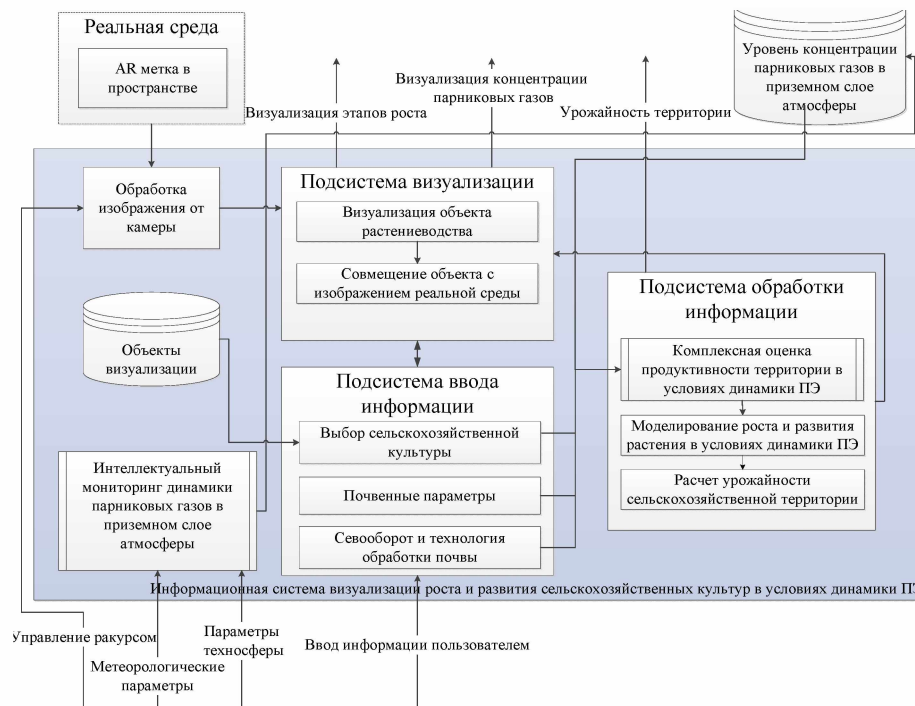


Рис. 2. Архитектура информационной системы по визуализации роста и развития сельскохозяйственных культур в условиях динамики ПЭ

В подсистеме визуализации осуществляется отображение моделей сельскохозяйственных культур для каждого из четырех этапов развития растения, представленных в соответствующей базе данных. Например, визуализация этапов роста растений при благоприятных условиях представлена на рисунке 4.

Использование систем построения 3D моделей роста и развития сельскохозяйственных растений является новой технологией представления информации и взаимодействия лица, принимающего решение, с вычислительным устройством. В результате ее внедрения могут быть результативно использованы для оценки и сравнения принятых управленческих решений по адаптации рассматриваемой аграрной территории, это позволяет оперативно и наглядно прогнозировать эффективность роста и развития сельскохозяйственных растений в определенных условиях, формируемых сочетанием большого количества параметров, максимально сокращать сроки проведения эксперимента, расходы материальных и трудовых ресурсов, снижать негативное влияние на природную среду.

Разработка прототипа программного решения

Использование дополненной реальности позволяет исключить моделирование окружения за счет использования устройства с камерой, на котором установлено специальное про-

граммное обеспечение. Макеты интерфейсов представлены на рисунке 5.

Создан прототип мобильного приложения на базе технологии дополненной реальности для визуализации роста и развития сельскохозяйственных культур на исследуемой территории, а также для визуализации результатов пространственно-временного распределения ПГ. Интерфейсы данного приложения представлены на рисунке 6.

Программная реализация визуализации состояния растений в виде объектов дополненной реальности использует динамические параметры в зависимости от геоинформационных данных для отображения концентрации ПГ и специальной метки для визуализации сельскохозяйственной культуры. Для работы программного решения необходимо определение местоположения, что достигается благодаря приемнику GPS, который в большинстве случаев установлен на современных мобильных платформах.

В данной работе рассмотрено применение технологии 3D моделирования в сельском хозяйстве, а также визуализации результатов моделирования роста и развития растений, оценки и сравнения сформированных адаптационных решений.

Использование разработанных методов и программного инструментария позволит усо-

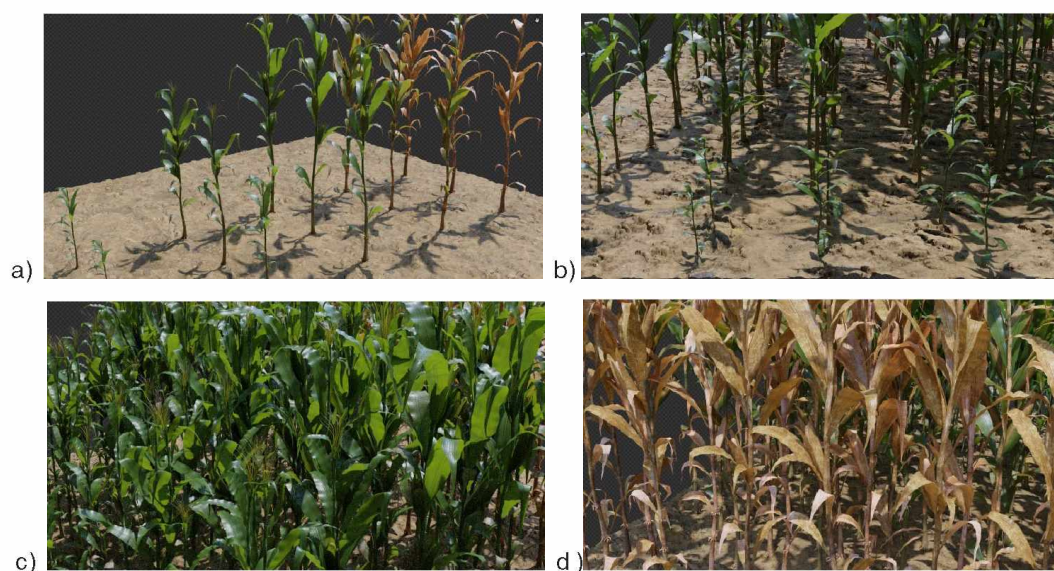


Рис. 3. Трехмерные модели кукурузы на разных этапах роста

вершенствовать процесс посевных работ сельскохозяйственными предприятиями, а также позволит добиться повышения эффективности развития сельскохозяйственных культур благодаря научно обоснованному зонированию сельскохозяйственных территорий в условиях динамики изменения климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №22-11-20016) «Разработка и исследование интеллектуальной системы поддержки принятия решений по адаптации сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта».

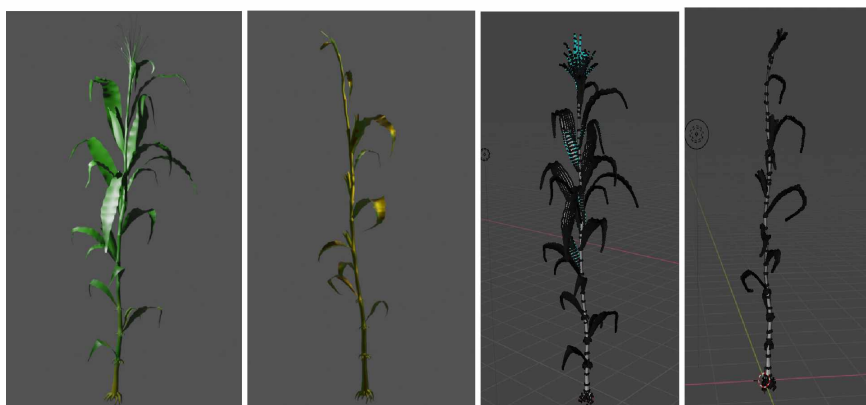


Рис. 4. Трехмерные модели развития и роста кукурузы

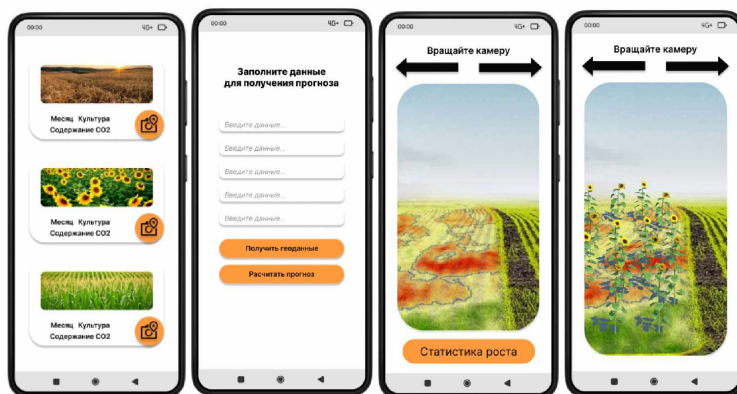


Рис. 5. Макеты пользовательского интерфейса

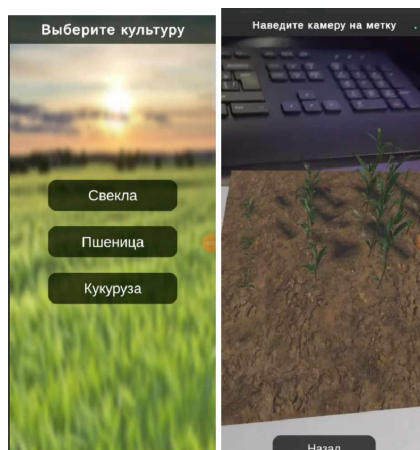


Рис. 6. Пользовательский интерфейс приложения

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ерошенко Ф.В.* Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе вегетационного индекса фотосинтетического потенциала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. №4. С. 99.
2. *Иващук О.А., Федоров В.И., Гончаров Д.В.* Разработка метода и алгоритма оценки сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта // Инновационные технологии в науке и образовании (с. Дивноморское, 26 сентября 2022 г.). Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «ДГТУ-ПРИНТ», 2022. С. 232-236.
3. *Иващук О.А.* Метод комплексной оценки состояния сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта на основе технологии искусственного интеллекта / *О.А. Иващук, Д.В. Гончаров, В.И. Федоров, О.И. Гурьянова* // Современные наукоемкие технологии. 2023. №2. С. 59-65.
4. *Иващук О.А.* Цифровые технологии для оценки и прогнозирования влияния пространственно-временного распределения парниковых газов на фотосинтетическую активность сельскохозяйственных культур / *О.А. Иващук, О.Р. Кузичкин, Д.В. Гончаров, В.А. Дунаева* // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27. №1. С. 38-56.
5. *Кванин Д.А.* Подходы к управлению экологической безопасностью дворовых территорий // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2014. Т. 1. №6. С. 62-66.
6. *Волкова С.Н.* Метод имитационного моделирования экологического прогнозирования // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. №9. С. 171-174.
7. *Кособрюхов А.А.* Активность фотосинтетического аппарата при периодическом повышении концентрации CO₂ // Физиология растений. 2009. Т. 56. №1. С. 8-16.
8. *Хаджиева Л.К.* Концепция систем ИОТ для сельскохозяйственных услуг с высокой степенью автономии / *Л.К. Хаджиева, М.Р. Хаджиев, А.Т. Исрахимова* // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. №3 (25). С. 10-20.
9. *Богачев А.И.* Зонирование сельских территорий Орловской области на основе диагностики уровня устойчивости их развития // Вестник аграрной науки. 2016. Т. 61. №4. С. 42-52.
10. *Шичкин А.В.* Искусственные нейронные сети для прогнозирования изменения приземных концентраций основных парниковых газов // Экологические системы и приборы. 2021. №9. С. 10-18.
11. *Тасболат Б., Зулпанов Ш.М.* Районирование земель сельскохозяйственного назначения по использованию // Геология, география и глобальная энергия. 2011. №2. С. 284-287.
12. *Быкова А.В.* Влияние изменения климата на сельское хозяйство // Естественные и математические науки в современном мире. 2014. №14. С. 114-121.
13. *Кудяров В.Н.* Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. №9. С. 1049-1049.
14. *Мариев О.С., Давидсон Н.Б., Емельянова О.С.* Влияние урбанизации на выбросы углекислого газа в регионах России // Journal of Applied Economic Research. 2020. Т. 19. №3. С. 286-309.
15. *Зархматова М.Ш.* Применение ИОТ технологии в образовательном секторе / *М.Ш.*

Зархматова, З.С. Занаева, А.М. Ульбиев // Образование будущего: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Грозный, 24-25 ноября 2022 года. Грозный: Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, 2022. С. 80-85.

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR MODELING AND VISUALIZATION OF CROP GROWTH UNDER CLIMATE CHANGE

© D.V. Goncharov, O.A. Ivashchuk, E.A. Dolgich, I.I. Goncharova
Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

The digital transformation of crop production is part of the federal strategy aimed at adapting agricultural territories to climate change and obtaining a stable high yield through the introduction of digital technologies of Industry 4.0 and platform solutions. The article discusses the main aspects of technologies for modeling and visualization of agricultural crops in the conditions of climate change caused by the greenhouse effect. The approaches to visualization of the construction of a phased growth of agricultural crops are investigated, the structure and functions of which will allow for an operational analysis of the integration of environmental factors affecting the effectiveness of crop development. The use of augmented reality technology will allow you to visualize the growth and development of crops with the maximum possible number of parameters, thereby modeling not only the growth and development of agricultural plants, but also the environment in which they grow. The research is aimed at the possibility of using the proposed information system in the crop industry of agriculture and in a number of other areas. The paper proposes a prototype of a toolkit that will modernize the decision-making process during sowing operations by taking into account the influence of greenhouse gas dynamics in the surface layer of the atmosphere on the photosynthetic activity of agricultural plants.

Keywords: modeling; agricultural crops; visualization; gradual growth of agricultural crops; greenhouse effect.

REFERENCES

1. Eroshenko, F.V. (2016). "Possibilities of remote assessment of winter wheat yield based on the vegetative index of photosynthetic potential", *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. Vol. 13, №4, pp. 99.
2. Ivashchuk, O. A., Fedorov, V.I. and Goncharov, D.V. (2022). "Development of a method and algorithm for assessing agricultural territories under the dynamics of the greenhouse effect", *Innovative technologies in science and education*, Divnomorskoye village, September 26, 2022, Rostov-on-Don, pp. 232-236.
3. Ivashchuk, O.A., Goncharov, D.V., Fedorov, V.I. and Guryanova, O.I. (2023), "Method of complex assessment of the state of agricultural territories in the conditions of greenhouse effect dynamics based on artificial intelligence technology", *Modern high-tech technologies*, Vol. 2, pp. 59-65.
4. Ivashchuk, O.A., Kuzichkin, O.R., Goncharov, D.V. and Dunaeva, V.A. (2023). "Digital technologies for assessing and predicting the influence of the spatiotemporal distribution of greenhouse gases on the photosynthetic activity of agricultural crops", *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, Vol. 27, №1, pp. 38-56.
5. Kvashnin, D.A. (2014). "Approaches to environmental safety management of yard territories", *Fundamental and applied research in the modern world*, Vol. 1, №6, pp. 62-66.
6. Volkova, S.N. (2016). "Method of simulation modeling of ecological forecasting", *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*, №9, pp. 171-174.
7. Kosobryukhov, A.A. (2009), "Activity of the photosynthetic apparatus with a periodic increase in the concentration of CO₂", *Plant Physiology*, Vol. 56, №1, pp. 8-16.

8. Khadzhieva, L.K., Khadzhiev, M.R. and Israkhimova, A.T. (2021). "The concept of IOT systems for agricultural services with a high degree of autonomy", *Bulletin of GGNTU. Technical sciences*, Vol. 17. №3 (25), pp. 10-20.
9. Bogachev, A.I. (2016). "Zoning of rural areas of the Orel region based on diagnostics of the level of sustainability of their development", *Bulletin of Agrarian Science*, Vol. 61, №4, pp. 42-52.
10. Shishkin, A. V. (2021). "Artificial neural networks for predicting changes in surface concentrations of major greenhouse gases", *Ecological systems and devices*, №9, pp. 10-18.
11. Tasbolat, B. and Sultanov, Sh.M. (2011), "Zoning of agricultural land for use", *Geology, geography and global energy*, №2, pp. 284-287
12. Bykova, A.V. (2014). "The impact of climate change on agriculture", *Natural and mathematical sciences in the modern world*, №14, pp. 114-121.
13. Kudiyarov, V.N. (2015). "The current state of the carbon balance and the marginal ability of soils to absorb carbon in Russia", *Soil science*, №9, pp. 1049-1049.
14. Mariev, O. S., Davidson, N. B. and Emelyanova, O. S. (2020), "The impact of urbanization on carbon dioxide emissions in the regions of Russia", *Journal of Applied Economic Research*, Vol. 19, №3, pp. 286-309.
15. Zarkhmatova, M.S. (2022). "Application of IOT technology in the educational sector", *Education of the future: Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation*, November 24-25, 2022. Grozny: Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, Grozny, pp. 80-85.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТКИ ПОДСИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПРИМЕРЕ ПОДСТАНЦИИ 110 кВ

© А.Д. Моргоева, Т.Т. Гудиев, Б.Д. Хасцаев, В.В. Хмара

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), Владикавказ, Россия

Повышение эффективности управления электроэнергетическими системами необходимо для поддержания баланса между объемами производства и потребления электроэнергии и является важной и актуальной задачей для народного хозяйства страны. Рыночные отношения генерирующих и потребляющих электроэнергию объектов, внедрение цифровых приборов учета и автоматизация электроэнергетики в целом определяют объективную необходимость совершенствования методов и средств интеллектуальной поддержки принятия решений в процессе управления электропотреблением. В работе представлены результаты исследований по разработке методологической основы для системы поддержки принятия управленческих решений, предназначенной для функционирования в комплексе с автоматизированной системой диспетчерского управления, на примере данных об электрических нагрузках подстанции уровня напряжения 110 кВ. Целью исследования является повышение эффективности управления электропотреблением за счет наличия достоверного прогноза суточных нагрузок на трансформаторной подстанции 110 кВ. В ходе исследования были применены различные методы прогнозирования суточных нагрузок подстанции, такие как сингулярный спектральный анализ для декомпозиции временного ряда на аддитивные составляющие (трендовую, гармоническую и шумовую) и методы машинного обучения для их прогнозирования. Был проведен сравнительный анализ различных вариантов применения указанных методов и сформулированы рекомендации по их применению.

Ключевые слова: прогнозирование, электрические нагрузки, машинное обучение, автоматизация, управление, сингулярный спектральный анализ, трансформаторная подстанция.

Формат цитирования: Моргоева А.Д., Гудиев Т.Т. Повышение эффективности функционирования автоматизированной системы диспетчерского управления с помощью разработки подсистемы прогнозирования электрической нагрузки на примере подстанции 110 кВ // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том 4 (34), №XIX. С.15-25. XX. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.73.61.001

Введение

Учет суточных нагрузок трансформаторной подстанции (ТП) уровня напряжения 110 кВ необходим в процессе управления ТП. Для эффективного использования электрической энергии, соблюдения баланса производства и потребления электрической энергии, обеспечения надежности электроснабжения, составления графика работы основного электрооборудования и обоснования мощности трансформаторов необходимо перспективное планирование электрических нагрузок. Суточный график нагрузок характеризуется вы-

сокой изменчивостью в зависимости от времени суток, сезона года и других составляющих. Поэтому задача повышения эффективности управления режимами работы трансформаторной подстанции за счет прогнозирования суточных нагрузок является актуальной в электроэнергетике. Внедрение систем автоматизации в электроэнергетике позволяет в том числе автоматизировать процесс управления нагрузкой трансформаторов. К таким системам автоматизации относят автоматическое управление нагрузкой, включая оперативное оповещение о перегрузках оборудования и

аварийных ситуациях. Автоматизированные системы диспетчерского управления позволяют оператору в ТП в режиме онлайн отслеживать состояние электроэнергетической системы и вовремя реагировать на внештатные ситуации. Однако помимо управления текущими нагрузками подстанции важной задачей является их перспективное планирование. Прогнозирование как один из способов планирования является эффективным решением в процессе управления объектами различной природы. В электроэнергетике прогнозирование будущего состояния объекта (ТП, промышленного предприятия, объединенной энергосистемы и т.д.) получило широкое распространение начиная с 20-х годов прошлого века до настоящего времени. Обосновано это изменчивостью характера электропотребления, зависимостью величины электропотребления от множества случайных и слабо поддающихся формализации и учету факторов, несоответствие временных рядов электропотребления в большинстве случаев нормальному закону распределения случайной величины и, следовательно, неприменимости гауссовой математической статистики. Повышение требований к уменьшению погрешности прогноза, появление банков данных с ретроспективными значениями электропотребления, доступность вычислительных мощностей и развитие методов интеллектуального анализа данных, установление и функционирование рыночных отношений приобретения, продажи и распределения электрической энергии – все это определяет перспективность исследований в области развития методов прогнозирования электропотребления.

На трансформаторной подстанции в процессе управления электрической нагрузкой информативным дополнением к автоматизированной системе диспетчерского управления будет подсистема поддержки принятия решений. Главными функциональными возможностями такой подсистемы будет прогнозирование нагрузок при различных интервалах упреждения (ИУ). Как известно, в зависимости от ИУ применяют различные методы [15]. С учетом того, что на ТП 110 кВ особенно актуально

оперативное управление, в данной работе рассмотрено краткосрочное прогнозирование (на сутки вперед).

Краткий обзор литературы

При прогнозировании электрических нагрузок исследователи и практики используют различные методы. Выбор метода зависит не только от горизонта прогнозирования, но и от ряда других факторов, к которым относят в том числе специфику рассматриваемого объекта, структуру исходных данных, имеющихся в арсенале исследователя, статистические характеристики выборки (соответствие нормальному закону распределения) и другие факторы. Большое разнообразие методов обосновано отсутствием универсальных методов, позволяющих гарантированно достичь высокой точности прогноза.

Согласно Методике прогнозирования графиков электропотребления для технологий краткосрочного планирования от 14.10.2007, утвержденной ОАО «Системный оператор – Центральное диспетчерское управление Единой энергетической системой» [6], методом моделирования электропотребления как случайного нестационарного процесса является декомпозиция временного ряда электропотребления на регулярную (тренд) и нерегулярные составляющие. К методам декомпозиции временного ряда (ВР) относят сингулярный спектральный анализ (ССА), вейвлет анализ и ряд других. В данном исследовании выбор метода ССА обоснован предшествующим опытом применения и результатами применения ССА для задач прогнозирования электропотребления другими исследователями [1, 3, 5, 8-14]. В литературе методика применения сингулярного спектрального анализа довольно подробно описана в работах [2, 4, 7]. Рассмотрим некоторые из исследований более подробно.

В работе [3] представлены результаты применения сингулярного спектрального анализа для прогнозирования электропотребления мегаполиса. Были проанализированы суточные графики активной мощности г. Москвы, а также графики прогнозных и фактических значений температуры воздуха и естественной освещенности. Разложение рядов на аддитивные состав-

ляющие позволило уменьшить погрешность прогноза, которая составила не более 2%.

Применение сингулярного спектрального анализа позволило повысить эффективность предиктивного управления электропотреблением горного предприятия [8]. Авторы отмечают, что применение ССА не требует больших вычислительных ресурсов, является довольно простым вычислительно, при этом позволяет выделить периодические составляющие процесса электропотребления.

В исследованиях [3, 8] описано применение ССА при краткосрочном прогнозировании (на 24 часа вперед), однако в настоящем исследовании была поставлена задача оценить применимость метода также на краткосрочную перспективу (1 сутки) при анализе суточных нагрузок на трансформаторную подстанцию уровня напряжения 110 кВ. Ранее было проведено исследование [9] по применению ССА для задачи среднесрочного (помесячного) прогнозирования электропотребления горно-металлургического комбината. Результаты, полученные в [9], позволяют отметить эффективность применения ССА (ошибка прогноза уменьшилась на 1% для месячного потребления электроэнергии горно-металлургическим предприятием).

Описание среды реализации исследования и выборки

Исследования проводились по разработанной методике, предусматривающей алгоритм расчета, реализованный в интерактивной платформе Jupyter Notebook на языке программирования Python. Были использованы библиотеки NumPy и Pandas (для вычислений и манипуляций с данными), Matplotlib (для визуализации данных), Scikit-learn, XGBoost и CatBoost (для предобработки данных и загрузки экземпляров моделей регрессии). Для проведения одномерного анализа Фурье и построения периодограмм в рамках реализации ССА был использован программный пакет для статистического анализа STATISTICA 10.

В качестве исходных данных для исследования были использованы суточные нагрузки распределительной трансформаторной подстанции 110 кВ, расположенной на территории РСО-Алания, за месяцы 2023 года. Анализировались суммарные суточные нагрузки, регистрируемые на ТП в 8 часов утра каждые сутки. На рис. 1 представлены графики суточных нагрузок для некоторых месяцев. При анализе этих графиков можно заметить, что величина нагрузки динамически меняется, и предположить, что она зависит от сезона (времени года).

Таблица 1

Описание данных

№ п/п	Название признака	Обозначение
1	Целевая переменная (y) – нагрузка, А	Load
2	Месяц	Month
3	День недели	Day of week
4	Тип дня (рабочий/выходной/предпраздничный)	Type of day
5	Отопительный сезон (да/нет)	Heating season
6	Нагрузка 1 день назад, А	Lag_1
7	Температура воздуха на высоте 2 метра от поверхности земли, °С	T
8	Атмосферное давление на уровне станции, мм.рт.ст.	Po
9	Атмосферное давление, приведенное к среднему уровню моря, мм.рт.ст.	P
10	Барическая тенденция: изменение атмосферного давления за последние 3 часа, мм.рт.ст.	Pa
11	Относительная влажность на высоте 2 метра над поверхностью земли, %	U
12	Скорость ветра на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, м/с	Ff
13	Направление ветра на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, румбы	DD

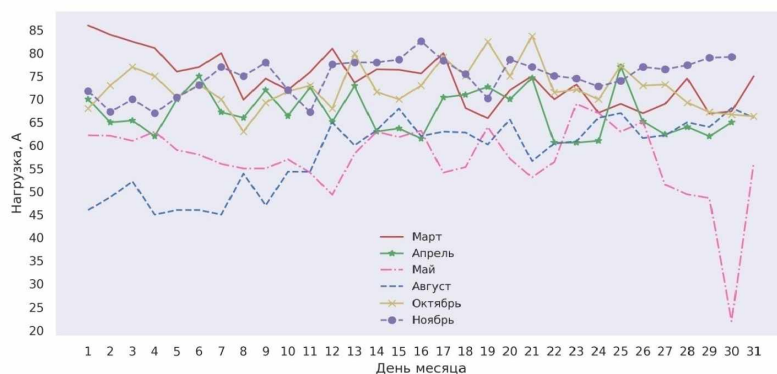


Рис. 1. Графики суточных нагрузок ТП

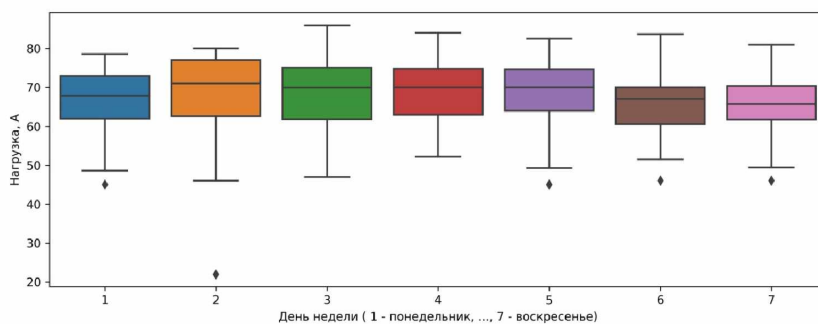


Рис. 2. Распределение суточных нагрузок относительно дня недели

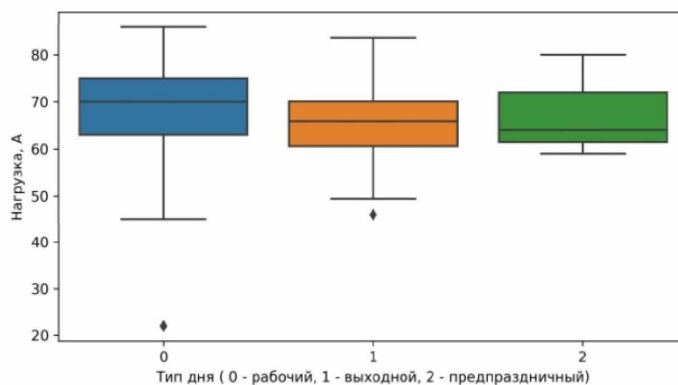


Рис. 3. Распределение суточных нагрузок относительно типа дня

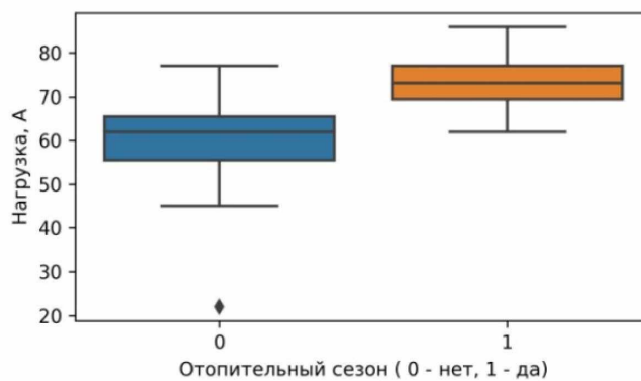


Рис. 4. Распределение суточных нагрузок относительно отопительного сезона

Поэтому к данным нагрузок были добавлены в качестве экзогенных переменных данные:

- фактические метеорологические, зарегистрированные метеодатчиком в 6 утра и взятые из архива погоды gr5.ru;
- календарные (номер месяца, дня, день недели, тип дня – категориальный, имеет значения рабочий/выходной/предпраздничный);
- отопительный сезон – категориальный (имеет значения да/нет).

Все описания данных приведены в табл. 1.

Был проведен анализ исходных данных. Построены диаграммы размаха для визуализации и анализа зависимости величины нагрузки относительно дня недели (рис. 2), типа дня (рис. 3), отопительного сезона (рис. 4). Как можно заметить из диаграмм, суточные нагрузки выше в рабочий день. Относительно дней недели нагрузки также неравномерны. И, как и предполагалось, в отопительный сезон нагрузки выше.

Затем было принято решение проанализировать зависимость целевой переменной (нагрузки) и признаков (табл. 1) и оценить тесноту линейной связи (рис. 5) и нелинейной (рис. 6).

Для этого была построена матрица корреляции признаков и целевой переменной, вы-

числяемая по коэффициенту парной корреляции Пирсона (1).

$$r_{xy} = \frac{xy - x \cdot y}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)}, \quad (1)$$

где r_{xy} – это коэффициент парной корреляции Пирсона, x и y – попарно перебираемые признаки, σ – среднее квадратическое отклонение.

Наибольшая линейная связь между нагрузкой (Load) и отопительным сезоном, также есть связь с лагом в 1 день и обратная линейная зависимость с температурой наружного воздуха.

Был применен метод фильтрации признаков Information Gain. Суть метода состоит в вычислении энтропии информации $H(X)$ по (2) и относительной энтропии $H(Y|X)$ по (3). Затем вычисляется разность значений (4), называемая величиной «получение информации» (Information Gain – IG) или «взаимная информация». Полученная величина характеризует связь между зависимыми переменными и целевым результатом: чем больше значение IG, тем сильнее изменение фактора влияет на изменение целевой переменной. То есть IG, или MI, – это величина, на которую изменя-

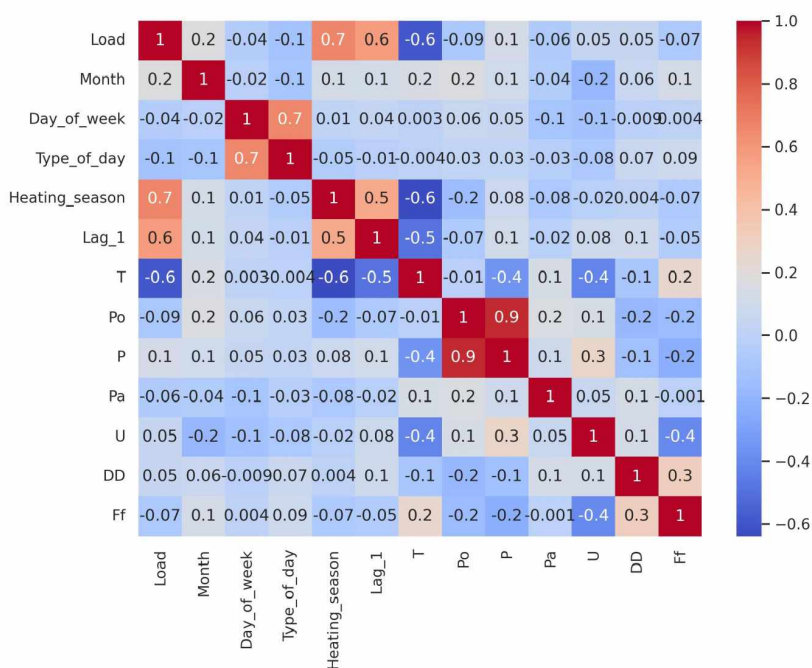


Рис. 5. Матрица корреляций признаков и целевой переменной

ется неопределенность в отношении Y путем информационного прироста каждого фактора относительно целевой переменной (Y).

$$H(X) = -\sum_{x_i \in X} p(x_i) \cdot \log_2(p(x_i)), \quad (2)$$

где $p(x_i)$ – это вероятность того, что переменная X примет значение x_i ,

$$H(Y|X) = \sum_{x_i \in X} p(x_i) \cdot H(Y|X = x_i), \quad (3)$$

где $H(Y|X=x_i)$ – это энтропия, вычисленная для записей, для которых $X=x_i$,

$$G(Y|X) = H(Y) - H(Y|X). \quad (4)$$

На рис. 6 представлена диаграмма отсортированных в порядке убывания по величине IG факторов. Таким образом, самое большое влияние, как несложно было предположить, оказывают ретроспективные данные целевой переменной с лагом в 1 час, номер месяца, отопительный сезон, метеорологические (температура, атмосферное давление, влажность и другие) признаки.

В результате корреляционного анализа и применения метода фильтрации признаков Information Gain из дальнейшего исследования был исключен признак P из-за наличия мультиколлинеарности с фактором P_0 .

Сингулярный спектральный анализ

Для временного ряда электрических нагрузок был проведен сингулярный спектральный анализ с целью разложения ряда на аддитивные составляющие. Для этого согласно методике, подробно описанной в [2, 4], были

выполнены все этапы ССА: разложение и вложение. Далее приведены основные результаты каждого из этапов. На этапе разложения исходный временной ряд был переведен в многомерный. При этом параметр длины окна составил 14 и был определен экспериментально. На рис. 7 представлен график собственных чисел траекторной матрицы, по которому собственные вектора были сгруппированы. Нумерация начинается с 0. Так, к тренду были отнесены 0 и 1 собственные векторы, к периодическим (сезонным) составляющим 4-5, 6-7, 8-9, 11-12, к шумовой все остальные. Однако помимо визуального отнесения компонент (по ступенькам) был применен метод высоких и низких частот для автоматической идентификации тренда и периодических составляющих временного ряда. В приложении STATISTICA 10 был выполнен одномерный анализ Фурье для каждого из собственных векторов, построены периодограммы и подведены итоги.

В табл. 2 представлены значения периодов для каждого собственного вектора: периоды совпадают у 6 и 7, 8 и 9, 11 и 12. Графики этих векторов (кроме 0-й) представлены на рис. 8. По результатам анализа периодограмм и графиков (рис. 8) ряд был разбит на аддитивные составляющие согласно табл. 2.

После удаления шумовой компоненты отклонение исходного ряда от суммы разложенных составило 1,66% по величине средней абсолютной ошибки в процентах (MAPE), вычисляемой по (5), что является допустимым (т.к. $\leq 5\%$).

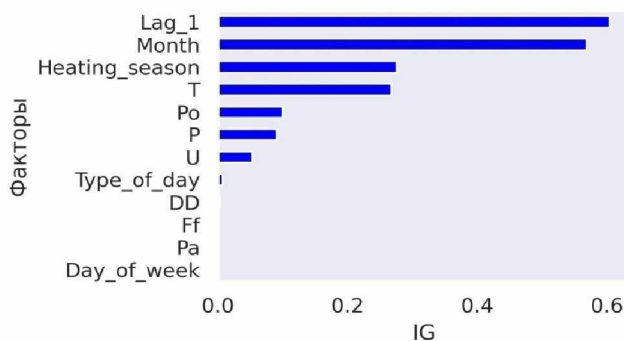


Рис. 6. Диаграмма влияния признаков на целевой результат

Таблица 2

Анализ периодов собственных векторов электрической нагрузки ТП

№ собственного вектора	Период	Составляющая ВР
0	184	Тренд
1	20,44	Периодическая
2	10,82	Периодическая
3	9,2	Периодическая
4	7,07	Периодическая
5	2	Шум
6	2,74	Периодическая
7	2,74	
8	4,973	Периодическая
9	4,973	
10	2,35	Шум
11	3,0667	Периодическая
12	3,0667	
13	2,1647	Шум

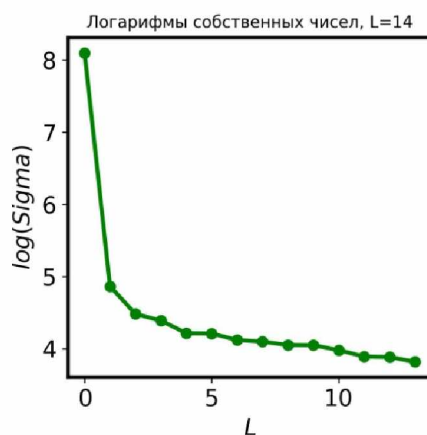


Рис. 7. График логарифмов собственных чисел

$$MAPE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100\% \quad (5)$$

где y_i – это фактическое значение для i -го наблюдения, \hat{y}_i – прогнозируемое значение для i -го наблюдения, n – количество наблюдений.

Таким образом, временной ряд электрических нагрузок был разбит на аддитивные составляющие, шумовая компонента была удалена из ряда без потери качества. Трендовая и периодические составляющие на следующем этапе исследования были спрогнозированы с помощью моделей машинного обучения.

Прогнозирование электрических нагрузок

На этом этапе были загружены экземпляры для последующего обучения модели регрессии случайного леса (Random Forest), экстремального (XGBoost) и категориального (CatBoost) градиентного бустингов. Модель рекуррентной нейронной сети долгой краткосрочной памяти Long short-term memory (LSTM) была создана с использованием библиотеки Keras.

Выбор моделей и нейросетевых архитектур обоснован перспективностью применения указанных алгоритмов, обоснованной в том числе предшествующим исследовательским опытом авторов.

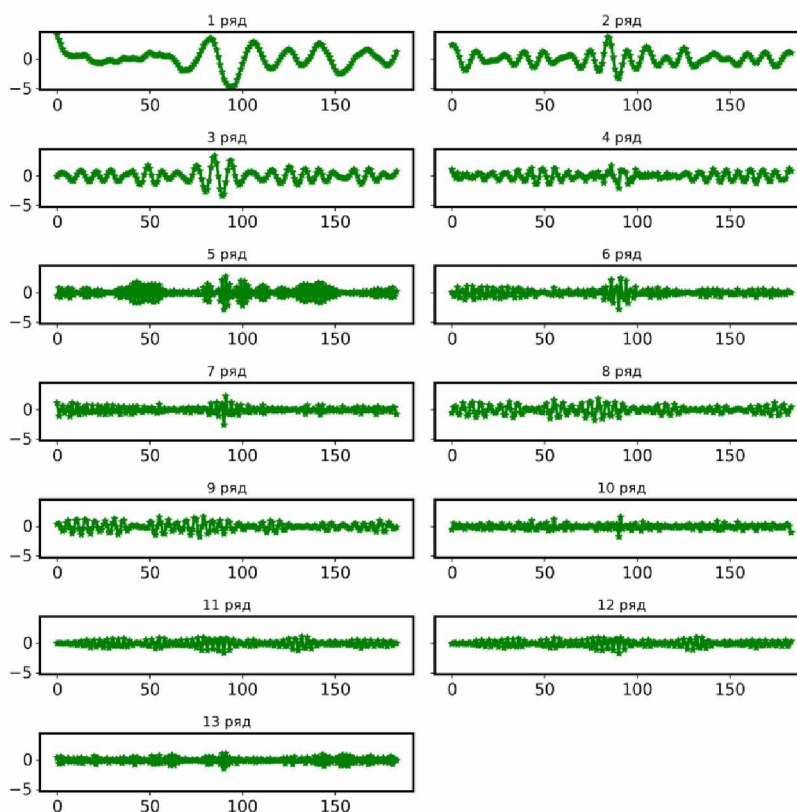


Рис. 8. Графики 1-13 собственных векторов

В качестве метрик качества прогнозов были выбраны средняя абсолютная ошибка в процентах (МАРЕ), вычисляемая по (5), средняя абсолютная ошибка (MAE) и коэффициент детерминации (R^2), рассчитываемые по (6) и (7) соответственно.

$$R^2(y, \hat{y}) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}$$

$$MAE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (6)$$

$$MAE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

Обучающая и тестовая выборки были разделены в соотношении 80:20. Из каждого месяца были взяты 6 дней для тестирования, остальные для обучения моделей. Наилучшей из использованных моделей по метрикам (5-7) оказалась модель экстремального градиентного бустинга (XGBoost). Поэтому в табл. 3 приведены соответствующие значения качества прогнозных моделей, построенные для двух

вариантов: с применением ССА и без ССА для каждого месяца.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что применение сингулярного спектрального анализа позволило уменьшить погрешность прогноза на 0,64%. С учетом того, что рассматривался небольшой временной ряд, полученные результаты сложно интерпретировать как окончательные. Поэтому перспективным направлением для дальнейших исследований является увеличение объема выборки для исследования изменения метрик качества прогнозных моделей. При этом необходим учет данных каждого времени года за несколько ретроспективных периодов.

Заключение

В результате проведенного исследования был выполнен сингулярный спектральный анализ временного ряда электрических нагрузок распределительной трансформаторной подстанции 110 кВ и проведено прогнозирование электрических нагрузок. При этом были использованы как экзогенные, так и эндогенные факто-

ры и оценено их влияние на целевой результат несколькими методами. Прогнозирование было выполнено с помощью модели машинного обучения, основанной на алгоритме экстремального градиентного бустинга. Применение ССА позволило уменьшить погрешность прогноза. Перспективой будущих исследований является поиск решений по минимизации погрешности прогноза за счет увеличения исходной выборки данных. Результаты исследования подтвер-

ждают эффективность разбиения временного ряда электрических нагрузок на аддитивные составляющие с помощью сингулярного спектрального анализа. Достоверность полученных результатов открывает возможность использования ССА в сочетании с методами машинного обучения в качестве методологической основы при разработке подсистемы поддержки принятия решений в процессе управления электрическими нагрузками.

Таблица 3

Результаты метрик качества моделей

Месяц	Метрики качества моделей					
	ССА+ XGBoost			XGBoost		
	MAPE	R ²	MAE	MAPE	R ²	MAE
Март	3,53		4,71	4,09		5,42
Апрель	5,11		7,66	4,72		6,92
Май	3,24		5,54	4,59		7,88
Август	3,19		4,92	4,26		6,67
Октябрь	3,44		4,48	3,13		4,06
Ноябрь	4,76		6,2	4,93		6,37
<i>Среднее значение</i>	<i>5,58</i>	<i>0,65</i>	<i>3,88</i>	<i>6,22</i>	<i>0,53</i>	<i>4,29</i>

ЛИТЕРАТУРА

1. Надтока И.И., Корнюкова О.А. Адаптация метода сингулярного спектрального анализа для прогнозирования временных рядов электропотребления // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2008. №3 (145). С. 88-90.
2. Александров Ф.И., Голяндина Н.Э. Автоматизация выделения трендовых и периодических составляющих временного ряда в рамках метода «Гусеница»-SSA // Exponenta Pro: Математика в приложениях, 2004. №3-4. С. 54-61.
3. Вялова С.А., Надтока И.И. Анализ погрешности гибридной модели краткосрочного прогнозирования электропотребления г. Москвы // Пром-Инжиниринг: труды VII Всероссийской научно-технической конференции, Москва, Челябинск, Новочеркасск, Волгоград, Сочи, 17-21 мая 2021 года. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. С. 291-296.
4. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2004. 76 с.
5. Кренева А.Е., Колокольникова А.И. Использование сингулярного спектрального анализа для прогнозирования показателей энергопотребления // Горное оборудование и электромеханика. 2022. №3 (161). С. 50-58. DOI 10.26730/1816-4528-2022-3-50-58.
6. Методика прогнозирования графиков электропотребления для технологий краткосрочного планирования. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/market_regulations/schedules.pdf (дата обращения: 20.11.2023).
7. Поршнев С.В., Рабая Ф. Исследование особенностей применения метода сингулярного спектрального анализа в задаче анализа и прогнозирования временных рядов: монография. Ульяновск: Зебра, 2016. 167 с.
8. Предиктивное управление электропотреблением горного предприятия на основе векторного прогнозирования методом анализа сингулярного спектра / В.З. Манусов, Д.В. Антоненков, Д.В. Орлов, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин // Горное оборудование и электромеханика. 2021.

- №5 (157). С. 63-70. DOI 10.26730/1816-4528-2021-5-63-70.
9. Вялкова С.А., Моргоева А.Д., Гаврина О.А. Разработка гибридной модели прогнозирования потребления электрической энергии для горно-металлургического предприятия // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. №3. С. 486-493. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.
 10. Мартко Е.О., Белицын И.В. Сингулярный спектральный анализ как метод моделирования электрической нагрузки // Ползуновский вестник. 2009. №4. С. 76-85.
 11. Alrasheedi A., Almalaq A. Hybrid Deep Learning Applied on Saudi Smart Grids for Short-Term Load Forecasting // MDPI Journal: Mathematics. 2022. Vol. 10. №2666. P. 1-22. DOI: 10.3390/math10152666.
 12. A novel combination forecasting model for wind power integrating least square support vector machine, deep belief network, singular spectrum analysis and locality-sensitive hashing / Y. Zhang, J. Le, X. Liao, F. Zheng, Y. Li // Energy, 2019. Vol. 168. P. 558-572. DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.128
 13. Manifold Learning in Electric Power System Transient Stability Analysis / P. Sarajcev, D. Lovric // Energies, 2023. Vol. 16. №23: 7810. DOI: 10.3390/en16237810
 14. Massidda L., Marrocu M. Decoupling Weather Influence from User Habits for an Optimal Electric Load Forecast System // MDPI Journal: Energies. 2017. Vol. 10. №12: 2171. DOI: 10.3390/en10122171.
 15. Methods of Forecasting Electric Energy Consumption: A Literature Review / Klyuev R.V., Morgoev I.D., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Martuyushev N.V., Efremkov E.A., Mengxu Q // Energies, 2022. Vol. 15, 8919. <https://doi.org/10.3390/en15238919>

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE AUTOMATED DISPATCH CONTROL SYSTEM BY DEVELOPING AN ELECTRICAL LOAD PREDICTION SUBSYSTEM USING THE EXAMPLE OF A 110 kV SUBSTATION

© A.D. Morgoeva, T.T. Gudiev, B.D. Khastsaev, V.V. Khmara

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (STU), Vladikavkaz, Russia

Increasing the efficiency of management of electric power systems is necessary to maintain a balance between the volumes of electricity production and consumption and is an important and urgent task for the national economy of the country. Market relations between facilities generating and consuming electricity, the introduction of digital metering devices and automation of the electric power industry as a whole determine the objective need to improve methods and means of intelligent decision support in the process of energy consumption management. The paper presents the results of research on the development of a methodological basis for a management decision support system designed to operate in conjunction with an automated dispatch control system, using data on the electrical loads of a 110 kV substation as an example. The purpose of the study is to improve the efficiency of power consumption management by having a reliable forecast of daily loads at a 110 kV transformer substation. During the study, various methods were used to predict daily substation loads, such as singular spectral analysis to decompose the time series into additive components (trend, harmonic and noise) and machine learning methods to predict them. A comparative analysis of various options for using these methods was carried out and recommendations for their use were formulated.

Keywords: forecasting, electrical loads, machine learning, automation, control, singular spectral analysis, transformer substation.

REFERENCES

1. Nadtoka, I.I. and Korniyukova, O.A. (2008). "Singular spectral analysis method adaptation for energy demand time series forecasting". *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. №3 (145), pp. 88-90.
2. Alexandrov, F.I. and Golyandina, N.E. (2004). *Automation of the allocation of trend and periodic components of a time series within the framework of the "Caterpillar" method-SSA*. Exponenta Pro: Mathematics in Applications. №3-4, pp. 54-61.
3. Vyalkova, S.A. and Nadtoka, I.I. (2021). "Analysis of hybrid model error of short-term forecast of energy consumption in Moscow". *Prom-Engineering: proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical conference*, Chelyabinsk, pp. 291-296.
4. Golyandina, N. E. (2004). *The Caterpillar- SSA method: time series analysis: textbook*. stipend. St. Petersburg State University. St. Petersburg, 76 p.
5. Kreneva, A.E. and Kolokolnikova, A.I. (2022). "Applying singular spectrum analysis in forecasting indicators of energy consumption". *The journal Mining Equipment and Electromechanics*. №3(161), pp. 50-58. DOI 10.26730/1816-4528-2022-3-50-58.
6. Methods of forecasting power consumption schedules for short-term planning technologies. (2023), available at: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/market_regulations/schedules.pdf (Accessed 20.11.2023).
7. Porshnev, S.V. and Rabaya, F. (2016). *Investigation of the features of the application of the singular spectral analysis method in the problem of time series analysis and forecasting*. Monograph, Zebra. Ulyanovsk, 167 p.
8. Manusov, V.Z., Antonenkov, D.V., Orlov, D.V., Pudov, E.YU. and Kuzin, E.G. (2021). "Preventive management of electric consumption of a mining enterprise based on vector forecasting by the method of singular spectrum analysis". *The journal Mining Equipment and Electromechanics*. №5 (157), pp. 63-70. DOI 10.26730/1816-4528-2021-5-63-70.
9. Vyalkova, S.A., Morgoeva, A.D. and Gavrina, O.A. (2022). "Development of a hybrid model for predicting the consumption of electrical energy for a mining and metallurgical enterprise". *Sustainable Development of Mountain Territories*. Vol. 14, №, pp. 486-493. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.
10. Martko, E.O. and Belitsyn I.V. (2009). "Singular spectral analysis as a method of modeling electrical load". *Polzunovskiy vestnik*. №4. Pp. 76-85.
11. Alrasheedi, A. and Almalaq, A. (2022). "Hybrid Deep Learning Applied on Saudi Smart Grids for Short-Term Load Forecasting". *MDPI Journal: Mathematics*. Vol. 10. №2666, pp. 1-22. DOI: 10.3390/math10152666.
12. Zhang, Y., Le, J.Liao,X., Zheng, F. and Li., Y.(2019). "A novel combination forecasting model for wind power integrating least square support vector machine, deep belief network, singular spectrum analysis and locality-sensitive hashing". *Energy*. Vol. 168, pp. 558-572. DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.128
13. Sarajcev, P. and Lovric, D. (2023). "Manifold Learning in Electric Power System Transient Stability Analysis". *Energies*. Vol. 16, №23: 7810. DOI: 10.3390/en16237810
14. Massidda, L. and Marrocu, M. (2017). "Decoupling Weather Influence from User Habits for an Optimal Electric Load Forecast System". *Energies*. Vol. 10. №12: 2171. DOI: 10.3390/en10122171.
15. Klyuev, R.V., Morgoev, I.D., Morgoeva, A.D., Gavrina, O.A., Martyushev, N.V., Efremenkov, E.A. and Mengxu, Q. (2022). "Methods of Forecasting Electric Energy Consumption: A Literature Review" *Energies*. Vol. 15, 8919. DOI:10.3390/en15238919.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В СЕТЯХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ, СОЧЕТАЮЩАЯ НЕЧЕТКУЮ СИСТЕМУ И МУРАВЬИНУЮ КОЛОНИЮ

© А. Назари¹, Б. Данешманд², Р. Мохаммади³

^{1,3}Университет Бу-Али Сина, Хамадан, Иран

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В последние годы технология интернета вещей (IoT) позволила реализовать различные приложения. В этой технологии объекты и датчики, подключенные к Интернету, могут удаленно контролироваться и управляться, а собранные ими данные могут оцениваться и анализироваться. Одной из важнейших задач в IoT является управление энергопотреблением, так как многие объекты оснащены батареями и не подключены к постоянному источнику питания. Поэтому важно управлять энергопотреблением объектов и увеличивать срок службы сети. В этой статье предлагается метод маршрутизации с учетом энергопотребления для сетей IoT, направленный на снижение энергопотребления в процессе маршрутизации. Для достижения этой цели предлагаемый метод сначала делит сеть на несколько кластеров, используя методы кластеризации. Затем с помощью нечеткой логики определяется качество каждого звена на основе уровня энергии и качества обслуживания и, наконец, вычисляется оптимальный путь с помощью алгоритма муравьиной колонии. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод обеспечивает значительное улучшение с точки зрения энергопотребления, срока службы сети, времени до отказа первого узла и количества работающих узлов в каждом раунде по сравнению с другими существующими методами.

Ключевые слова: Интернет-вещей, протокол маршрутизации, нечеткая логика, алгоритм муравьиной колонии, кластеризация, децентрализованная маршрутизация

Формат цитирования: Амин Назари, Бехруз Данешманд, Реза Мохаммади Энергосберегающая маршрутизация в сетях интернета вещей, сочетающая нечеткую систему и муравьиную колонию // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX, №4 (34). С.26-38. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.30.73.005

Недавние достижения в области коммуникационных технологий, электронных схем и искусственного интеллекта привели к появлению сетей Интернета вещей (IoT), которые обеспечивают связь и передачу данных между различными объектами, такими как люди, животные и объекты, через сети связи. Эта технология облегчила выполнение задач более разумным и легким способом [1]. Распространение смартфонов, Интернета и коммуникационных технологий привело к значительному увеличению диапазона приложений и способов использования Интернета вещей, включая умное здравоохранение, транспорт, дома, фабрики, перекрестки, автомагистрали и умные города [2; 3]. Несмотря на многочисленные преимущества Интернета вещей, все еще существуют аппаратные ограничения, которые необходимо устранить [4], такие как ограни-

ченная вычислительная мощность, память и источники энергии, а также низкие скорости передачи. В результате в последние годы сети IoT стали популярной темой исследований, и разработка конкретных протоколов необходима из-за их уникальных аппаратных ограничений [5].

Маршрутизация является важным аспектом сетей IoT, поскольку энергопотребление является наиболее существенным ограничением в этих сетях. Многие исследования были сосредоточены на энергоэффективных методах маршрутизации для экономии энергии. Кроме того, отказ узла в сети может привести к потере когерентности сети и нарушению передачи данных на базовую станцию. Таким образом, несколько исследований сосредоточены на продлении срока службы сети [6]. Кластеризация является одним из наиболее распростра-

ненных и часто используемых методов снижения энергопотребления [7]. Он включает в себя агрегирование информации и предотвращение передачи дублирующихся данных, что является крупнейшим потребителем энергии. В предыдущих исследованиях было рассмотрено несколько критериев для кластеризации и выбора соответствующей головки кластера, включая распределение головок кластера, принадлежность каждого узла к ближайшей головке кластера, центральность головок кластера в каждом кластере, расстояние каждой головки кластера до основания станции, равенстве числа членов каждого кластера и остаточной энергии узла-кандидата в голову кластера [8]. В этом разделе основное внимание уделяется оставшимся энергетическим факторам, расстоянию от головного узла головы кластера до BS и центральности головы кластера для кластеризации. Он предлагает новый алгоритм кластеризации путем объединения методов кластеризации данных и нечеткого вывода. Этот алгоритм направлен на улучшение масштабируемости, снижение энергопотребления узлов за счет соответствующей и сбалансированной кластеризации, распределение головных узлов кластеров в среде и распределение энергопотребления узлов.

В целом научная новизна данной статьи включает в себя следующее:

- использование нечеткой системы для определения последнего головного узла в каждом кластере;
- использование кластеризации и децентрализованной маршрутизации (муравьиная колония и нечеткая маршрутизация);
- использование нечеткой логики в процессе маршрутизации.

Анализ исследований предметной области

В этом разделе мы представляем некоторые исследовательские работы в области кластеризации и маршрутизации. В [9] гибридный алгоритм, использующий движение частиц и генетические алгоритмы вместе с K-средними, был использован для выбора соответствующей головы кластера. Алгоритм состоит из трех фаз. На первом этапе алгоритм K-средних

делит узлы на K кластеров. На втором этапе алгоритмы движения частиц или генетические алгоритмы используются для выбора лучшей головы кластера. На третьем этапе энергопотребление рассчитывается как для головок кластера, так и для узлов. Результаты моделирования показывают, что KPSO превосходит KGA. Однако этот алгоритм является централизованным и не учитывает ротацию головок кластера.

Джейн и др. [10] представили протокол HETEROLEACH, усовершенствование протоколов LEACH и SEP. Этот протокол использует гетерогенные узлы с различными уровнями энергии, чтобы назначить задачу кластеризации узлам с более высокими уровнями энергии. Таким образом, HETEROLEACH сортирует узлы по оставшейся энергии в порядке убывания и выбирает $p\%$ узлов с наибольшей оставшейся энергией в качестве головок кластера ($p = 10\%$). Подобно алгоритму LEACH, HETEROLEACH имеет две фазы запуска и стабильную фазу. Однако в HETEROLEACH, в отличие от LEACH, фаза запуска выполняется централизованно. Когда энергия головки кластера падает ниже порогового значения, она отправляет сообщение на базовую станцию, и снова выполняется фаза инициализации для идентификации новых головок кластера. Результаты моделирования показывают, что протокол HETEROLEACH более энергоэффективен, чем протоколы LEACH и SEP, особенно с точки зрения снижения энергопотребления.

В [11] авторы предложили протокол EIP-LEACH, который основан на протоколе LEACH. Определяются главы кластеров, и кластеры формируются на этапе запуска. На этапе стабильности узлы передают свои данные на головку кластера, а головка кластера агрегирует данные и отправляет их на базовую станцию. Вероятность кластеризации в алгоритме LEACH равна p . На этапе запуска протокола EIP-LEACH каждый сенсорный узел выбирает случайное число от 0 до 1. Если случайное число меньше порогового значения $T(n)$, узел становится головным кластером для текущего раунда. Пороговое значение определяется гарантией того, что узел, который становится

главой кластера в текущем раунде, не может снова стать главой кластера до $1/r$ в следующем раунде. Однако в протоколе EIP-LEACH также учитывается энергетический порог каж-дого узла, что приводит к более высокой вероятности кластеризации узлов с более высокими уровнями энергии, что увеличивает срок службы сети. Результаты моделирования показывают, что протокол EIP-LEACH превосходит алгоритм LEACH.

В [12] для кластеризации использовалась нечеткая система, включающая такие критерии, как количество соседей и остаточная энергия. Узел с большей энергией и большим количеством соседей с большей вероятностью станет головным кластером.

В [13] авторы предложили оптимальный метод кластеризации с использованием алгоритма муравьиной колонии для продления срока службы беспроводных сенсорных сетей, используемых в Интернете вещей. Алгоритм кластерной маршрутизации использовался в несколько этапов для достижения этой цели. В этом методе данные в кластере отправляются по дереву к голове кластера. Все неконечные узлы могут выполнять агрегацию данных, что приводит к значительному сокращению избыточных данных в сети и эффективной балансировке сетевой нагрузки.

В [14] империалистический конкурентный алгоритм (ICA) используется для эффективного решения проблемы кластеризации. Между тем исследования в работе [15] направлены на снижение общего энергопотребления и продление срока службы сети. В исследовании используется алгоритм оптимизации бабочки (BOA) для выбора оптимальных головок кластера на основе различных критериев, таких как остаточная энергия, расстояние до соседей и базовой станции, степень и центральность узла. Затем данные передаются в головную часть кластера, которая использует оптимизацию муравьиной колонии (ACO) для агрегирования и маршрутизации данных на базовую станцию. Оптимальный путь определяется с использованием таких критериев, как расстояние, остаточная энергия и степень узла.

В [16] предложен алгоритм оптимизации кита для увеличения срока службы сети. Этот метод учитывает такие показатели, как потребление энергии внутри кластера, потребление энергии между кластерами и потребление энергии некластеризованными узлами. Для лучшей кластеризации используется многоуровневая система, при которой узлы, расположенные ближе к базовой станции, имеют меньшую дальность радиосвязи, а тем, кто находится дальше, назначается большая дальность радиосвязи. Этот подход группирует узлы рядом с базовой станцией для экономии энергии, поскольку кластеры, расположенные рядом с базовой станцией, не только собирают данные, но и передают данные из кластеров, расположенных дальше, к базовой станции.

Целью данного исследования является использование неравной кластеризации для обеспечения того, чтобы головки кластеров (CH) рядом с базовой станцией (BS) имели больше энергии для ретрансляции данных. Наконец, Назари и соавт. [17] представили программный подход к кластеризации сети на основе SDN, в котором используются интеллектуальные алгоритмы для экономии энергии в Интернете вещей. Для определения необходимого количества кластеров и их эффективного распределения в среде используется эволюционный алгоритм. Для обеспечения покрытия сети и формирования сбалансированного кластера используется виртуальная сеть.

Предлагаемый метод состоит из трех этапов: кластеризация, стабильность и маршрутизация. Фаза кластеризации выполняется в SDN, а фаза стабильности продлевается, а жадная маршрутизация на основе энергопотребления реализуется для увеличения срока службы сети. Благодаря периодическому сбору состояния узла и выполнению локальных задач этот метод сокращает использование управляющих пакетов, что приводит к уменьшению количества требуемых управляющих пакетов. Однако одним недостатком этого метода является то, что он не учитывает расстояние до раковины в качестве критерия.

В 2023 году Назари и др. [18] представили новый подход к снижению энергопотребления

в сетях IoT путем объединения нечеткой системы с улучшенным алгоритмом оптимизации африканского стервятника (AVOA). Основное внимание в исследовании уделялось эффективности кластеризации и многоэтапной маршрутизации в снижении энергопотребления. Чтобы учесть динамичный и неопределенный характер среды IoT, для кластеризации и выбора головок кластеров использовались различные критерии. Нечеткая система использовалась для создания соответствующих кластеров и определения оптимального среднего узла на основе соображений энергии и расстояния. Алгоритм включал три этапа: ранжирование узлов, создание кластера и определение последующих действий для голов кластера. Предлагаемый метод продемонстрировал улучшение сетевых показателей, таких как срок службы и энергопотребление, по сравнению с недавними подходами. Классификационный аспект EQRSRL играет решающую роль в оптимизации процесса маршрутизации. Классифицируя сетевой трафик по разным классам на основе их конкретных требований к качеству обслуживания, система может соответствующим образом расставлять приоритеты и распределять ресурсы. Это гарантирует, что критически важные пакеты медицинских данных будут обрабатываться преимущественно, например, с малой задержкой и высокой надежностью, в то время как некритический трафик может быть направлен по альтернативным путям или с менее строгими гарантиями качества обслуживания.

EQRSRL [19] использует методы обучения с подкреплением для разработки надежного механизма маршрутизации. Этот механизм направлен на обеспечение удовлетворительного уровня качества обслуживания (QoS) для трафика Интернета медицинских вещей (IoMT). Одним из ключевых аспектов этого подхода является его способность точно классифицировать сетевой трафик, что позволяет принимать обоснованные решения в отношении стратегий маршрутизации. Используя алгоритмы обучения с подкреплением, EQRSRL может постоянно учиться и адаптировать свои решения о маршрутизации на основе обратной

связи в реальном времени и показателей производительности. Этот динамический характер позволяет системе эффективно справляться с уникальными характеристиками и требованиями трафика IoMT, который часто включает передачу важных медицинских данных.

IERM IoT [20] представляет новый метод маршрутизации, известный как интеллектуальный протокол маршрутизации с учетом энергопотребления в мобильных сетях IoT на основе SDN. Этот протокол использует кластеры узлов и интеллектуальный эволюционный алгоритм для обработки изменений в топологии сети, возникающих в результате перемещения мобильных узлов. Основная цель состоит в том, чтобы увеличить срок службы сети и свести к минимуму рассеяние энергии. Кроме того, этот подход снижает нагрузку на потребление энергии узлом за счет уменьшения накладных расходов на пакеты управления и маршрутизации пакетов. С помощью моделирования было продемонстрировано, что это решение превосходит другие подходы с точки зрения скорости доставки пакетов, среднего энергопотребления, срока службы сети, количества активных узлов, покрытия и накладных расходов на маршрутизацию.

Описание полученных результатов исследования

В этом разделе мы представляем предлагаемый протокол, состоящий из трех основных этапов: установка, кластеризация и маршрутизация, каждый из которых может иметь подразделы. Ниже мы подробно объясним каждый из этих этапов.

Этап настройки. Стандарт Фаза настройки сети начинается после того, как узлы будут размещены на своих местах. В большинстве приложений узлы распределяются в среде случайным образом, и этот протокол считает расположение узлов случайным. Как только узлы размещены, от БС всем узлам отправляется глобальное сообщение, информирующее их о местоположении БС (BS). Предполагается, что узлы знают о своем местоположении, что может быть достигнуто на этапе настройки и с помощью методов определения местоположения или с помощью GPS.

Этап кластеризации. Фаза кластеризации состоит из двух этапов: конфигурация и стабильность. На этапе конфигурации выбираются головные узлы кластеров и формируются кластеры на основе таких факторов, как остаточная энергия, количество соседей и расстояние между головкой кластера и базовой станцией в кластерах. На этапе стабильности узлы передают свои данные головкам узлам кластера. После сбора, сжатия и агрегации информации головные узлы кластера готовятся отправить ее на БС.

В первом раунде этапа конфигурации БС собирает информацию с узлов и выбирает узлы с лучшими условиями для того, чтобы стать головным узлом кластера на основе предложенной нечеткой системы, описанной ниже. Широковещательное сообщение отправляется всем узлам, чтобы информировать их о головных узлах кластера. Как только узлы получают эту информацию, передают свою информацию соответствующей головному узлу кластера. Для снижения энергопотребления, если расстояние от узла до БС меньше, чем расстояние от узла до ближайшей головы кластера, он напрямую считает БС головным узлом кластера и переходит в фазу устойчивости.

На этапе стабильности датчики собирают информацию и передают ее головным устройствам кластера, которые подготавливают данные для отправки в БС после агрегации.

Цель этапа кластеризации – найти лучший узел, который будет головным в каждом кластере. Выбранная голова кластера должна удовлетворять следующим условиям, применяемым нечеткой системой:

Расстояние между головкой кластера и БС должно быть минимальным.

Энергия головного узла кластера должна быть максимальной.

Головной узел кластера должны иметь как можно больше соседей.

В последующих раундах нет необходимости собирать информацию от БС для выбора головы кластера.

Этап маршрутизации. Работа второго этапа заключается в поиске оптимальных маршрутов и отправке данных на БС. Процесс можно разбить на следующие этапы:

Если у узла есть данные для отправки на БС, а БС находится в пределах его окружения, он напрямую отправляет данные на БС.

Если БС не находится в пределах своего окружения, узел проверяет свою таблицу маршрутизации на наличие маршрута к месту назначения. Если маршрут существует, узел отправляет свои данные по этому маршруту.

Если маршрута в таблице маршрутизации нет, узел отправляет вперед муравьев для поиска оптимальных маршрутов. Ведущие муравьи определяют оптимальные маршруты и добавляют их в таблицу маршрутизации. Для предотвращения образования петель ведущие муравьи движутся только вперед и в сторону БС.

Как только оптимальные маршруты определены, каждый узел выбирает следующий шаг на основе феромона в таблице прямой маршрутизации и оставшейся энергии узлов. Вероятность выбора узла j в качестве следующего шага от узла i определяется по формуле (1):

$$\rho_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \times \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{l \in N_i} \tau_{il}^{\alpha} \times \eta_{il}^{\beta}} \quad (1)$$

где τ_{ij} – феромон на пути от i к j , хранящийся в таблице прямой маршрутизации, а η_{ij} – эвристическая величина (Эвристическая информация обычно определяется как функция остаточной энергии или средней энергии соседних узлов в маршрутизации на основе муравьев), равная остаточной энергии узла над суммой остаточных энергий его соседей.

$$\eta_{ij} = \frac{E_{residual}(j)}{\sum_{k \in N_i(k)} E_{residual}(k)} \quad (2)$$

Феромон в таблице прямой маршрутизации со временем испаряется. Срок действия пути определяется как P , и по прошествии времени с момента создания пути феромон испаряется следующим образом:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij}, \quad \rho = \frac{c}{P} \quad (3)$$

Эта формула уменьшает влияние феромона на узлы, находящиеся дальше от БС, так как промежуточные узлы и пути исчезают быстрее.

Время жизни маршрута определяется следующим образом (время жизни маршрута используется для определения достоверности маршрута). C – постоянный коэффициент.

$$path\ Lifetime = \frac{\alpha}{C \times Hop\ Count} \quad (4)$$

Всякий раз, когда у узла есть данные для отправки в БС, он отправляет ведущих муравьев через соседей, определенных на предыдущем шаге, площадь которых на единицу меньше площади узла. Каждый узел вставляет свою информацию в таблицу обратной маршрутизации после получения прямого муравья и проверяет свою таблицу маршрутизации на наличие действительного маршрута к БС. Если допустимый маршрут существует, он генерирует обратный муравей и отправляет его узлу, запрашивающему маршрут; в противном случае он помещает требуемую информацию в муравей вперед и отправляет ее соседям, площадь которых на одну единицу меньше площади узла, чтобы предотвратить создание петли.

После достижения ведущими муравьями БС оптимальные пути определяются с помощью нечеткой системы. Обновление феромонов маршрутов и оптимальных маршрутов в таблицах маршрутизации узлов производится путем отправки муравьев из БС на узел, запрашивающий маршрут. Количество отступающих муравьев зависит от качества путей, пройденных продвигающимися муравьями, а отступающих муравьев низкого качества избегают, чтобы уменьшить накладные расходы на маршрутизацию.

Каждый узел вставляет свою информацию в таблицу прямой маршрутизации после получения муравья. Маршрутизация и передача данных происходят после определения оптимальных маршрутов.

Фаза повторной кластеризации. После кластеризации и определения маршрутов каждый назначенный кластер и маршрут будут исполь-

зоваться несколько раз, чтобы уменьшить накладные расходы, необходимые для определения головок кластера и маршрутов. Например, их можно использовать 10 раз, прежде чем фаза кластеризации будет выполнена снова.

Нечеткая система, используемая в кластеризации. Нечеткая система, используемая в этом протоколе, имеет три входа: расстояние от узла до базовой станции, количество соседей и энергия узла. Принимая эти входные данные, нечеткая система создает выходные данные, которые представляют степень пригодности узла для того, чтобы быть главой кластера. Узел с наибольшим выходным значением выбирается в качестве головы кластера. Функции принадлежности расстояния до базовой станции и числа соседей аналогичны показанным на рисунке 1 (входные переменные следующие: VL: очень низкий; L: низкий; M: средний; H: высокий и VH: очень высокий), а функции принадлежности энергии аналогичны показанным на рисунке 2 (входные переменные следующие: VVL: очень очень низкий; VL: очень низкий; L: низкий; M: средний; H: высокий и VH: очень высокий; VHH: очень очень высокий). В таблице 1 перечислены некоторые из используемых правил, а на рисунке 3 – выходные функции принадлежности.

В предлагаемой системе нечеткого управления используются две входные переменные: минимальная энергия узла и задержка. При рассмотрении этих факторов учитываются как энергоэффективность, так и качество обслуживания. Выход этой системы определяет качество маршрута, который переносится муравьями-самцами в виде феромона. Функции принадлежности энергии и задержки считаются аналогичными функциям, показанным на рисунке 2. Выходные функции такие же, как на рисунке 3. В таблице 2 перечислены используемые нечеткие правила.

Некоторые инструменты, такие как камеры и мобильные устройства, подключаются напрямую к сети переменного тока и не имеют ограничений по энергопотреблению. Другие могут быть случайным образом рассеяны в окружающей среде или перемещаться по ней, например датчики движения, температуры, ви-

Таблица 1 – Нечеткие правила

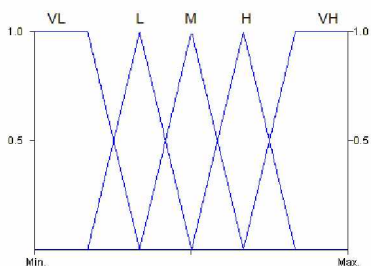


Рис. 1. Функции принадлежности

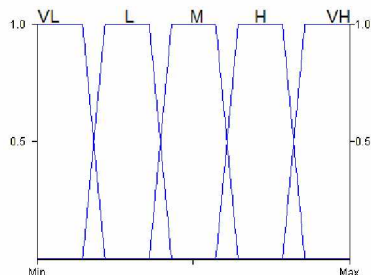


Рис. 2. Функции принадлежности

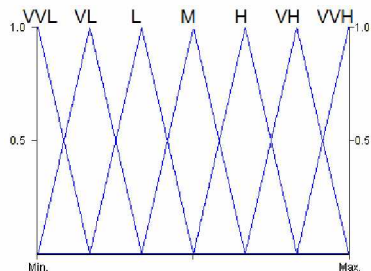


Рис. 3. Выходные функции

- VVL = Very Very Low
- VL = Very Low
- L = Low
- M = Medium
- H = High
- VH = Very High
- VVH = Very Very High

Рис. 4. Fuzzy variables

Number Neighbors=VH					
Dis_Sink \ Energy	VL	L	M	H	VH
VL	M	M	L	L	VL
L	H	M	M	L	L
M	VH	H	M	M	L
H	VVH	VH	H	M	M
VH	VVH	VVH	VH	H	M

А. Нечеткие системы маршрутизации

Таблица 2 – Нечеткое правило

Energy \ Delay	VL	L	M	H	VH
VL	M	L	L	VL	VVL
L	M	M	L	L	VL
M	H	M	M	L	L
H	VH	H	M	M	L
VH	VVH	VH	H	M	M

брации и звука. Однако городская энергия не может быть использована, и батареи поставляются. Уравнение (5) показывает модель энергопотребления:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} l * E_{elec} + l * \epsilon_{fs} * d^2, & \text{if } d \leq d_0 \\ l * E_{elec} + l * \epsilon_{mp} * d^4, & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (5)$$

Здесь E_{elec} обозначает количество энергии, необходимое для обработки 1-битных данных.

ϵ_{fs} и ϵ_{mp} – это энергии, необходимые для передачи 1-битных данных, чтобы можно было достичь приемлемой частоты ошибок по битам с помощью моделей fs и mp соответственно. Это зависит от расстояния передачи данных. Здесь рассеяние энергии fs прямо пропорционально d^2 , а многолучевое распространение пропорционально d^4 . Порог d_0 можно рассчитать следующим образом:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\mathcal{E}_{fs}}{\mathcal{E}_{mp}}} \quad (6)$$

Это E_{Tx} представляет собой потери энергии передатчика и приемника, \mathcal{E}_{fs} – энергия бустера в свободном пространстве, а \mathcal{E}_{mp} – энергия, потребляемая многолучевым излучением. E_{Rx} – это энергия для приема пакетов, полученная из уравнения (7).

$$E_{Rx}(l) = L \times E_{DA} \quad (7)$$

где E_{DA} – энергия агрегации данных. Следовательно, уравнение (8) обозначает общую стоимость передачи и получения.

$$E = E_{Tx} + E_{Rx} \quad (8)$$

Результаты имитационного моделирования

Чтобы смоделировать 100 узлов на площади $200 \times 200 \text{ м}^2$, узлы разбросаны случайным образом. Для моделирования предложенной идеи использовалось программное обеспечение MATLAB. Другие сетевые параметры перечислены в таблице 3.

Алгоритмы, представленные в статьях [14] и [17], использовались в качестве методов сравнения, и все расчеты проводились в одинаковых условиях с использованием программного обеспечения MATLAB. Оцениваемые критерии и параметры включали среднее энергопотребление для каждого раунда, количество активных узлов в каждом раунде, время жизни сети и отказ первого узла.

Как упоминалось ранее, узлы в беспроводных сенсорных сетях зависят от заряда батареи и часто не могут быть заменены после разрядки. Таким образом, энергоэффективность является важным фактором при проектировании этих сетей. Для расчета энергопотребления определяется среднее энергопотребление, которое отображается на рисунке 4.

Предлагаемый протокол демонстрирует более низкое среднее потребление энергии, чем сравниваемые методы, что приводит к увеличению срока службы сети. Повышение производительности предлагаемого метода связано с использованием энергетических критериев, расстояния до БС и количества соседей одновременно в процессе кластеризации. Таким образом, выбранные в предлагаемом методе головные узлы кластеров обладают большей энергией, меньшим расстоянием до БС и большим количеством соседей. Кроме того, интеллектуальная многоэтапная маршрутизация на основе нечеткой информации дополнительно снижает потребление энергии. Напротив, ICA выполняет маршрутизацию в два этапа, а GA-SDN жадно, что может быть неоптимальным.

Увеличение времени до потери работоспособности (до отказа) беспроводных сенсорных сетей является важной задачей при разработке новых протоколов. Обычно это измеряется временем, которое требуется для выхода из строя первого узла или определенного процента сетевых узлов. В этом исследовании мы учитывали 20% потери работоспособности узлов для расчета срока службы сети. Предлагаемый протокол выбирает узлы с большей энергией в качестве головок кластера, которые затем распределяются между узлами, что при-

Таблица 3 – параметры моделирования

Параметр	Ценности в первом сценарии pario
Position of Base station	(100,210)
Packet size	Bits4000
Efs	$10 * 0.000000000001$
Emp	$0.0013 * 0.000000000001$
EDA	$5 * 0.000000001$
ETX	$50 * 0.000000001$
ERX	$50 * 0.000000001$
Primary energy of nodes	j0.5

водит к увеличению срока службы сети. Важно учитывать энергопотребление как в процессах кластеризации, так и в процессах маршрутизации, а также балансировку кластера, которая эффективно продлевает срок службы сети. Головам кластера необходимо потреблять много энергии для получения, агрегирования и передачи информации на БС, поэтому балансировка кластеров позволит равномерно распределить нагрузку между узлами. В отличие от ICA, который не учитывает баланс кластера, GA-SDN решает эту проблему.

Время до первого отказа (потери) узла – это метрика, используемая для оценки протоколов кластеризации, как показано на рисунке 6 для алгоритма.

Как видно, предлагаемый протокол показал превосходную производительность по сравнению с протоколом, упомянутым в основной статье. Отказ первого узла произошел в периоды 167 и 439 для протоколов ICA и GA-SDN соответственно. Однако в предлагаемом методе отказ первого узла происходит в момент времени

452. Это связано с тем, что предлагаемые протоколы запрещают использование узла в качестве головного кластера в последовательные периоды. Это ограничение увеличивает вероятность выбора других узлов с более высокими уровнями энергии и тем самым улучшает распределение энергии, что приводит к повышению производительности алгоритма.

Количество работоспособных узлов в каждом раунде – важный фактор для оценки протоколов кластеризации, поскольку он напрямую влияет на покрытие сети. На рисунке 26 показано количество активных узлов в каждом раунде, и, как видно из рисунка, предлагаемый метод превосходит сравниваемые методы. В сетях IoT покрытие сети является важнейшим критерием качества обслуживания, а более высокая производительность предлагаемого протокола с точки зрения количества активных узлов указывает на его эффективность в обеспечении лучшего покрытия.

Метод маршрутизации с учетом энергопотребления может эффективно снизить энер-

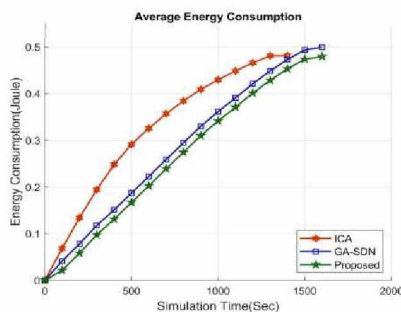


Рис. 4. Среднее энергопотребление сети за раунд

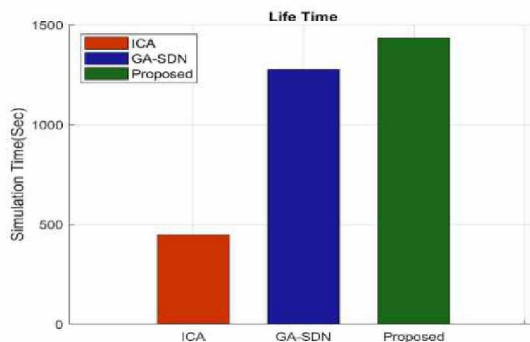


Рис. 5. Срок службы сети

гопотребление в процессе маршрутизации за счет сочетания методов кластеризации и нечеткой маршрутизации, а также оптимизации муравьиной колонии. Этот механизм увеличит срок службы и производительность сети. Результаты моделирования показали, что предложенный метод позволяет продлить время до гибели первого узла в сети и время жизни сети. Увеличение времени до первой потери работоспособности узла приводит к тому, что сеть позже разделяется на отдельные части, и при этом сохраняется связь между узлами сети и основным узлом. Кроме того, увеличение срока службы сети также позволяет собирать больше данных из сети, а сети предоставлять свои услуги в течение более длительного периода времени.

В этой статье для сетей IoT предлагается метод маршрутизации с учетом энергопотребления. Основной целью предлагаемого метода является снижение энергопотребления

в процессе маршрутизации. Для достижения этой цели предлагаемый метод может эффективно снизить потребление энергии в процессе маршрутизации за счет объединения методов кластеризации и нечеткой маршрутизации и оптимизации муравьиной колонии. Этот механизм увеличит срок службы сети и улучшит производительность сети. Результаты моделирования показали, что предложенный метод позволяет эффективно сократить время гибели первого узла в сети и время жизни сети по сравнению с другими существующими методами. Сокращение времени до отказа первого узла приводит к тому, что позже сеть будет разделена на отдельные части, но при этом будет поддерживаться связь между узлами сети и основным узлом. Кроме того, увеличение срока службы сети также позволяет собирать больше данных из сети, а сети предоставлять свои услуги в течение более длительного периода времени.

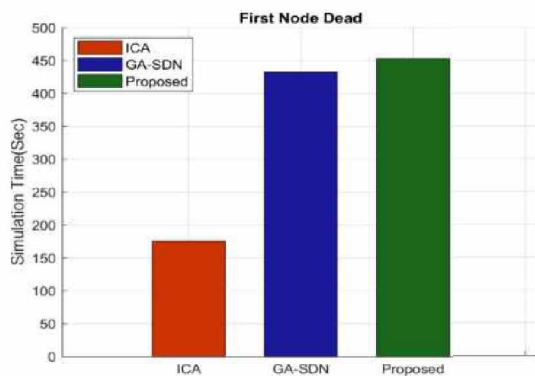


Рис. 6. Время до первого отказа узла

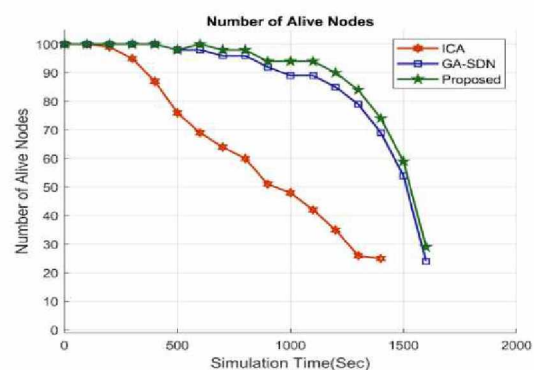


Рис. 7. Количество активных узлов в каждом раунде

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chi Y., Dong Y., Wang J., Yu F.R., Leung V.C.* Knowledge-Based Fault Diagnosis in Industrial Internet of Things: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022 Mar 30.
2. *Sunhare P., Chowdhary R.R., Chattopadhyay M.K.* Internet of things and data mining: An application oriented survey. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 2022 Jun 1; 34 (6): 3569-90.
3. *Anand R., Sindhwani N., Juneja S.* Cognitive Internet of Things, Its Applications, and Its Challenges: A Survey. In *Harnessing the Internet of Things (IoT) for a Hyper-Connected Smart World 2022* Oct 6 (pp. 91-113). Apple Academic Press.
4. *Nadeem MW, Goh HG, Hussain M, Hussain M, Khan MA.* Internet of Things for Green Building Management: A Survey. In *Role of IoT in Green Energy Systems 2021* (pp. 156-170). IGI Global.
5. *Rose K., Eldridge S., Chapin L.* The internet of things: An overview. *The internet society (ISOC)*. 2015 Oct 15;80:1-50.
6. *El Khediri Salim.* “Wireless sensor networks: A survey, categorization, main issues, and future orientations for clustering protocols.” *Computing* 104, №8 (2022): 1775-1837.
7. *Tlili Sihem, Sami Mnasri, Thierry Val* “A survey on iot routing: Types, challenges and contribution of recent used intelligent methods.” In *2022 2nd International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT)*, pp. 161-166. IEEE, 2022.
8. *Begum Beneyaz Ara, Satyanarayana V. Nandury* “Data Aggregation Protocols for WSN and IoT Applications–A Comprehensive Survey” // *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences* (2023)‡
9. *Sheta A., Solaiman B., Khartoum S.* “Evolving a Hybrid K-Means Clustering Algorithm for Wireless Sensor Network Using PSO and GAs,” in *Science and Information Conference (SAI)*, London, 2015.
10. *Rashmi J., Manali K., Latesh M.* “Heteroleach Protocol for Improvement of Stable Operation” *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, vol. 18, №2, pp. 42-46, 2016.
11. *Bongale A.M., Anand S., Shashank S.* “EiP-LEACH: Energy influenced probability based LEACH protocol for Wireless Sensor Network,” In *Emerging Trends & Innovation in ICT (ICEI)*, 2017 International Conference on, Pune, India, 2017.
12. *Mirzaie M., Sayyed M. M.* “Adaptive MCFL: An adaptive multi-clustering algorithm using fuzzy logic in wireless sensor network,” *Computer Communications*, vol. 111 , pp. 56-67, 2017.
13. *Sun Zeyu et al* “An optimized clustering communication protocol based on intelligent computing in information-centric Internet of Things.” *IEEE access* 7 (2019): 28238-28249‡
14. *Dehestani Fahimeh, Mohammad Ali Jabraeil Jamali* “Load balanced clustering based on imperialist competitive algorithm in wireless sensor networks.” *Wireless Personal Communications* 112.1 (2020): 371-385‡
15. *Maheshwari Prachi, Ajay K. Sharma, Karan Verma* “Energy efficient cluster based routing protocol for WSN using butterfly optimization algorithm and ant colony optimization.” *Ad Hoc Networks* 110 (2021): 102317‡
16. *Bozorgi, Seyed Mostafa, et al.* “Clustering based on whale optimization algorithm for IoT over wireless nodes.” *Soft Computing* 25 (2021): 5663-5682‡
17. *Nazari Amin, et al.* “An Intelligent SDN-Based Clustering Approach for Optimizing IoT Power Consumption in Smart Homes.” *Wireless Communications and Mobile Computing* 2022 (2022)‡

18. Nazari A., Mohammadi R., Niknami N., Jazaeri SS., Wu J. The fuzzy-IAVOA energy-aware routing algorithm for SDN-based IoT networks. *International Journal of Sensor Networks*. 2023;42(3):156-69.
19. Nazari A., Kordabadi M., Mohammadi R., Lal C. EQRSRL: an energy-aware and QoS-based routing schema using reinforcement learning in IoMT. *Wireless Networks*. 2023 May 24:1-5.
20. Samadi R., Nazari A., Seitz J. Intelligent Energy-Aware Routing Protocol in Mobile IoT Networks Based on SDN. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2023 Jul 18.

AN ENERGY-AWARE ROUTING IN INTERNET OF THINGS NETWORKS COMBINING FUZZY SYSTEM AND ANT COLONY

© A. Nazari¹, B. Daneshmand², R. Mohammadi³

^{1,3}Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

²ITMO University, St. Petersburg, Russia

In recent years, the Internet of Things (IoT) technology has enabled the implementation of various applications. In this technology, objects and sensors connected to the Internet can be remotely controlled and managed, and the data collected by them can be evaluated and analyzed. One of the most important challenges in IoT is energy management, as many objects are equipped with batteries and are not connected to a permanent power source. Therefore, it is essential to manage the energy consumption of objects and increase the network's lifetime. In this article, an energy-aware routing method is proposed for IoT networks, aiming to reduce energy consumption during the routing process. To achieve this goal, the proposed method first divides the network into several clusters using clustering techniques. Then, using fuzzy logic, the quality of each link is determined based on the energy level and quality of service, and finally, the optimal path is calculated using the ant colony algorithm. Simulation results show that the proposed method provides a considerable improvement in terms of energy consumption, network lifetime, time to the first node failure, and the number of live nodes in each round, compared to other existing methods.

Keywords: Internet of Things, Routing Protocol, Fuzzy Logic.

REFERENCES

1. Chi, Y, Dong, Y, Wang, J., Yu, F.R. and Leung, V.C.. (2022). 'Knowledge-based fault diagnosis in industrial internet of things: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*.
2. Sunhare, P., Chowdhary, R.R. and Chattopadhyay, M.K. (2022). 'Internet of things and data mining: an application oriented survey'. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 34(6):3569-90.
3. Anand, R, Sindhvani, N. and Juneja, S. (2022). *Cognitive internet of things, its applications and its challenges: a survey. Inharnessing the internet of things (IoT) for a hyper-connected smart world*, Apple Academic Press., pp. 91-113.
4. Nadeem, M.W, Goh, H.G, Hussain, M., Hussain, M. and Khan, M.A. (2021). *Internet of things for Green Building Management: a survey. Inrole of IoT in Green Energy Systems*, IGI Global. pp. 156-170
5. Rose, K, Eldridge, S. and Chapin, L. (2015). *The internet of things: An overview. The internet society (ISOC)*. 2015 Oct 15;80:1-50.
6. El Khediri, Salim (2022). "Wireless sensor networks: A survey, categorization, main issues, and future orientations for clustering protocols." *Computing* 104, № 8 (2022): 1775-1837.
7. Tlili, Sihem, Sami Mnasri, and Thierry, Val (2022). "A survey on iot routing: Types, challenges and contribution of recent used intelligent methods." *In 2022 2nd International Conference on Computing and Information Technology (ICCIIT)*, pp. 161-166. IEEE.

8. Begum, Bencyaz Ara, Satyanarayana and Nandury, V. (2023). "Data Aggregation Protocols for WSN and IoT Applications–A Comprehensive Survey." *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*]
9. Sheta, A. Solaiman, B. and Khartoum, S. (2015). "Evolving a Hybrid K-Means Clustering Algorithm for Wireless Sensor Network Using PSO and GAs," in *Science and Information Conference (SAI)*, London.
10. Rashmi, J., Manali, K. and Latesh, M. (2016). "Heteroleach Protocol for Improvement of Stable Operation of," *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, vol. 18, №2, pp. 42-46.
11. Bongale, A. M., Anand, S. and Shashank, S., (2017). "EiP-LEACH: Energy influenced probability based LEACH protocol for Wireless Sensor Network," *In Emerging Trends & Innovation in ICT (ICEI), 2017 International Conference on*, Pune, India.
12. Mirzaie, M. and Sayyed, M.M., "Adaptive MCFL: An adaptive multi-clustering algorithm using fuzzy logic in wireless sensor network," *Computer Communications*, vol. 111, pp. 56-67, 2017.
13. Sun, Zeyu, et al. (2019). "An optimized clustering communication protocol based on intelligent computing in information-centric Internet of Things." *IEEE access* 7 28238-28249]
14. Dehestani Fahimeh, and Mohammad Ali Jabraeil Jamali (2020). "Load balanced clustering based on imperialist competitive algorithm in wireless sensor networks." *Wireless Personal Communications* 112.1 : 371-385]
15. Maheshwari Prachi, Ajay K. Sharma and Karan, Verma. (2021). "Energy efficient cluster based routing protocol for WSN using butterfly optimization algorithm and ant colony optimization." *Ad Hoc Networks* 110 (2021): 102317]
16. Bozorgi, Seyed Mostafa, et al. (2021). "Clustering based on whale optimization algorithm for IoT over wireless nodes." *Soft Computing* 25 (2021): 5663-5682]
17. Nazari, Amin, et al. (2022). "An Intelligent SDN-Based Clustering Approach for Optimizing IoT Power Consumption in Smart Homes." *Wireless Communications and Mobile Computing*]
18. Nazari A, Mohammadi R, Niknami N, Jazaeri S.S. and Wu. J. (2023). 'The fuzzy-IAVOA energy-aware routing algorithm for SDN-based IoT networks'. *International Journal of Sensor Networks*;42(3):156-69.
19. Nazari, A, Kordabadi, M., Mohammadi R. and Lal, C. (2023). EQRSRL: an energy-aware and QoS-based routing schema using reinforcement learning in IoMT. *Wireless Networks*. 2023 May 24:1-5.
20. Samadi, R., Nazari, A. and Seitz, J. (2023). Intelligent Energy-Aware Routing Protocol in Mobile IoT Networks Based on SDN. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК: 539.215.9

DOI: 10.26200/GSTOU.2023.85.99.007

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ В ГОРНОЙ МАССЕ

© А.Е. Воробьев¹, М.З. Мадаева¹, Г.К. Кожоголова², М.С-А. Удаева¹

¹ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

²Научная станция НАН Киргизской Республики, Бишкек, Киргизия

Все разнообразие структур наночастиц с соответствующими им свойствами рассматриваемых минералов стало находить широкое применение в научно-технической деятельности и промышленности. На почве этой тенденции технологического развития проявляется важность в изучении структуры наночастиц с тем, чтобы иметь возможность их получения искусственным путем без затрат ресурсов на их добычу в естественной среде. В статье дается краткое представление о морфологии механизма образования природных наноразмерных частиц, образующихся за счет трения скальных пород между собой и геометрического разрушения отдельных их разновидностей, носящих повсеместный, глобальный характер. Многочисленные типы и виды которых еще подлежат дальнейшему выявлению, уточнению и детальной проработке.

Ключевые слова: наночастицы, типизация, горные породы, формирование, механизм, морфология, наноалмазы, ядро, фуллерены, генезис.

Формат цитирования: Воробьев А.Е., Мадаева М.З., Кожоголова Г.К., Удаева М.С-А. Анализ механизмов формирования наночастиц в горной массе // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX, №4 (34). С. 39-48. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.85.99.007

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-27-00444, <https://rscf.ru/project/23-27-00444/>»

После практически случайного открытия в 1985 г. таких наночастиц, как фуллерены, произошел стремительный рост выявления числа их видов и типов (рис. 1). В результате, в настоящее время количество наименований выявленных природных или искусственных наночастиц превысило значение 10000.

Среди такого обилия значительный интерес представляют природные наночастицы, генезис которых (рис. 2), как оказалось, имеет в принципе глобальный, биосферный [10] характер.

Особо следует выделить тот факт, что наночастицы, различной формы (табл. 1), размеров и химических составов, довольно широко представлены в литосфере, а точнее – в горных породах [2].

Однако у этих наночастиц существует принципиально различный генезис: это могут быть наночастицы, сформированные в различных минералах (например, еще в период кристаллизации матрицы их носителя), или же образованные в последующие этапы, путем химического синтеза, а также самоизмельчения.

В частности, исследование зерен циркона с месторождения Эндерби (Индия), посредством сканирующей ионной визуализации циркона (рис. 3) выявило наличие сгустков, богатых Pb, которые вместе с данными компьютерной томографии, подтверждает их размер в десятки нанометров. Причем выявленные в зернах циркона наночастицы Pb встречаются

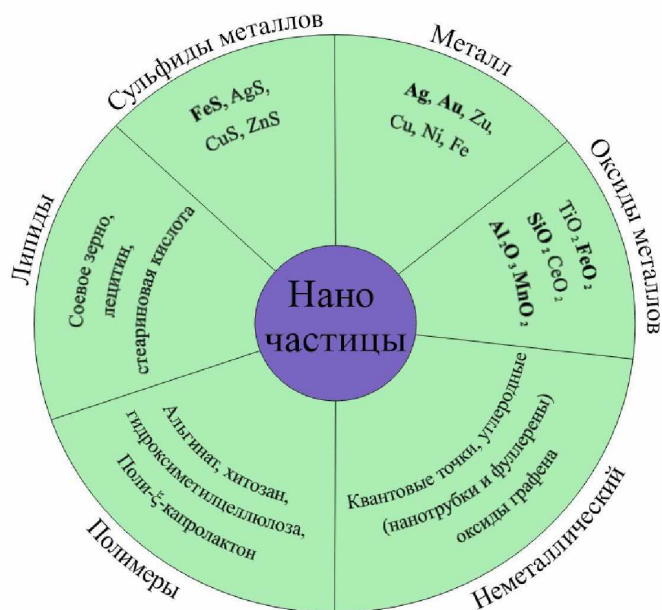


Рис. 1. Типизация природных (жирное) и искусственных наночастиц [17]



Рис. 2. Естественные процессы, приводящие к образованию наночастиц в биосфере [17]:
T – температура; O₂ – активный кислород

Таблица 1. Виды наночастиц, установленные в горных породах

Наносфера	Многогранник	Нанотрубка	Нано стержень	Гантеля	Наноспираль
Нанокольца	Конусы	Чешуйки	Дендримеры	Фрактальные кристаллы	Фуллерены

либо в виде отдельных капель, либо связаны с аморфной фазой, богатой кремнеземом, и не идентифицированной аморфной фазой Ti-Al. Цветные эллипсы показывают расположение наночастиц Pb (закрашенные). Большие белые квадраты показывают область, исследуемую с помощью сканирующей ионной визуализации (80×80 мкм).

Последующее, более детальное исследование, осуществленное с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), показало, что присутствующие в цирконах наночастицы Pb представлены в основном в виде двух типов – довольно выраженных металлических наносфер и многогранников (рис. 4), размерами 5-35 нм.

Оказалось, что эти наночастицы Pb вошли в состав цирконов еще в период их метаморфного образования.

Необходимо отметить, что в результате проявления значительных тектонических про-

цессов также различного генезиса были образованы такие нанообъекты, как природные наноалмазы (рис. 5), имеющие характерные размеры от нескольких до первых сотен нм [4]. Например, некоторые наноалмазы, получившие название «импактные», образовались при взрыве тел астероидов или комет при их соударении с поверхностью Земли, что было установлено в гигантском метеоритном кратере на севере Сибирской платформы (Попигайская астроблема, РФ [9]) или месторождении Кумдыколь (Казахстан).

В центре такой алмазной наночастицы, как правило, расположено её ядро (рис. 6), в состав которого включена гранецентрированная решетка атома углерода, морфологическая симметрия которой представлена состоянием sp^3 -гибридизации кубической сингонии. Данная морфологическая симметрия является структурой, максимально возможной в биосфере.

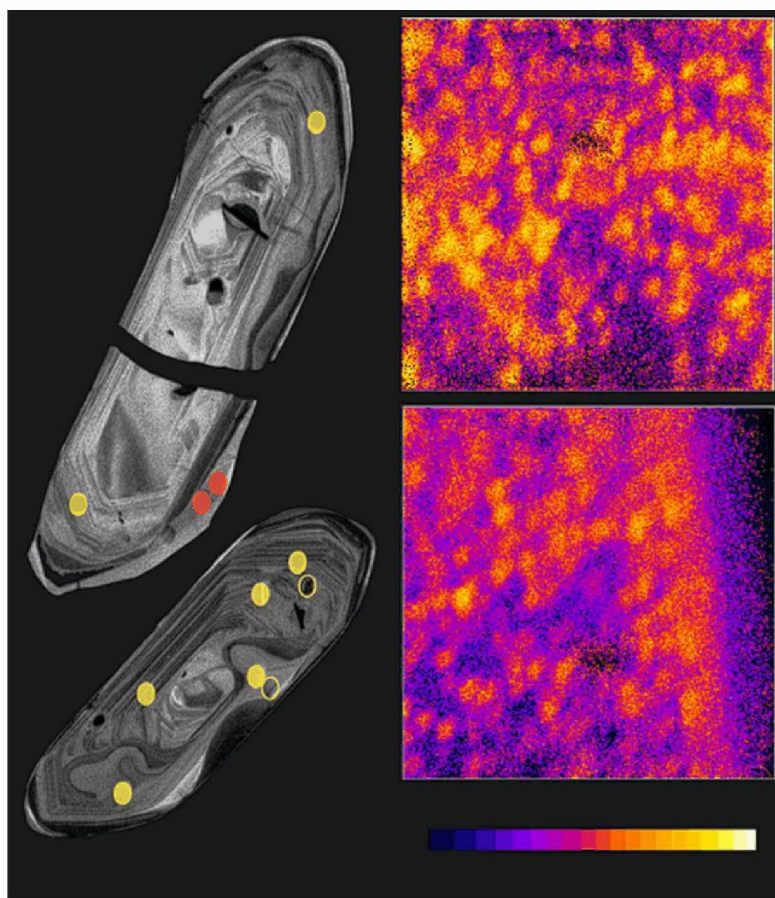


Рис. 3. CL-изображения циркона совместно со сканирующими ионными изображениями распределения Pb [18]

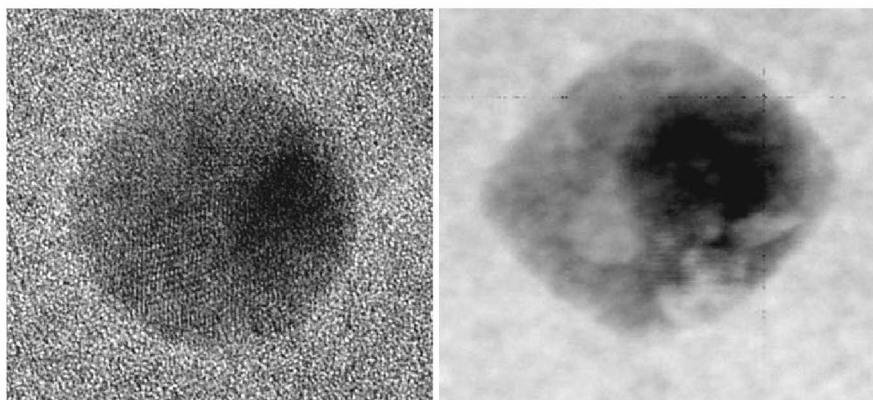


Рис. 4. Наносферы и многогранники Pb, представленные в цирконе

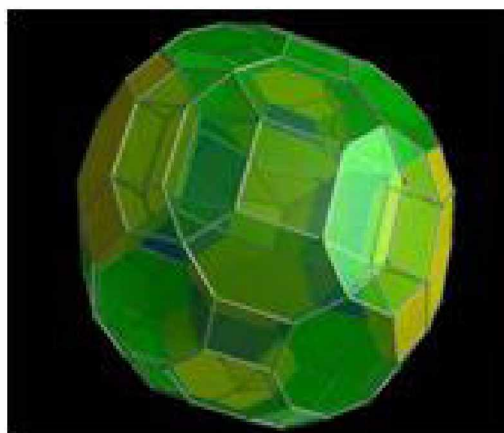


Рис. 5. Частица наноалмаза



Рис. 6. Модель структуры частицы наноалмаза [12, 13]

Еще одна разновидность наноалмазов, представленных в виде алмазоподобных молекулярных структур, была установлена в природных нефтях, где в соответствии с разработанным механизмом они синтезировались из фрагментарных частей: в частности, сырая нефть содержит различные наноалмазоиды – адамантан ($C_{10}H_{16}$), диамантан ($C_{14}H_{20}$), триамантан ($C_{18}H_{24}$) и др.

Механизм синтеза наноалмазов из C_nH_m и CH_4 [6] кавитационно, довольно хорошо соче-

тается с полученными ранее показаниями по их изотопии, в том числе с присутствием в них неравновесных газовых включений, их парагенезисом с муассанитом и пр.

Помимо наноалмазов в литосфере известны и другие наночастицы, выполненные углеродом. Так, графены и углеродные нанотрубки (УНТ) были выявлены в составе различных магматических и осадочных горных пород [5]. В частности, они формируются в графитовых глобулах вулканических пород, а также раз-

лично вида седиментах, где давление, присутствующие частицы металлических катализаторов, имеющиеся существенные сдвиговые напряжения и временной фактор (исчисляемый миллионами лет) совместно компенсируют в их синтезе отсутствие необходимых высоких температур. Было проведено экспериментальное лабораторное моделирование подобных природных процессов, на основе которых и показана реальность образования углеродных структур нанодиазмов при пиролизе вулканических газов на лавовых катализаторах, при одновременной механической активации и обработке аморфного углерода или битуминозного угля.

Определенный научный интерес имеют и наночастицы железа, установленные в рудах и породах, и обладающие целым спектром довольно интересных физико-химических свойств и характеристик [1]. Их генезис также весьма различен. В частности, в ходе геохимического обследования минерализованных зон железорудного месторождения Пенья Колорада (южная Мексика) были обнаружены наночастицы магнетита, размером от 2 по 14 нм [14]. Так, кристаллографические исследования с использованием ПЭМ высокого разрешения показали в горных породах этого объекта наличие наночастиц, с демонстрацией явной наноструктуры магнетита, ориентированной вдоль направления напластования, с весьма близкими межплоскостными расстояниями.

Путем наблюдений при проведении анализа кристаллографических исследований был установлен факт того, что сферические наночастицы Fe обладают наибольшим магнитным насыщением, а кубические и эллипсоидальные наночастицы занимают следующие места соответственно [15].

Установлено, что такие наночастицы железа имеют химический и биологический механизм образования, т.е. практически полностью биосферный генезис (рис. 7).

Кроме рассмотренных процессов, в литосфере известен механизм формирования наночастиц вследствие протекания процессов метаморфизма. Метаморфизм пирита, вызыва-

емый процессом внедрения долеритовых даек, формирует примесное золото в наночастицы [11]. Данный процесс подтверждается проведенными лабораторными экспериментами, по результатам которых было обнаружено «невидимое» золото в составе сульфидов при их нагревании до температур около 300-400°C.

Вследствие проведения подобных экспериментов были зафиксированы некоторые особенности метаморфизма, а именно структуры «видимых» частиц золота (золотины), приобретающих более пористое строение и диспергирующихся. Мельчайшие же их разновидности – напротив, укрупняются и сегрегируются. При этом частицы оседают в имеющихся порах, трещинах, межзерновых или межблоковых пространствах матрицы минерала-хозяина.

По итогу, наноразмерные формы золота обычно концентрируются в железосодержащих полиморфных минералах, а также оксидах металлов (кварце, магнетите и хромите) в большинстве случаев, и в меньших значениях – в карбонатах, силикатах и органическом веществе [11].

Процесс геометрического построения многочисленных наночастиц с различными морфологическими типами имеет своё объяснение исходя из известных механизмов кристаллизации вещества из промежуточного (кватеронного) его состояния [11]. В результате чего наночастицы приобретают форму различных нанотрубок (как полых, так и заполненных), стержней, конусов, сфер (со следами кристаллографических граней), фуллереноподобных структур, дендритов, колец, наноспиралей (рис. 8), многогранников, фрактальных кристаллов, чешуек и т.д., а также включают множества комбинаций из этих базовых форм и фрактальных агрегатов.

Также минеральные наночастицы появляются вследствие разрушения более крупных агрегатов (например, образование наночастиц золота в россыпях [3]). Так, экспериментальные исследования (сочетание микроструктурного, минералогического, текстурного и химического анализов, наряду с масс-спектрометрией и высокоразрешающей сканирующей

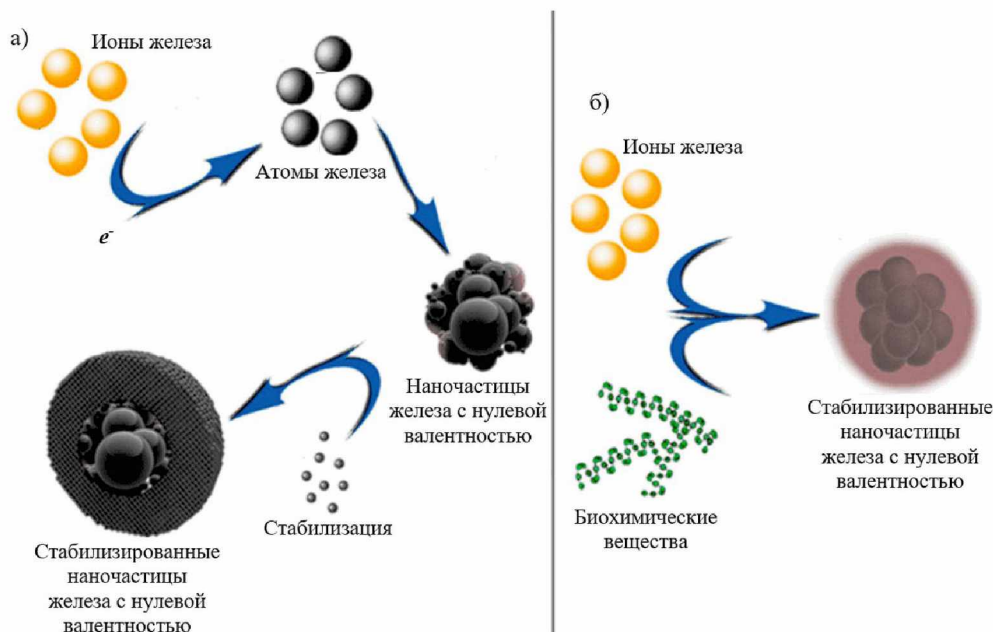


Рис. 7. Химическое а) и биологическое б) восстановление ионов железа до наночастиц нулевого валентного железа и их стабилизация [15]

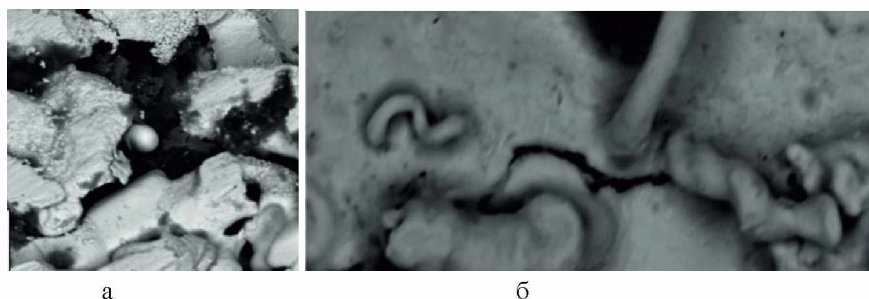


Рис. 8. Природные наносферы (а) и наноспирали (б) золота [12]

электронной микроскопии) переноса и осаждения золота в минеральных образцах, где нет видимого золота, обнаруживают его наночастицы [8].

Следует учесть фактор того, что наноразмерные частицы в плоскостях сдвига горных пород, как правило, развиваются довольно часто и стабильно, с некоторыми специфическими закономерностями их формирования и эволюции.

Так, такой процесс формирования и эволюции наночастиц можно подразделить на 4 этапа [16]:

1) Стадия грануляции: гранулированные наночастицы (обычно диаметром в десятки нанометров) обычно превращаются в частицы с лучшей округлостью и сферичностью. Эти гладкие и ускользящие частицы похожи на

устричные жемчужины (рис. 9 а, б). Поскольку наночастицы образуются в результате скольжения и измельчения, их также называют мелющими зернами.

2) Стадия преобразования: отчужденные (или изомерные) наночастицы становятся изменяющимися телами, и они тесно выровнены друг с другом, образуя некие мозаичные текстуры (рис. 9 в, г).

3) Стадия воссоединения: отдельные нанозерна концентрируются в составные зерна, размер которых обычно составляет 200-400 нм. Составные нанозерна способны оптимизировать свою ориентацию (рис. 9 в), включая предпочтительные формальные и кристаллографические.

4) Стадия воспроизводства: составные зерна под действием касательных напряжений

претерпевают пластическую объемную деформацию и образуют разные массы, а затем на поверхности могут регенерировать новые наночастицы (рис. 9е). В пространственно-временном распределении наноразмерные частицы на плоскостях сдвига горных пород имеют жизненный цикл, включающий зарождение, развитие и эволюцию (вплоть до исчезновения).

Таким образом, согласно этому механизму, природные наноразмерные частицы образуют-

ся за счет трения скальных пород между собой и геометрического разрушения отдельных их разновидностей.

По итогу проведения научных наблюдений и исследований имеем в заключение данной работы следующие выводы: охарактеризованные механизмы формирования различных наночастиц носят повсеместный, глобальный характер, а их многочисленные типы и виды еще подлежат дальнейшему выявлению, уточнению и детальной проработке.

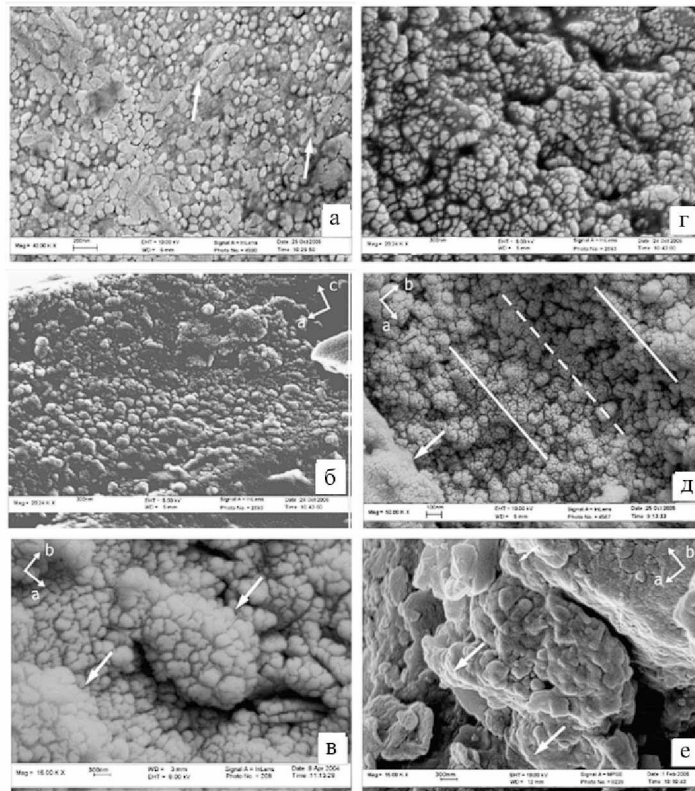


Рис. 9. СЭМ-фотографии слоя наноразмерных частиц в плоскости сдвига в разных горных породах, в разных масштабах и для разных видов [16]:

а) наноразмерные частицы, находящиеся в концентрированном распределении, и линии Людера (стрелки), образованные наноразмерными линиями в плоскости спайности (плоскость абсцисс) проскальзывания напластования в сланцах; б) близко расположенные в плоскости расслоения наноразмерные частицы в гнейсо-грейнитовом милоните; в) наноразмерные частицы с отчуждением и мозаичной текстурой, концентрирующиеся в сложенные мелющие зерна (стрелки) (направление ее длинной оси параллельно оси а в слоении Кашио, Япония); г) наноразмерные частицы, образующие мозаичные текстуры (а, б) в плоскости трещины микросдвига в милонитовом граните, прошедшем испытание высокой температурой и высоким давлением; д) двухслойная структура, как гладкая плоскость (стрелка), так и шероховатая плоскость, на поверхности динамической тонкой оболочки в мезозойском сбросе и шероховатой плоскости образуются сложенные зерна измельчения, гребни скольжения (направление сплошной линии) и впадины скольжения (штриховая линия), параллельные оси а; е) составленные шлифовальные зерна в форме блина из динамической тонкой оболочки обратного разлома в песчанике и передний край пластического течения, имеющий особенность формы языка

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А.Е. Выявленные особенности физико-химических свойств наноминералов железа // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XX Международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, 2015. С. 124-132.
2. Воробьев А.Е., Глуши А.Д. Наноинженерия топливно-энергетического комплекса. Т 2. Наноассоциаты пород и наноминералы. М.: РУДН, 2019. 411 с.
3. Воробьев А.Е., Тралелсси С. Виды наночастиц золота в геогенном и техногенном минеральном сырье // Горный журнал Казахстана. №2. 2015. С. 18-21.
4. Воробьев А.Е. Природные и техногенные наночастицы: основные характеристики и особенности получения / Е.Л. Щесняк, Ай Ян Шу, К.Е. Щесняк, А.П. Жуков, К.А. Воробьев и др. // М., РУДН. 2020. 428 с.
5. Зейналов Э.Б. Углеродные наноструктуры в горных породах: обзор проблемы. Часть 2. Графен, углеродные нанотрубки, нановолокна / Э.Б. Зейналов А.Б. Гусейнов, М.Я. Магерамова, И.С. Гулиев // Азербайджанское нефтяное хозяйство. №9. 2020. С. 22-31.
6. Лукин А.Е. Минеральные сферулы – индикаторы специфического флюидного режима рудообразования и нефтидогенеза // Геофизический журнал. №6. Т. 35. 2013. С. 10-53.
7. Медведев Е.И., Молчанов В.П., Ивин В.В. Микро- и наночастицы природного ртутистого золота Фадеевского рудно-россыпного узла (Приморье) // Фундаментальные исследования. №9-8. 2014. С. 1765-1768.
8. Наночастицы благородного металла в рудных системах // [www.researchgate.net/ Noble_Metal_Nanopart](http://www.researchgate.net/Noble_Metal_Nanopart).
9. Попигаевская астроблема // <http://j-times.ru/rossiya/popigajskaya-astroblema.html>.
10. Пучков Л.А., Воробьев А.Е. Человек и биосфера: вхождение в техносферу: Учебник для вузов. М.: МГГУ, 2000. 342 с.
11. Сазонов А.М., Звягина Е.А., Леонтьев С.И. и др. Ассоциации микро- и наноразмерных обособлений благороднометалльного комплекса в рудах // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. №1. Т. 1. 2008. С. 17-32.
12. Фокин А.А. Синтетическое легирование алмазоподобных наночастиц скелетного редактирования / А.А. Фокин, О.К. Решетилова, В.В. Бахонский, А.Е. Пащенко, А. Киверник, Т.С. Жук, Беккер Джонатан, Э.П. Джеремидаль, М.К. Карлсон Роберт и Р. Шрайнер Питер. 2022. DOI: 10.1021/acs.orglett.2c00982.
13. Яковлев Р.Ю. Детонационный наночастица как перспективный носитель биологически активных веществ: Дисс. ... канд. химич. Наук. Рязань: Рязанский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова, 2016. 267 с.
14. Rivas-Sanchez M.L., Alva-Valdivia L.M., Arenas-Alatorre J., Urrutia-Fucugauchi J., Perrin M., Goguitchaichvili A., Ruiz-Sandoval M. and Ramos Molina M.A. Natural magnetite nanoparticles from an iron-ore deposit: size dependence on magnetic properties // Earth Planets Space, 61. 2009. Pp. 151-160.
15. Seyede-Masoumeh Taghizadeh, Aydin Berenjian, Marziyeh Zare and Alireza Ebrahimezhad. New perspectives on iron-based nanostructures // Processes, 8. 2020. 1128. DOI: 10.3390/pr8091128.
16. Sun Y. et al. Recent progress in studies on the nano-sized particle layer in rock shear planes // Progress in Natural Science 18. 2008. Pp. 367-373.
17. Virender K. Sharma, Jan Filip, Radek Zborilb and Rajender S. Varma. Natural inorganic nanoparticles – formation, fate, and toxicity in the environment // Chem. Soc. Rev. 44. 2015, pp. 8410-8423. DOI: 10.1039/c5cs00236b.
18. Whitehouse M.J. et al. Metallic Pb nanospheres in ultra-high temperature metamorphosed zircon from southern India // Miner Petrol 111. 2017. Pp. 467-474. DOI 10.1007/s00710-017-0523-1-474.

FEATURES OF THE MECHANISMS OF NANOPARTICLES IN ROCK MASS FORMATION

© A.E. Vorobyov¹, M.Z. Madaeva¹, G.K. Kozhogulova², M.S-A. Udaeva¹

¹GSTOU named after acad. M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia

²Research station of the NAS of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

The whole variety of structures of nanoparticles with their corresponding properties of the minerals in question has begun to find wide application in scientific and technical activities and industry. Based on this trend of technological development, it is important to study the structure of nanoparticles in order to be able to obtain them artificially without spending resources on their extraction in the natural environment. The article gives a brief idea of the morphology of the mechanism of formation of natural nano-sized particles formed due to the friction of rocks among themselves and the geometric destruction of their individual varieties, which are ubiquitous, global in nature. Numerous types and types of which are still subject to further identification, clarification and detailed study.

Keywords: nanoparticles, typification, rocks, formation, mechanism, morphology, nanodiamonds, core, fullerenes, genesis.

REFERENCES

1. Vorobyov, A.E. (2015). 'Identified features of the physicochemical properties of iron nanominerals' *In the collection: Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials. Materials of the XX International Scientific and Technical Conference. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Ural State Mining University"*, Ekaterinburg, pp. 124-132.
2. Vorobyov, A.E. and Gladush, A.D. (2019). *Nanoengineering of the fuel and energy complex*. Vol. 2. Nanoassociates of rocks and nanominerals. RUDN. Moscow, 411 p.
3. Vorobyov, A.E. and Trabelssi, S. (2015). 'Types of gold nanoforms in geogenic and technogenic mineral raw materials' *Mining Journal of Kazakhstan*, №2, pp. 18-21.
4. Vorobyov, A.E., Shchesnyak, E.L., Shu, Ai Yan, Shchesnyak, K.E., Zhukov, A.P., Vorobyov, K.A. and others (2020). *Natural and man-made nanodiamonds: main characteristics and production features*. RUDN. Moscow, 428 p.
5. Zeynalov, E.B., Guseinov, A.B., Mageramova, M.Ya. and Guliev, I.S. (2020). 'Carbon nanostructures in rocks: a review of the problem. Part 2. Graphene, carbon nanotubes, nanofibers', *Azerbaijan Oil Industry*. №9, pp. 22-31.
6. Lukin, A.E. (2013). 'Mineral spherules - indicators of a specific fluid regime of ore formation and naphthiogenesis'. *Geophysical Journal*, №6. V. 35, pp. 10-53.
7. Medvedev, E.I., Molchanov, V.P. and Ivin, V.V. (2014). 'Micro- and nanoforms of natural mercury gold from the Fadeevsky ore-placer cluster (Primorye)', *Fundamental Research*. No. 9-8. 2014. pp. 1765-1768.
8. Nanoparticles of noble metal in ore systems, available at: [www.researchgate.net/ Noble_Metal_Nanopart](http://www.researchgate.net/Noble_Metal_Nanopart).
9. Popigajskaya astroblema, available at: <http://j-times.ru/rossiya/popigajskaya-astroblema.html>.
10. Puchkov, L.A. and Vorobyov, A.E. (2000). *Man and the biosphere: entry into the technosphere: Textbook for universities*, MGGU, Moscow, 342 p.
11. Sazonov, A.M., Zvyagina, E.A., Leontiev, S.I. and others (2008). 'Associations of micro- and nano-sized segregations of the noble metal complex in ores', *Journal of the Siberian Federal University. Series: Equipment and technology*. №1. V. 1, pp. 17-32.
12. Fokin, A.A., Reshetilova, O.K., Bakhonsky, V.V., Pashchenko, A.E., Kivernik, A., Zhuk, T.S., Jonathan, Becker, Jeremy, E.P. Dahl, Robert M.K. (2022). 'Carlson and Peter R. Schreiner. Synthetic doping of diamondoids via skeletal editing'. DOI: 10.1021/acs.orglett.2c00982.
13. Yakovlev, R. Yu. (2016). 'Detonation nanodiamond as a promising carrier of biologically active

- substances'. D. Sc. Thesis. Ryazan State Medical University named after acad. I.P. Pavlov. Ryazan. 267 p.
14. Rivas-Sanchez, M.L., Alva-Valdivia, L.M., Arenas-Alatorre, J., Urrutia-Fucugauchi J., Perrin, M., Goguitchaichvili, A., Ruiz-Sandoval, M. and Ramos, Molina M.A. (2009). *Natural magnetite nanoparticles from an iron-ore deposit: size dependence on magnetic properties*. Earth Planets Space, 61. pp. 151–160.
 15. Seyedeh-Masoumeh, Taghizadeh, Aydin, Berenjian, Marziyeh, Zare and Alireza, Ebrahiminezhad. (2020). *New perspectives on iron-based nanostructures*. Processes, 8. 1128. DOI: 10.3390/pr8091128.
 16. Sun, Y. et al. (2008). *Recent progress in studies on the nano-sized particle layer in rock shear planes*. Progress in Natural Science 18, pp. 367-373.
 17. Virender, K. Sharma, Jan, Filip, Radek, Zborilb and Rajender, S. (2015). *Varma. Natural inorganic nanoparticles – formation, fate, and toxicity in the environment*, Chem. Soc. Rev. 44, pp. 8410-8423. DOI: 10.1039/c5cs00236b.
 18. Whitehouse, M.J. et al. (2017). *Metallic Pb nanospheres in ultra-high temperature metamorphosed zircon from southern India*. Miner Petrol 111, pp. 467-474. DOI 10.1007/s00710-017-0523-1-474.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ТРОЙНЫХ И ЧЕТВЕРНЫХ РАСТВОРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

© Р.Х. Дадашев¹, Р.С. Джамбулатов², Д.З. Элимханов^{1,3}

¹ЧГУ им. А.А. Кадырова, Грозный, Россия

²КНИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный, Россия

^{1,3}АН ЧР, Грозный, Россия

В работе обсуждаются результаты экспериментальных и теоретических исследований поверхностного натяжения (ПН) растворов ацетон-этанол-диоксан-вода; этанол-ацетон-вода; диоксан-ацетон-вода. Измерения проводились на тензиометре DSA-100 «KRUSS». Проведены расчеты изотерм с использованием полуэмпирических методов прогноза величины ПН многокомпонентных систем на основе значений этой величины для боковых двойных систем. С этой целью проведен анализ имеющихся в литературе методов прогноза поверхностного натяжения тройных систем (Колера, Бонье, Тупа) и проведено обобщение на случай для четырехкомпонентной системы. Как показали расчеты изотерм избыточного поверхностного натяжения (ИИПН) боковых двойных, они имеют асимметричный вид. Концентрационная зависимость ПН подобных тройных систем описывается асимметричными методами, к которым относятся методы Тупа, Бонье. Результаты расчетов поверхностного натяжения исследуемой системы показали, что эта закономерность имеет место и в случае четырехкомпонентной системы. На основе анализа полученных данных сделан вывод о том, что одним из критериев оценки достоверности результатов прогноза ИПН является степень асимметричности изотерм ИПН в боковых двойных системах.

Ключевые слова: избыточное поверхностное натяжение, методы прогноза поверхностного натяжения, методы Колера, Бонье, Тупа.

Формат цитирования: Дадашев Р.Х., Джамбулатов Р.С., Элимханов Д.З. Поверхностное натяжение тройных и четверных растворов органических веществ // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XVIII, №4 (34). С. 49-57. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.76.53.010

Актуальность исследований межфазных свойств растворов органических веществ, состоящих из трех и более компонентов, объясняется широким использованием многокомпонентных материалов в различных сферах деятельности человека. В частности, к ним относятся такие направления, как фармацевтика, пищевая промышленность, нефтехимия и др. С другой стороны, эти результаты могут быть востребованы при создании новых композиционных материалов, наноразмерных добавок, полимеров, смол и т.д. Ввиду актуальности подобных исследований в последнее время наблюдается рост публикаций, посвященных экспериментальным исследованиям поверхностных свойств растворов, содержащих органические компоненты [1-5]. Анализ исследований показывает, что наиболее актуальны

значения поверхностного натяжения (ПН) и плотности систем, водных растворов с содержанием органических компонентов – спирта, бензола, гептана, ацетона и т.д. [6].

Значения концентрационной зависимости плотности растворов, необходимые для измерения ПН методом висящей капли, определялись вибрационным методом на плотномере ВИП-2 МР с контролем температуры ($\pm 0,01\text{K}$). Погрешность измерений на этом приборе, заявленная производителем, $\pm 0,001\text{ г/см}^3$ [7].

Измерение ПН чистых компонентов и их растворов проводилось методом висящей капли (тензиометр DSA-100). Температура в измерительной ячейке поддерживалась с помощью термостата ($\pm 0,1\text{K}$). Полученные профили капель исследуемых растворов анализируются с помощью интегрированной программы DSA-

1, которая позволяет получать высококачественные снимки контуров капель и проводить расчет ПН путем численного решения уравнения Лапласа.

Результаты проведенных вычислений случайной ошибки эксперимента, рассчитанной на основе обработки экспериментальных данных, свидетельствуют о том, что доверительный интервал при вероятности 0,95 равен $\pm 0,26$ мН/м.

Экспериментальные данные по зависимости ПН от состава и температуры позволяют найти такие свойства поверхности, как адсорбция (избыточная адсорбция Гиббса, различные варианты Гуггенгейма и Адама), состав и минимально возможная толщина поверхностного слоя. Однако в расчётные выражения, используемые для определения этих величин, входят значения частных производных от ПН по молярным долям компонента по различным направлениям. Для решения этой задачи необходимо представить графически или аналитически зависимость ПН от состава исследуемой системы.

Как подчёркнуто выше нами, экспериментально изучены температурные зависимости ПН растворов двух-, трех- и четырёхкомпо-

нентных систем, отличающихся друг от друга составом (рис. 1). Результаты эксперимента показывают, что политермы ПН всех изученных растворов линейные. Какие-либо особенности на концентрационной зависимости температурного коэффициента ПН также не обнаружены.

Как следует из экспериментальных результатов, зависимость ПН от состава изученных двойных, тройных и четырёхкомпонентных растворов гладкая без каких-либо особенностей во всем интервале концентраций. При этом изотермы ПН по лучевым разрезам тройных и четверных систем почти в пределах погрешности эксперимента совпадают, что обусловлено близостью значений ПН двойного раствора диоксан-ацетон (эквимолярного состава) и тройного раствора ацетон-этанол-диоксан (среднего состава). При этом изотерма ПН системы (ацетон-этанол-диоксан-вода (по разрезу ацетон : этанол : диоксан = 1:1:1) занимает промежуточное положение относительно изотерм ПН тройных систем [6].

Нами проведены расчеты концентрационной зависимости ПН в исследуемой четырёхкомпонентной системе по теоретическому уравнению [6], полученному из уравнения

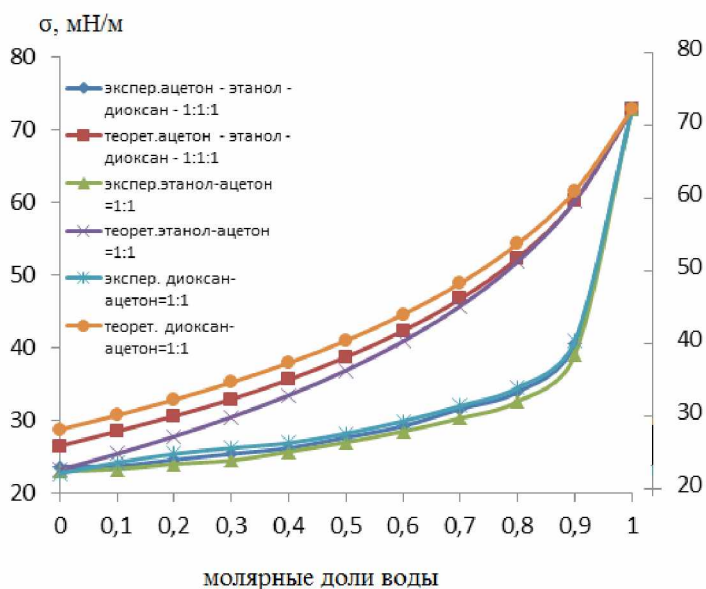


Рис. 1. Изотермы ПН растворов: ацетон-этанол-диоксан-вода при изменении состава по сечению треугольника составов, заданному условием (ацетон : этанол : диоксан = 1:1:1); этанол-ацетон-вода (при изменении состава этанол-ацетон=1:1); диоксан-ацетон-вода (при изменении состава диоксан : ацетон=1:1) при 293 К

А.А. Жуховицкого в предположении идеальности объемной фазы и поверхностного слоя. Запишем это уравнение для многокомпонентной системы:

$$\sigma_{ид} = \sigma_j - \frac{RT}{\omega} \ln \sum_{i=1}^n x_i \exp \left[\frac{\sigma_i - \sigma_j}{RT} \right] \omega \quad (1)$$

где σ_i и σ_j – поверхностное натяжение чистых компонентов; x_i – молярная доля i -го компонента в растворе

$$\omega = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i$$

усредненная по всем компонентам молярная площадь (площадь, занимаемая одним молекулом вещества в поверхностном слое). Обычно молярная площадь вычисляется по формуле:

$$\omega = \frac{f}{n} N_A^{1/3} \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3} \quad (2)$$

где N_A – число Авогадро, M – молярная масса, n – толщина поверхностного слоя, выраженная в числах монослоев, f – коэффициент упаковки, определяемый по формуле

$$f = \left(\frac{\rho^\alpha}{\rho^\omega} \right)^{2/3},$$

ρ^α , ρ^ω – плотность чистого компонента, или раствора в объеме и в поверхностном слое, соответственно. Значения f и n зависят от природы взаимодействующих фаз, температуры и давления. При этом вдали от критических температур, в границах раздела фаз – жидкость-пар значения f и n приближаются к единице. Полученные теоретические кривые, наряду с экспериментальными, представлены на рис. 1, откуда видно, что теоретические изотермы ПН как тройных, так и четырехкомпонентной системы качественно передают концентрационную зависимость ПН многокомпонентных систем, хотя расположены значительно выше экспериментальных.

Очевидно, что экспериментальные исследования зависимости поверхностного натяжения и плотности жидких растворов от состава значительно осложняются с увеличением

числа компонентов. Если для большинства чистых компонент и их бинарных растворов получены надёжные данные по зависимости ПН от состава и температуры, то исследования тройных, и в особенности систем с большим числом компонентов находятся в начальной стадии. Разработанные в литературе теоретические уравнения изотерм ПН часто даже качественно не описывают зависимость ПН многокомпонентных растворов от состава компонентов. Поэтому для удовлетворения практических потребностей, начиная с конца прошлого века, начались разработки полупирических методов прогноза избыточных термодинамических свойств (в их числе и избыточного ПН) тройных систем по данным о свойствах двойных систем. Подробный анализ этих методов дается в работах [6, 8-10]. Поэтому ограничимся констатацией того, что эти методы подразделяются на геометрические (численные) и аналитические. При этом более простыми и удобными для практических целей оказались геометрические модели, которые, в свою очередь, подразделяются на симметричные и асимметричные. Симметричными называют геометрические модели, которые описывают ПН тройных систем, у которых «все три компонента системы являются равнозначными, их нумерация, расположение секущих, на которых лежат расчётные составы, не сказываются на конечном результате» [9]. В отличие от них в асимметричных моделях результат расчета зависит от принятого расположения компонентов относительно лучевого разреза, вдоль которого ведётся расчет [9].

Следует отметить, что предложенная классификация методов прогноза ПН не является строгой, так как изотермы ПН многих тройных систем, которые, согласно этой классификации, должны описываться асимметричными методами, с достаточной точностью описываются и симметричными моделями. Об этом свидетельствуют результаты вычислений изотерм ПН большого количества (около 20) тройных металлических систем методом Колера [10]. На основе анализа результатов, полученных этими авторами, можно сделать вывод о том, что разработка критериев оценки

надежности прогноза и установления границ применимости разработанных методов прогноза находится в начальной стадии. В частности, в этих работах показано, что зависимость ПН от состава в системах In-Sn-Pb, In-Sn-Ga, Tl-Pb-Bi, In-Sn-Bi, которые, согласно обсуждаемой классификации, должны описываться асимметричными методами, с точностью, не превышающей суммарную ошибку измерения ПН, описывается методом Колера. Следует пояснить, что мы подразумеваем под «суммарной ошибкой измерения».

В обсуждаемых методах в конечные выражения входят, помимо других параметров, значения ПН чистых компонент. Эта ситуация нередко приводит к тому, что при расчётах ПН растворов обнаруживается, что значения ПН чистых металлов и боковых двойных систем изучены разными экспериментаторами и часто с использованием разных методов, что заметно повышает ошибку расчета. В этих условиях расхождения вычисленных значений с экспериментальными логичнее сравнивать с суммарной погрешностью измерения ПН разными авторами.

На наш взгляд, одним из направлений уточнения существующих и разработки более строгих полуэмпирических и теоретических моделей прогноза ПН многокомпонентных систем являются экспериментальное и теоретические исследования ПН систем с большим числом компонентов. В связи с этим нами проведены расчеты концентрационной зависимости ПН экспериментально исследованной нами четырехкомпонентной системы ацетон-этанол-диоксан-вода по моделям Колера, Бонье и Туца. Прежде чем приступить к сравнительному анализу полученных данных, рассмотрим особенности обобщения полуэмпирических методов прогноза ПН тройных систем, на случай систем с неограниченным числом компонентов.

Как отмечалось выше, простыми и удобными методами прогноза избыточных свойств являются геометрические модели, к которым относятся и методы Колера, Бонье и Туца. Непосредственное использование этих методов для прогноза ПН встречает определённые трудности, обусловленные тем, что эти методы

разработаны для избыточных величин, значения которых для чистых компонентов равны нулю. Исходя из этого в работе [11] условно введено понятие «избыточного ПН»:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_{ид} \quad (3)$$

где σ – поверхностное натяжение раствора; $\sigma_{ид}$ – поверхностное натяжение идеального раствора.

Для определения зависимости $\sigma_{ид}$ от состава компонентов нами используется выражение (1). При этом вместо указанного выражения можно воспользоваться следующим выражением:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i x_i \quad (4)$$

Отметим, что использование уравнения (4) значительно упрощает расчеты ПН без существенного ухудшения точности прогноза.

Ранее нами была высказана гипотеза о том, что критериями оценки надежности и достоверности прогноза ПН тройных систем могут служить, наряду с величиной избыточного ПН, и асимметричность кривых изотерм избыточного ПН в боковых двойных системах относительно среднего состава. Было показано, что модель Колера позволяет в пределах суммарной погрешности описывать зависимость ПН тройных систем от состава компонентов, в которых не менее двух боковых двойных характеризуются симметричными относительно среднего состава изотермами избыточного ПН [12]. Однако этот вывод сделан на основе ограниченного числа экспериментальных данных и требует дальнейших подтверждений. Поэтому в данной работе при прогнозировании ПН четырехкомпонентной системы ацетон-этанол-диоксан-вода подробно рассмотрены изотермы избыточного ПН боковых двойных систем (рис. 2).

Для расчета ПН четырехкомпонентной системы по полуэмпирическим моделям Колера, Бонье и Туца нами предварительно определены изотермы избыточного ПН в боковых двойных системах (рис. 2). Для боковых двойных систем ацетон-диоксан, ацетон-этанол, диок-

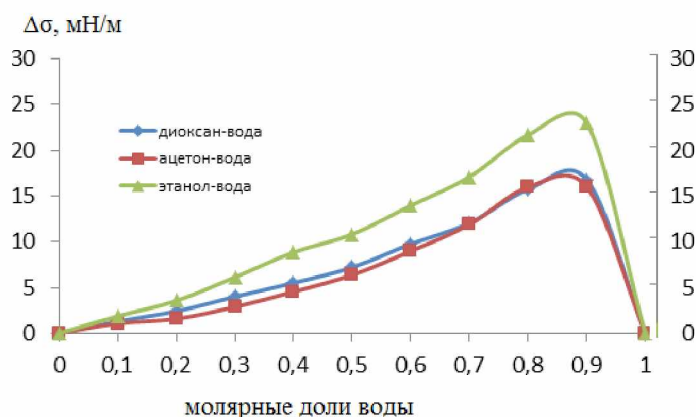


Рис. 2. Изотермы избыточного поверхностного натяжения систем: диоксан-вода; ацетон-вода; 2) этанол-вода при 293 К.

сан-этанол изотермы ПН передаются аддитивной функцией во всем интервале составов [13], поэтому их избыточное ПН равно нулю.

Как видно из полученных данных, изотермы избыточного ПН изученных водных растворов двойных систем (рис. 2) характеризуются сильной асимметрией относительно прямой, проходящей через средний состав перпендикулярно оси составов. Как видно из рис.1, экстремум на изотермах избыточного ПН смещается в область чистого компонента (0,9 мольной долей воды).

Отметим, что обсуждаемые методы прогноза разработаны и прошли апробацию на экспериментально изученных тройных системах [6, 12]. Поэтому их использование для вычисления ПН систем с большим числом компонентов требует специального анализа и рассмотрения. Выражения для прогнозирования ПН тройных систем (Колера, Бонье и Тупа) на случай неограниченного числа компонентов были обобщены в работах [6, 14-16]. На основе полученных ими уравнений нами получены формулы для расчета ПН и проведена их апробация на экспериментально изученной четырехком-

понентной системе ацетон-этанол-диоксан-вода.

Как отмечено выше, методы Колера, Бонье и Тупа были обобщены на случай многокомпонентной системы в работах [6, 15-17]. Полученные разными авторами при этом выражения отличаются друг от друга только набором независимых переменных. Поэтому нами этот вопрос рассмотрен, опираясь на выражение, которое получено одним из авторов [6]. В этой работе, следуя логике Колера, ИПН многокомпонентного раствора представлено в виде:

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \Delta\sigma_{ij} (x_i + x_j)^2 \quad (5)$$

где $\Delta\sigma_{ij}$ – ИПН бинарного раствора $i-j$ с отношением молярных долей i и j , как и в n -компонентном растворе. Коэффициент $\frac{1}{2}$ в выражении (5) учитывает повтор членов суммы, обусловленных попарным взаимодействием атомов двойной системы $i-j$ или $j-i$ (индексами $i-j$ и $j-i$ обозначается одна и та же двойная система). Очевидно, что $\Delta\sigma_{ij} = \Delta\sigma_{ji}$, и в сумме (1) должен фигурировать только один член.

Из этого выражения для четырехкомпонентной системы имеем:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_{12}(x_1 + x_2)^2 + \Delta\sigma_{13}(x_1 + x_3)^2 + \Delta\sigma_{14}(x_1 + x_4)^2 + \Delta\sigma_{23}(x_2 + x_3)^2 + \Delta\sigma_{24}(x_2 + x_4)^2 + \Delta\sigma_{34}(x_3 + x_4)^2 \quad (6)$$

Асимметричные модели Бонье и Тупа были обобщены для многокомпонентных систем автором [6,18,19]. В случае четырехком-

понентной системы из этого выражения несложно получить следующие уравнения:

Для модели Бонье:

$$\Delta\sigma = \left[\frac{x_1}{1-x_4} \Delta\sigma_{14} + \frac{x_2}{1-x_4} \Delta\sigma_{24} + \frac{x_3}{1-x_4} \Delta\sigma_{34} \right]_{x_4} + \Delta\sigma_{12}(x_1 + x_2) + \Delta\sigma_{13}(x_1 + x_3) + \Delta\sigma_{23}(x_2 + x_3) \quad (7)$$

а для модели Тупа:

$$\left[\frac{1}{1-x_4} \Delta\sigma_{14} + \frac{x_2}{1-x_4} \Delta\sigma_{24} + \frac{x_3}{1-x_4} \Delta\sigma_{34} \right]_{x_4} + \Delta\sigma_{12}(x_1+x_2)^2 + \Delta\sigma_{13}(x_1+x_3)^2 + \Delta\sigma_{23}(x_2+x_3)^2 \quad (8)$$

Полученные выражения по изотермам избыточного ПН боковых двойных систем (рис. 1) позволяют определить концентрационную зависимость ПН четырехкомпонентной системы. Нами проведены расчеты изотерм ПН исследуемой четырехкомпонентной системы при изменении состава компонентов по сечению ацетон: этанол : диоксан =1:1:1. Рассчитанные данные, наряду с экспериментальными, представлены на рис. 3. Как видно из рисунка 3, модель Колера даже качественно не передает концентрационную зависимость ПН исследуемой четырехкомпонентной системы. Вопреки ожиданиям, на вычисленных изотермах ПН при 0,8 мол. долей воды наблюдаются глубокие минимумы при 0,8 молярных долей воды. При этом экспериментальные изотермы ПН характеризуются гладкими кривыми без экстремумов. Следует отметить, что в данной системе мы обнаружили редкое явление, когда расчеты по модели Колера дают изотермы ПН с экстремумами, т.е. дали результаты качественно отличающиеся от экспериментальных. Асимметричные методы Бонье и Тупа (рис. 3) в пределах суммарной погрешности измерения передают экспериментальные зависимости ПН

от состава. При этом вычисленные значения ПН расположены несколько выше экспериментальных данных.

В заключение следует отметить, что асимметричный характер изотерм избыточного ПН боковых двойных систем имеют ранее изученные тройные расплавы натрия – рубидий – цезий, концентрационная зависимость ПН которой даже качественно не передавалась методом Колера. Так же как и в исследуемой системе, на вычисленных изотермах ПН по лучевым сечениям наблюдались минимумы. Поскольку общей для обсуждаемых систем является асимметрия избыточного ПН боковых двойных систем, то логично предположить, что одним из важных критериев оценки достоверности результатов прогноза изотерм ПН тройных систем может служить асимметричный характер избыточного ПН боковых двойных в составе концентрационного треугольника. Однако этот вывод сделан на ограниченном числе экспериментальных данных и нуждается в дополнительных исследованиях.

Выводы. Были проведены расчеты ПН четырехкомпонентных растворов по симметричному методу Колера и асимметричными

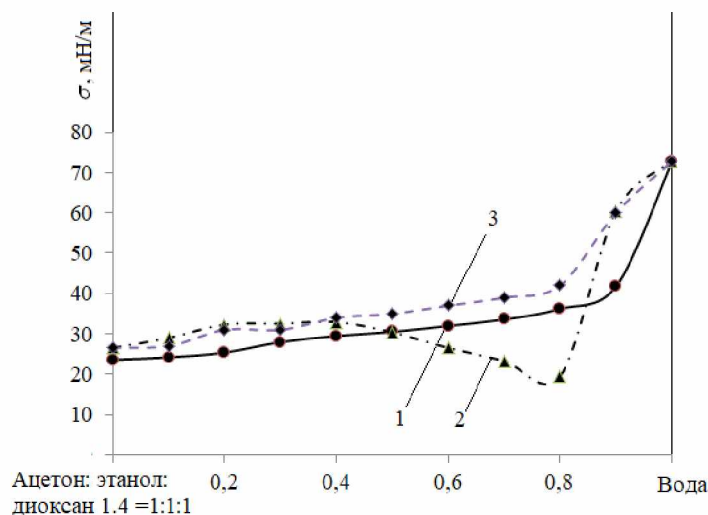


Рис. 3. Изотермы поверхностного натяжения: четырехкомпонентной системы ацетон – этанол – диоксан – вода (ацетон: этанол : диоксан =1:1:1); при 293 К.

1 – экспериментальные данные, 2 – метод Колера, 3 – метод Бонье и Тупа

моделями Бонье и Тупа. Сравнение полученных расчетных данных с экспериментальными результатами показало, что метод Колера даже качественно не описывает экспериментальные изотермы ПН. Вычисленные по методу Колера изотермы ПН характеризуются глубокими минимумами, которые отсутствуют на экспериментальных кривых.

Асимметричные модели Тупа и Бонье в пределах суммарной погрешности измерения ПН, допускаемой при измерении ПН боковых двойных и четырехкомпонентных растворов, передают концентрационные зависимости ПН

исследуемой четырехкомпонентной системы. При этом вычисленные изотермы ПН расположены несколько выше экспериментальных данных.

На основании анализа полученных данных сделан вывод о том, что одним из важных критериев оценки достоверности результатов прогноза изотерм ПН тройных систем может служить степень асимметричности избыточного ПН боковых двойных систем. Однако этот вывод сделан на ограниченном числе экспериментальных данных и нуждается в дополнительных исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mirjana Lj. Kijevcanin, Ines S.A.* Densities, viscosities, and surface and interfacial tensions of the ternary mixture water + ethyl, butyrate + methanol at 303.15 K // *J. Chem. Eng.* 2003. №48. Pp. 1266-1270.
2. *Santos B.M.S.; Ferreira A.G.M.; Fonseca I.M.A.* Surface and Interfacial Tensions of the Systems water - n-butyl, acetate+methanol, and water+n-pentyl acetate+methanol at 303.15 K // *Fluid Phase Equilib.* 2003. №208. Pp.1-21.
3. *Jasper J.J.* The Surface Tension of Pure Liquid Compounds // *J.Phys. Chem. Ref. Data* 1972. №1. Pp. 841-1009.
4. *Aralaguppi M.L., Jadar C.V., Aminabhavi T.M.* Density, viscosity, refractive index, and speed of sound in binary mixtures of acrylonitrile with methanol, ethanol, propan-1-ol, butan-1-ol, pentan-1-ol, hexan-1-ol, heptan-1-ol, and butan-2-ol. // *J. Chem. Eng.* 1999. №44. Pp. 216-221.
5. *Aminabhavi T.M.; Patil VB.* Density, viscosity, and speed of sound in binary mixtures of 1-chloronaphthalene with methanol, ethanol, propan-1-ol, butan-1-ol, pentan-1-ol, and hexan-1-ol in the temperature range (298.15-308.15) K. // *J. Chem. Eng.* 1998. №43. Pp. 504-508.
6. *Дадашев Р.Х.* Термодинамика поверхностных явлений. М.: Наука, 2008. 278 с.
7. Вибрационный плотномер ВИП-2МР. Режим доступа: www.labteh.com
8. *Дадашев Р.Х., Хоконов Х.Б., Элимханов Д.З., Дадашева З.И.* Концентрационная зависимость поверхностного натяжения тройных систем // *ЖФХ.* 2007. Т. 81. №6. С. 1-3.
9. *Морачевский А.Г., Сладков И.Б.* Термодинамические расчеты в металлургии. Справочник. М.: Металлургия, 1985. 136 с.
10. *Морачевский А.Г., Фирсова Е.Г.* Физическая химия. Гетерогенные системы: 2-е изд., стер. СПб. Лань, 2015. 192 с.
11. *Дадашев Р.Х., Ибрагимов Х.И., Саввин В.С.* Прогноз поверхностного натяжения многокомпонентных систем // *Поверхностные свойства расплавов.* Киев: Наукова Думка, 1982. С. 7-11.
12. *Dogan A., Arslan H.* An investigation of influencing of Sb and Bi contents on surface tensions associated with Pb free Sn-Zn-Sb-Bi quaternary and sub-quaternary solder alloys // *Philosophical Magazine.* 2019. Pp. 1825-1848.
13. *Wohlfarth C.H.* Surface tension of pure liquids and binary liquid mixtures. In: *Lechner MD,* editor. *Landolt-Börnstein, New Series Group IV Physical Chemistry.* Berlin: Springer. 2008. 740 p.
14. *Hillert M.* Empirical methods of predicting and representing thermodynamic properties of ternary solution phases CALPHAD V.4. №1. Pp. 1-12.
15. *Costa C., Delsante S., Borzone G., Zivkovic D., Novakovic R.* Thermodynamic and surface properties of liquid Co-Cr-Ni alloys // *J. Chem. Thermodynamics* 69. 2014. Pp. 73-84.
16. *M'chaar R., El Maniani M., Boulouiz A., Ghanimi A.* Prediction of surface tension, viscosity and molar volume of Ag-Bi-Sn liquid alloys at different temperatures // *Journal of Materials and*

Environmental Sciences. 2017. V. 8. Issue 5. Pp. 1888-1900.

17. Sabbarl A., El Moudane M. Yana L., Zhengb Sh., Dinga G., Xua G., Qiao Zh. Surface tension calculation of the Sn–Ga–In ternary alloy // Computer coupling of phase diagrams and thermochemistry 31. 2007. Pp. 112-119.

SURFACE TENSION OF TERNARY AND QUATERNARY SOLUTIONS OF ORGANIC SUBSTANCES

© R.KH. Dadashev¹, R.S. Dzhambulatov², D.Z. Elimkhanov^{1,3}

¹A.A. Kadyrov Chechen State University, Grozny, Russia

²CRI named after Kh.I. Ibragimov of RAS, Grozny, Russia

³AS of the Chechen Republic, Grozny, Russia

The paper discusses the results of experimental and theoretical studies of surface tension of the four-component system acetone-ethanol-dioxane-water and ternary systems: ethanol-acetone-water; dioxane-acetone-water. Surface tension measurements were carried out on a DSA-100 "KRUSS" apparatus using the hanging drop method. Isotherms were calculated using semi-empirical methods for predicting the surface tension of multicomponent systems on the basis of data on the properties of lateral double systems. To carry out calculations of surface tension of four-component system, available in the literature methods of predicting surface tension of ternary systems (Kohler, Bonnier, Tupa) are generalized to the case of four-component system. Calculations of the isotherms of excess surface tension in lateral double systems have shown that the isotherms of excess surface tension have an asymmetric form. The concentration dependence of the surface tension of such ternary systems is described by asymmetric methods, which include the Tupa and Bonnier methods. The results of calculations of the surface tension of the system under study showed that this regularity also occurs in the case of a four-component system. On the basis of the analysis of the obtained data it is concluded that the degree of asymmetry of the excess surface tension of lateral double systems can serve as one of the criteria for assessing the reliability of the results of predicting the surface tension isotherms of ternary systems.

Keywords: excess surface tension, surface tension prediction methods, Kohler, Bonnier, Tupa methods.

REFERENCES

1. Mirjana, Lj. Kijevcanin, Ines, S.A. (2003). 'Densities, viscosities, and surface and interfacial tensions of the ternary mixture water + ethyl, butyrate + methanol at 303.15 K', *J. Chem. Eng.* №48, pp. 1266-1270.
2. Santos, B.M.S.; Ferreira, A.G.M. and Fonseca, I.M.A. (2003). 'Surface and Interfacial Tensions of the Systems water - n-butyl, acetate+methanol, and water+n-pentyl acetate+methanol at 303.15 K', *Fluid Phase Equilib*, №208, pp.1-21.
3. Jasper, J.J. (1972). 'The Surface Tension of Pure Liquid Compounds', *J.Phys. Chem. Ref.*, №1, pp. 841-1009.
4. Aralaguppi, M.I., Jadar, C.V. and Aminabhavi, T.M. (1999). 'Density, viscosity, refractive index, and speed of sound in binary mixtures of acrylonitrile with methanol, ethanol, propan-1-ol, butan-1-ol, pentan-1-ol, hexan-1-ol, heptan-1-ol, and butan-2-ol.', *J. Chem. Eng.*, №44, pp. 216-221.
5. Aminabhavi, T.M. and Patil, V.B. (1998). 'Density, viscosity, and speed of sound in binary mixtures of 1-chloronaphthalene with methanol, ethanol, propan-1-ol, butan-1-ol, pentan-1-ol, and hexan-1-ol in the temperature range (298.15-308.15) K.', *J. Chem. Eng.*, №43, pp. 504-508.
6. Dadashev, R.Kh. (2008), *Thermodynamics of surface phenomena*, Nauka, Moscow 278 p.
7. Vibration density meter VIP-2MR, available at: www.labteh.com.
8. Dadashev, R.Kh., Khokonov, Kh.B., Elimkhanov, D.Z. and Dadasheva, Z.I. (2007). 'Concentration

- dependence of the surface tension of ternary systems', *ZhFKh.*, V. 81, №6, pp. 1-3.
9. Morachevskiy, A.G. and Sladkov, I.B. (1985). *Thermodynamic calculations in metallurgy. Reference book.* Metallurgy, Moscow, 136 p.
 10. Morachevskiy, A.G. and Firsova, E.G. (2015). *Physical Chemistry. Heterogeneous systems: 2nd ed., pers.* SPb. Lan, 192 p.
 11. Dadashev, R.Kh. Ibragimov, Kh.I. and Savvin, V.S. (1982). *Prediction of surface tension of multicomponent systems. Surface properties of melts.* Naukova Dumka, Kiev, pp. 7-11.
 12. Dogan, A. and Arslan, H. (2019). "An investigation of influencing of Sb and Bi contents on surface tensions associated with Pb free Sn-Zn-Sb-Bi quaternary and sub-quaternary solder alloys". *Philosophical Magazine*, pp. 1825-1848.
 13. Wohlfarth, C.H. (2008). 'Surface tension of pure liquids and binary liquid mixtures'. In: *Lechner MD, editor. Landolt-Börnstein, New Series Group IV Physical Chemistry. Berlin, Springer.* 740 p.
 14. Hillert, M. 'Empirical methods of predicting and representing thermodynamic properties of ternary solution phases CALPHAD V.4'. №1. Pp. 1-12.
 15. Costa, C., Delsante, S., Borzone, G., Zivkovic, D. and Novakovic, R. (2014). 'Thermodynamic and surface properties of liquid Co-Cr-Ni alloys', *J. Chem. Thermodynamics* 69. Pp. 73-84.
 16. M'chaar R., El Maniani, M., Boulouiz, A. and Ghanimi, A. (2017). 'Prediction of surface tension, viscosity and molar volume of Ag-Bi-Sn liquid alloys at different temperatures', *Journal of Materials and Environmental Sciences*. V. 8. Issue 5, pp. 1888-1900.
 17. Sabbarl, A., El Moudane, M. Yana, L., Zhengb, Sh., Dinga, G., Xua, G. and Qiao, Zh. (2007). *Surface tension calculation of the Sn-Ga-In ternary alloy. Computer coupling of phase diagrams and thermochemistry* 31. Pp. 112-119.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦЕОЛИТА В КАЧЕСТВЕ ФИЛЬТРА В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ БЕНЗ(А)ПИРЕНА

© Ю.О. Риккер, Н.С. Кузнецова, М.В. Кобылкин, Е.В. Салогуб, З.Г. Дарбинян
Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

Сложная экологическая обстановка в ряде российских городов во многом обусловлена выбросами промышленных предприятий, среди которых и предприятия энергетики. Одним из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды является бенз(а)пирен, негативно влияющий на здоровье населения. Необходимость контролировать уровень данного поллютанта, вырабатывать подходы к снижению его концентрации и оптимизировать работу энергетических предприятий с целью минимизации выбросов является актуальной задачей для инженеров и специалистов в области экологии энергетики. Цель работы: **определение оптимального** способа предварительной пробоподготовки цеолита и оценка возможности его использования в качестве фильтра пробоотборной установки по определению концентрации бенз(а)пирена в уходящих газах ТЭС. Результаты работы: Доказана возможность применения цеолита в качестве фильтра для пробоотборной установки. Представлены варианты пробоподготовки цеолита перед использованием в фильтре с использованием щелочей и кислот.

Ключевые слова: цеолиты, ПАУ, сорбент, фильтр, выбросы, бенз(а)пирен, пробоподготовка.

Формат цитирования: Риккер Ю.О., Кузнецова Н.С., Кобылкин М.В., Салогуб Е.В., Дарбинян З.Г. Использование цеолита в качестве фильтра в установке для определения концентрации бенз(а)пирена // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX, №4 (34). С. 58-66. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.62.13.004

В настоящее время более 70% энергии, потребляемой во всем мире, производится за счет сжигания углеводородных топлив. В этой связи совершенствование организации процесса горения топлив в камерных топках различного назначения и топочных устройствах продолжает оставаться актуальным.

Одним из наиболее опасных вредных выбросов, образующихся в результате сжигания углеводородных топлив, является полициклический ароматический углеводород (ПАУ) – бенз(а)пирен ($C_{20}H_{12}$), относимый к первому классу опасности и обладающий канцерогенными свойствами [2], [5], [12], [14].

В существующей практике экологического мониторинга наиболее часто контроль количества бенз(а)пирена ведется по атмосферному воздуху без выделения из полученной концентрации долей, относящихся к различным источникам выбросов. Мониторинг концентрации данного углеводорода непосредственно в выбросах потенциальных источников производится в исключительных случаях с исполь-

зованием стандартных методик, основанных на использовании аналитических аэрозольных фильтров (АФА).

Однако для энергетических предприятий применение АФА-фильтров с целью количественной оценки содержания бенз(а)пирена в уходящих дымовых газах, при условии высоких температур, запыленности и влажности, сопряжено с рядом проблем, которые оказывают негативное влияние на точность измерений.

Содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания, как правило, невелико, в связи с чем для высокоточного определения его концентрации в выбросах применяют зондовый отбор проб [1].

В зондовых установках часто используются **аналитические аэрозольные фильтры** – стандартный материал на основе перхлорвиниловых волокон, широко применяемый для высокоэффективного улавливания аэрозолей различного состава. Термостойкость таких фильтров относительно невелика (до 60-70°C), что усложняет их использование в

условиях высоких температур уходящих дымовых газов.

Согласно методикам выполнения измерений массовой концентрации полиароматических углеводородов в воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (М-МВИ 52-99) регламентировано осаждение бенз(а)пирена на фильтрах АФА-ХП-20 путем аспирации через них газов. Методика также предполагает включение влагоотделителя перед патроном с фильтром и использование колонок с сорбентом ХАД-2 после фильтра. Границы относительной погрешности методики составляют $\pm 25\%$ при доверительной вероятности 0,95.

Реализация данной методики на объектах энергетики показала, что при отборе дымовых проб в газоходах котлов до системы золоулавливания запыленность, влажность и температура газов могут выходить за пределы условий выполнения измерений [6, 7, 9]. На практике отмечались случаи частичного выгорания АФА-фильтров, их обводнения из-за активной конденсации водяных паров, а также запыление фильтра при работе котлов с высокозольным топливом.

Аналогами методик, основанных на АФА-фильтрах, являются способы определения бенз(а)пирена в источниках загрязнения атмосферы (промвыбросах) от компании Люмахром (М 06-09-2015) и зарубежная технология компании Cytiva, включающая в себя отбор высокотемпературных газов в объеме 0,2–0,4 м³, их прокачивание через микропористые аэрозольные фильтры из боросиликатного стекла (Фильтры Whatman glass microfiber filters, Grade 934-АН). Границы относительной погрешности методики также составляют $\pm 25\%$ при доверительной вероятности 0,95.

Фильтры Whatman являются термостойкими (до 500°С), однако также подвержены проблемам, которые возникают при обводнении фильтра и высокой запыленности газов.

В результате проводимого исследования, с целью исключения недостатков существующих методик, разработана технология отбора проб высокотемпературных дымовых газов

для определения концентрации бенз(а)пирена. Технология основывается на сорбционных свойствах твердых веществ, которые способны выдерживать температуры до 220°С без физико-химических изменений и устойчивы к влажности и запыленности [10].

Разрабатываемая технология адаптирована к условиям высоких температур, значения которых могут достигать 200–220°С, и включает в себя отбор горячих дымовых газов из газохода в течение 15 минут с расходом 10–20 л/мин, последовательное прокачивание горячих газов через сорбционный фильтр, охладитель, фильтр тонкой очистки и аспиратор. Сорбционный фильтр, заполненный термостойким сорбентом, способный работать при температуре до 220°С, позволяет без потерь связать бенз(а)пирен, который транспортируется в потоке газа в виде аэрозоля и в виде жидкой фазы, осевшей на твердых частицах золы [14].

Для эксперимента был отобран ряд сорбентов, среди которых чистые глины, активированный уголь, а также цеолиты. Для первой серии экспериментальных исследований был выбран цеолит.

Цеолиты – каркасные алюмосиликаты, обладающие пористой структурой, а также способные адсорбировать, то есть поглощать и удерживать поглощаемое вещество всей поверхностью адсорбента [8, 11].

Состав цеолита различен в зависимости от месторождения. В экспериментальных исследованиях были использованы цеолиты Шивиртуйского месторождения, описываемые как руды «существенно цеолитовые балансовые с содержанием цеолита свыше 50%, известные как «шивиртуин», смешанные монтмориллонит-цеолитовые балансовые, в которых содержание полезного компонента в отдельности ниже 50%, и существенно монтмориллонитовые, в которых содержание глинистого минерала превышает 50%» [4]. Для использования в качестве наполнителя сорбционного фильтра разрабатываемой установки использовался шивиртуин.

В целях испытания свойств цеолита по удерживанию бенз(а)пирена был сделан ряд заборов проб атмосферного воздуха (г. Чита,

март 2022 г., на высоте 1,5 м от поверхности земли). Время забора каждой пробы составило 15 минут с расходом 15 л/мин. Дальнейший анализ цеолита, использованного в качестве сорбента для фильтра, проведенный методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) (флюориметрический детектор RF-10AXL Shimadzu, компьютерная хроматографическая программа «Мультихром» версии 3.0 Россия), показал наличие бенз(а)пирена в пробах.

Результаты. В результате проведения отбора проб на содержание бенз(а)пирена из атмосферного воздуха было выяснено, что цеолит способен накапливать бенз(а)пирен (рис. 2), относительное содержание бенз(а)пирен составило 13,2 ПДК, а также было выявлено, что до забора проб в исследуемом образце уже присутствовал бенз(а)пирен в количестве 5,8 ПДК (рис. 1), что обусловило необходимость выбора оптимального способа пробоподготовки цеолита для избавления его от балласта бенз(а)пирена, который был накоплен естественным путем, и последующего его использования в качестве сорбентов в фильтрах, с целью получения достоверных результатов при анализе уходящих газов и воздуха. При этом стоит отметить, что содержание балластового бенз(а)пирена не стабильно и варьируется в широком диапазоне, в дальнейших исследованиях использовался цеолит с экстремальным содержанием бенз(а)пирена эквивалентно 175,1 ПДК.

В связи с тем, что цеолитсодержащее сырье представляло собой достаточно крупную породу размером 10-15 мм, требовался размол до мелких фракций. После измельчения сырье было откалибровано до фракции 1 мм методом ситового анализа, поскольку данный размер частиц является оптимальным для использования в фильтре как с аэродинамической точки зрения, так и для сохранения относительно высокой сорбционной ёмкости. Далее сорбент промыли проточной и дистиллированной водой для удаления мелкодисперсных частиц и примесей. Предварительный этап подготовки на этом был завершен, результаты анализа полученного материала представлены на рис. 3.

Далее апробированы различные способы

пробоподготовки нативного цеолита: прокаливание, обработка в растворах ацетонитрила (ОСЧ, «Криохром», Россия), серной кислоты (ОСЧ, Россия), гидроксида натрия (ЧДА, Россия).

Первый способ заключался в том, что откалиброванный и промытый цеолит подвергался нагреванию в муфельной печи в течение двух часов при 400 °С для удаления из структуры цеолита влаги и веществ с низкой термической стойкостью, которые могли находиться в объеме сорбента. Эффективность удаления балластового бенз(а)пирена составила 89,7 % (рис. 4).

Второй способ заключался в том, что уже подвергнутый прокаливанию цеолит после остывания находился в растворе ацетонитрила в течение 24 часов, для удаления балластового бенз(а)пирена. Эффективность 94,9% (рис. 5).

Третий способ заключался в предварительной обработке ацетонитрилом с последующим прокаливанием. Эффективность 82,7% (рис. 6).

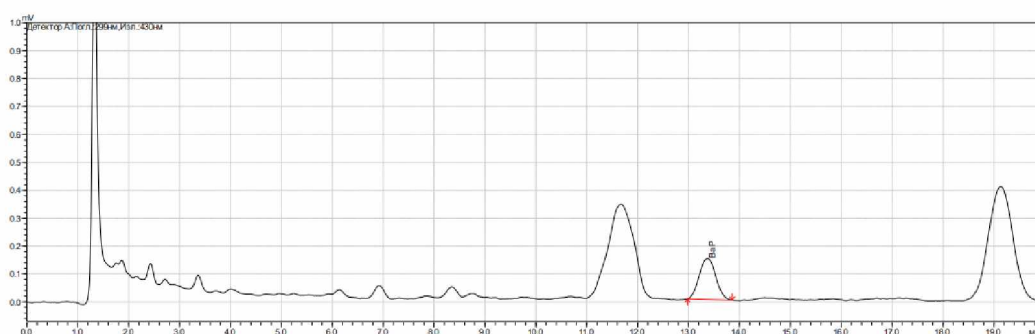
Четвертый способ заключался в обработке сорбента серной кислотой с последующим прокаливанием. Эффективность 91,4% (рис. 7).

Пятый способ заключался в обработке цеолита гидроксидом натрия с последующим прокаливанием. Эффективность 93,2% (рис. 8).

Шестой способ заключался в 24-часовой обработке ацетонитрилом. Эффективность 74,4% (рис. 9).

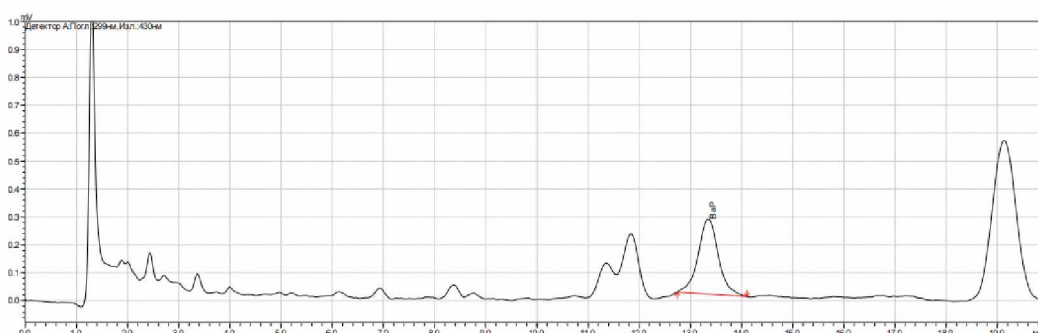
В ходе исследований доказана возможность использования цеолита в качестве наполнителя для сорбционного фильтра, выявлена необходимость предварительной подготовки цеолита непосредственно перед забором проб.

По результатам исследования было выявлено, что метод первоначального прокаливания и прокаливания с последующей обработкой ацетонитрилом, а также разовая обработка ацетонитрилом не показали высокой эффективности для подготовки цеолита. Однако прокаливание с последующей обработкой ацетонитрилом, гидроксидом натрия и серной кислотой оказались достаточно эффективными вариантами для дальнейшей работы и развития технологии.



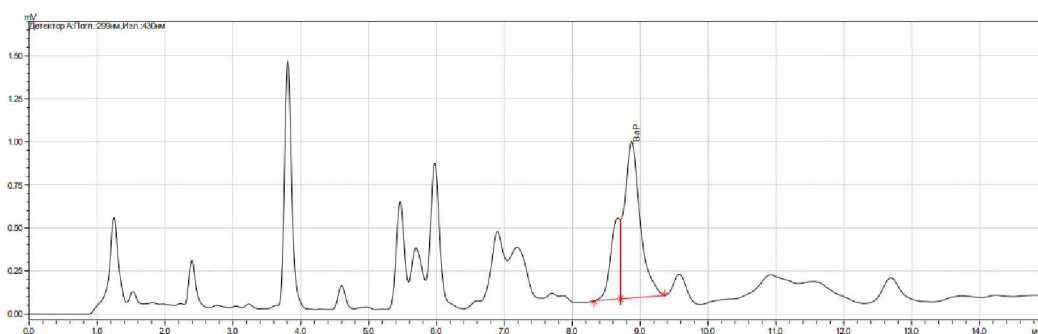
Название	Время удержания	Пик №	Площадь	Высота	Концентрация мкг/м ³
BaP (Бенз(а)пирен)	13.364	1	3299	147	0.0058

Рис. 1. Хроматограмма образца исходного цеолита, содержащего бенз(а)пирен



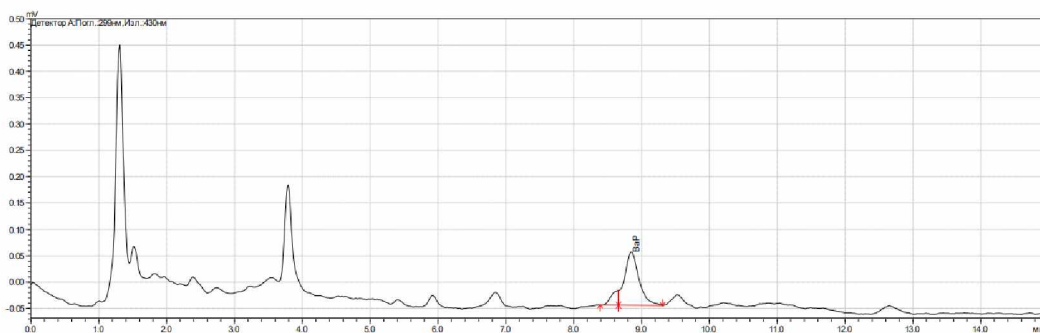
Название	Время удержания	Пик №	Площадь	Высота	Концентрация мкг/м ³
BaP (Бенз(а)пирен)	13.340	1	7444	269	0.0132

Рис. 2. Хроматограмма образца цеолита, содержащего бенз(а)пирен после проведения забора пробы из атмосферного воздуха



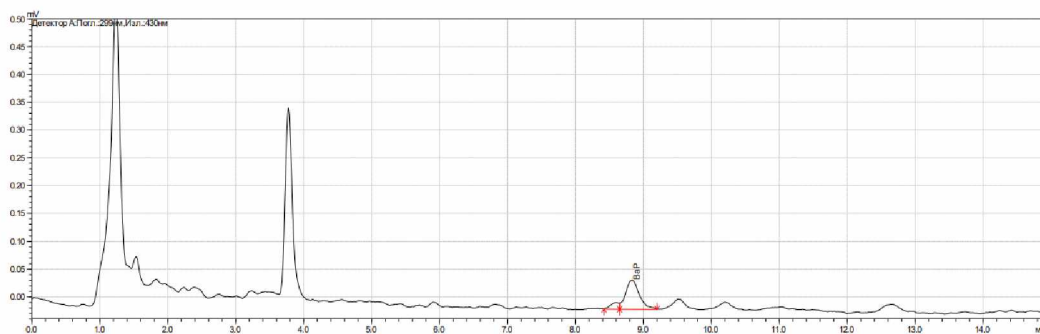
Название	Время удержания	Пик №	Площадь	Высота	Концентрация мкг/м ³
BaP (Бенз(а)пирен)	8.867	2	14446	908	0.1751

Рис. 3. Хроматограмма исходного образца цеолита, прошедшего предварительную подготовку



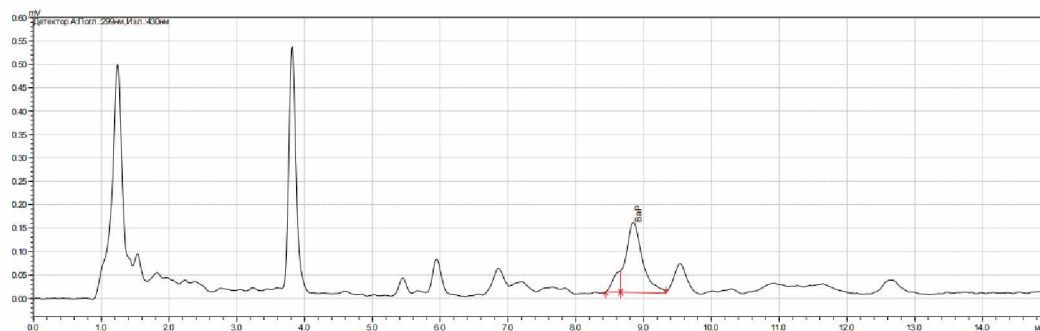
Название	Время удержания	Пик №	Площадь	Высота	Концентрация мкг/м ³
BaP (Бенз(а)пирен)	8.846	2	1488	101	0.0180

Рис. 4. Хроматограмма образца цеолита, прокаленного при 400 градусах в течение 2 ч.



Название	Время удержания	Пик №	Площадь	Высота	Концентрация мкг/м ³
BaP (Бенз(а)пирен)	8.827	2	736	53	0.0089

Рис. 5. Хроматограмма образца цеолита, обработанного ацетонитрилом и затем прокаленного



Название	Время удержания	Пик №	Площадь	Высота	Концентрация мкг/м ³
BaP (Бенз(а)пирен)	8.846	2	2498	149	0.0303

Рис. 6. Хроматограмма образца цеолита, прокаленного и затем обработанного ацетонитрилом

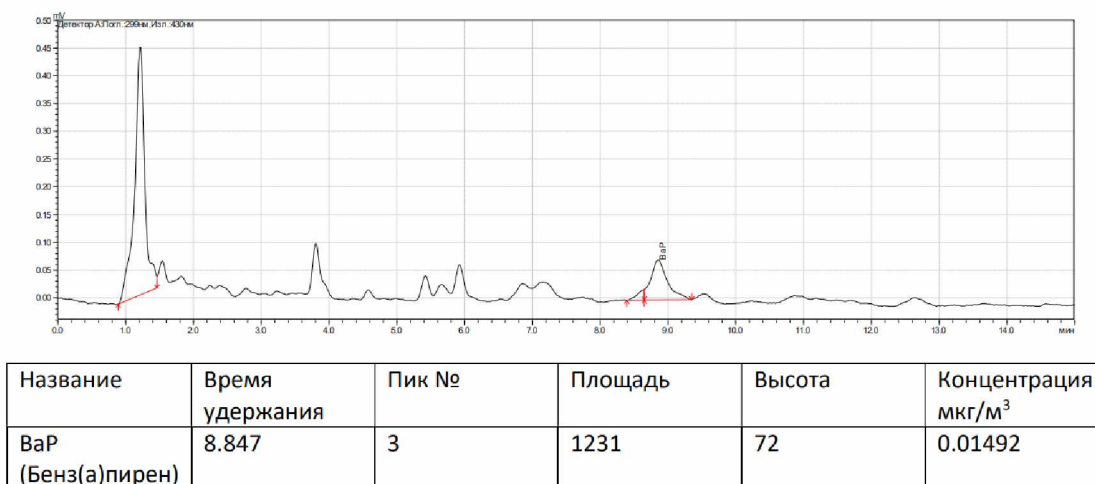


Рис. 7. Хроматограмма образца цеолита, обработанного серной кислотой и затем прокаленного

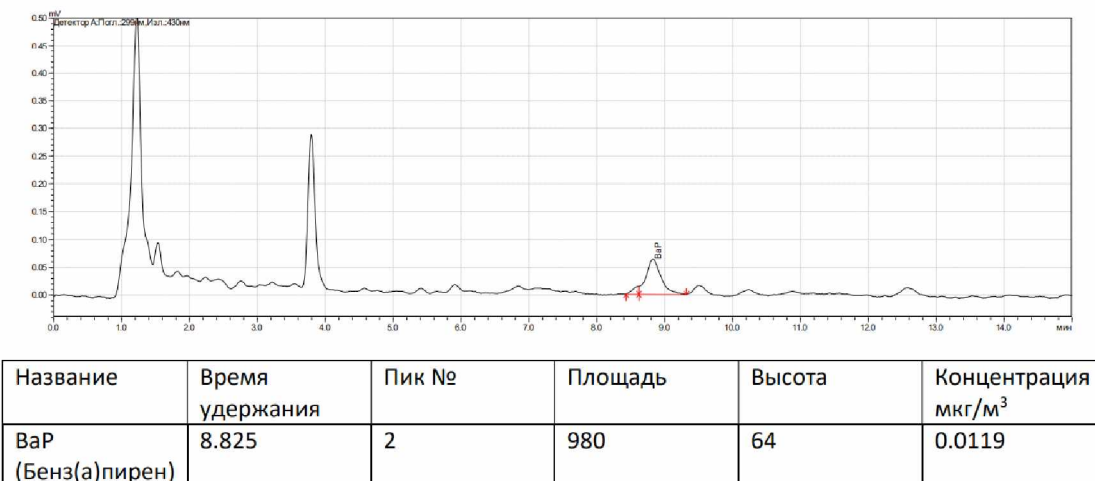


Рис. 8. Хроматограмма образца цеолита, обработанного гидроксидом натрия и затем прокаленного

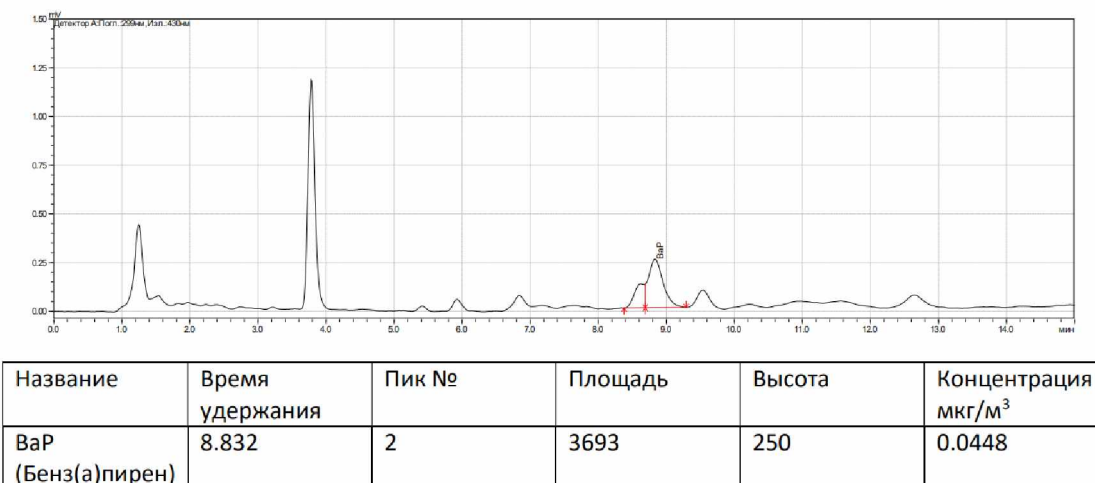


Рис. 9. Хроматограмма образца цеолита, обработанного ацетонитрилом

Наилучший результат с эффективностью 94,9% показал вариант с прокаливанием и последующей обработкой ацетонитрилом. Применение данного способа пробоподготовки на цеолитах с неэкстремальным содержанием балластового бенз(а)пирена позволяет довести концентрацию вещества до состояния следовых количеств, не поддающихся количественному анализу методом ВЭЖХ и не снижающих точность технологии отбора проб высокотемпературных дымовых газов.

В перспективе введение дополнительной процедуры активации цеолита позволит улучшить полученный результат, а также увеличить его сорбционную емкость [11], [13], [15].

1. Представленные результаты свидетельствуют, что цеолит пригоден для использования в качестве фильтра для технологии по определению концентрации бенз(а)пирена в высокотемпературных дымовых газах.

2. Без предварительной подготовки использование сорбента снижает точность отбираемых проб за счет наличия случайного количества накопленного естественным путем бенз(а)пирена.

3. В результате экспериментальных исследований был определен наилучший способ пробоподготовки сорбента, используемого в пробоотборной установке – прокалывание цеолита и обработка раствором ацетонитрила. Пробоподготовка позволяет удалить до 94,9% бенз(а)пирена, накопленного естественным путем.

ЛИТЕРАТУРА

1. База данных физико-химических свойств и синтезов веществ. Свойства вещества: бенз[a]пирен. [Электронный ресурс]. URL: <http://chemister.ru/Database/properties.php?dbid=1&id=729> (дата обращения: 28.04.2023).
2. Буркат В.С. Способ снижения в газовых выбросах концентрации бенз(а)пирена и других полициклических ароматических углеводородов. Патент №2118913, 1998 г.
3. Дабижва О.Н., Хатькова А.Н., Дербенева Т.В. Использование механохимической переработки цеолитсодержащих пород для получения высокоэффективных сорбентов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2012. Т. 12. Вып. 6. С. 860-866.
4. Зонхоева Е.Л. Природные цеолиты Забайкалья: свойства и применения. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geokniga.org/books/28346> (дата обращения: 30.05.2023).
5. Иваницкий М.С., Грига А.Д. Способ очистки газовых выбросов от полициклических ароматических углеводородов, в том числе бенз(а)пирена. Патент №2541320, 2013 г.
6. Кашиников Г.Н., Красеньков В.М., Буркат В.С. Способ снижения в газовых выбросах концентрации бенз(а)пирена и других полициклических ароматических углеводородов. Патент №2118913, 1998 г.
7. Кашиников Г.Н., Кашиников Е.Г., Журавлев С.Ф. Способ очистки газовых выбросов от полициклических ароматических углеводородов, в том числе бенз(а)пирена Патент №2257256, 2003 г.
8. Панькова В.Н. Экология и природопользование: Словарь-справочник. Новосибирск: «Сибирское соглашение», 2000. 212 с.
9. Пинигин В.В. Повышение качества прогнозирования вредных выбросов от котельных установок ТЭС: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Чита, 2014. 22 с.
10. Риккер Ю.О., Кобылкин М.В., Дарбинян З.Г., Акимов И.С. Обзор технологий пробоотбора атмосферного воздуха и дымовых газов на содержание бенз(а)пирена // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: Материалы XXI Международной научно-практической конференции. В 3-х частях. Чита, 29 ноября – 03 декабря 2021 года. Чита: Забайкальский государственный университет, 2021. С. 155-160.
11. Еремин О.В., Эпова Е.С., Русаль О.С., Филленко Р.А., Беломестнова В.А., Федоренко Е.В. Сорбция ионов цинка из водных растворов природным клиноптилолитовым туфом // Успехи современного естествознания. 2015. №10. С. 86-91.
12. Шелепова В.С., Звягинцева А.В. Бензапирен – химико-биологические проблемы совре-

- менности (C20H12) // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2017. №8. С. 477-480.
13. Хатькова А.Н., Размахнин К.К. Перспективы модифицированных цеолитсодержащих пород основных месторождений Забайкальского края // Вестник ЧитГУ. 2011. №3 (70). С. 119-124.
 14. Rikker Yu.O., Kobylkin M.V. Review of technologies for suppressing emissions of benzo(a)pyrene at energy enterprises // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 791 (1), 012044.
 15. Кузнецова Н.С., Риккер Ю.О., Кобылкин М.В. Влияние разных условий активации на сорбционную активность цеолитов Шивиртуйского месторождения // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. Материалы XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Чита, 2022. С. 43-46.

USING ZEOLITE AS A FILTER IN A DEVICE FOR DETERMINING THE BENZ(A)PYRENE CONCENTRATION

© Yu.O. Rikker, N.S. Kuznetsova, M.V. Kobylkin, A.G. Batukhtin, Z.G. Darbinyan
ZSU, Chita, Russia

The difficult environmental situation in a number of Russian cities is largely due to emissions from industrial enterprises, including energy companies. One of the most dangerous environmental pollutants is benz(a)pyrene, which negatively affects the health of the population. The need to control the level of this pollutant, develop approaches to reduce its concentration and optimize the work of energy enterprises in order to minimize emissions is an urgent task for engineers and specialists in the field of energy ecology.

The purpose of the work: to determine the optimal method of preliminary sample preparation of zeolite and to evaluate the possibility of its use as a filter of a sampling plant to determine the concentration of benz(a)pyrene in the exhaust gases of thermal power plants. **Results of the work:** The possibility of using zeolite as a filter for a sampling plant has been proved. Variants of sample preparation of zeolite before use in the filter using alkalis and acids are presented.

Keywords: zeolites, PAHs, sorbent, filter, emissions, benz(a)pyrene, sample preparation.

REFERENCES

1. Database of physical and chemical properties and syntheses of substances (2002), "Substance properties: benzo[a]pyrene", available at: <http://chemister.ru/Database/properties.php?dbid=1&id=729> (Accessed 28 April 2023).
2. Burkat, V.S. (1998). "Method for reducing the concentration of benzo(a)pyrene and other polycyclic aromatic hydrocarbons in gas emissions", Patent №2118913.
3. Dabizha, O.N., Khatkova, A.N. and Derbeneva, T.V. (2012). "The use of mechanochemical processing of zeolite-containing rocks for the production of highly effective sorbents" *Sorption and chromatographic processes*. №12, Issue 6, pp. 860-866.
4. Zonkhoeva, E.L. (2018). "Natural zeolites of Transbaikalia: properties and applications", available at: <https://www.geokniga.org/books/28346> (Accessed 30 May 2023).
5. Ivanitsky, M.S. and Griga, A.D. (2013). "A method for cleaning gas emissions from polycyclic aromatic hydrocarbons, including benzo(a)pyrene". Patent №2541320.
6. Kashnikov, G.N., Krasnenkov, V.M. and Burkat, V.S. (1998), "A method for reducing the concentration of benzo(a)pyrene and other polycyclic aromatic hydrocarbons in gas emissions". Patent №2118913.
7. Kashnikov, G.N., Kashnikov, E.G. and Zhuravlev, S.F. (2003). "Method for purification of gas emissions from polycyclic aromatic hydrocarbons, including benzo(a)pyrene". Patent №2257256

8. Pankova, V.N. (2000). "Ecology and nature management" *Siberian Agreement*, Novosibirsk, 212 p.
9. Pinigin, V. V. (214) "Improving the quality of forecasting harmful emissions from boiler plants of thermal power plants", Abstract of Ph.D. dissertation, Thermal power plants, their power systems and aggregates, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Spbspu), St. Petersburg, Russia.
10. Rikker, Yu. O., Kobylkin, M.V., Darbinyan, Z.G. and Akimov, I.S. (2021) "Overview of technologies for sampling atmospheric air and flue gases for the content of benzo(a)pyrene" *Kulagin Readings: Technique and Technology of Production Processes: Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference, Chita, November 29 – 03 December 2021*. pp. 155-160.
11. Eremin, O.V., Epova, E.S., Rusal, O.S., Filenko, R.A., Belomestnova, V.A. and Fedorenko, E.V. (2015), "Sorption of zinc ions from aqueous solutions by natural clinoptilolite tuff" *Successes of modern natural science*. №10. pp. 86-91.
12. Shelepova, V. S. and Zvyagintseva, A. V. (2017). Benzopyrene - chemical and biological problems of our time (C20H12). *Fire safety: problems and prospects*. №8, pp. 477-480.
13. Khatkova, A.N. and Razmakhnin, K.K. (2011). "Prospects for modified zeolite-containing rocks of the main deposits of the Trans-Baikal Territory" *Bulletin of the Chita State University*. №3, pp. 119- 124.
14. Rikker, Yu.O. and Kobylkin, M.V. (2020). "Review of technologies for suppressing emissions of benzo(a)pyrene at energy enterprises" *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. №791 (1), pp. 012044.
15. Kuznetsova N.S., Rikker, Yu.O. and Kobylkin, M.V. (2022). "The influence of different activation conditions on the sorption activity of zeolites of the Shivyrtsk deposit" *Kulagin Readings: Technique and Technology of Production Processes: Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference, Chita*, pp. 43-46.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 678

DOI: 10.26200/GSTOU.2023.83.55.003

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДА

© С. С. Висханов¹, Х. Х. Сапаев², З. Ш. Гацаев¹, Д. С. Точиев³¹ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия²ЧГУ им. А. А. Кадырова, Грозный, Россия³ИГУ, Магас, Россия

Аннотация. Использование наполнителей в полимерных материалах является одним из способов улучшения их свойств. Наноккомпозиты, полученные путем добавления наночастиц в полимерную матрицу, обладают уникальными свойствами, такими как повышенная прочность, жесткость и термическая стабильность и др. В настоящее время для создания полимерных наноккомпозитов большое внимание уделяется использованию природных наполнителей, таких как вермикулит, диатомит и перлит. Эти материалы обладают легкой и пористой структурой, что позволяет им эффективно усиливать полимерную матрицу. В качестве полимерной матрицы использовался полиамид-6 (ПА-6). В качестве наполнителя использовались вермикулит, диатомит и перлит. Микрофотографии образцов получены с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 3D 200i. Получены образцы полимерных наноккомпозитов на основе полиамида-6 с добавлением вермикулита, диатомита и перлита. Для визуальной характеристики исследуемых образцов и анализа морфологии их поверхности получены электронные микрофотографии разного увеличения. Показано, что частицы минеральных наполнителей в объеме полимера распределены хаотично, что введение минеральных наполнителей в расплав полимера приводит к появлению новых надмолекулярных структур, возможно, в данном случае частицы минеральных наполнителей играют роль нуклеатора кристаллизации.

Ключевые слова: полимерный наноккомпозит, полиамид, вермикулит, перлит, диатомит.

Формат цитирования: Висханов С. С., Сапаев Х. Х., Гацаев З. Ш., Точиев Д. С. Использование минеральных наполнителей в полимерных композитах на основе полиамида // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX, № 4 (34). С. 67-75. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.83.55.003

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к созданию новых полимерных композитных материалов. При небольшом содержании наполнителя удается улучшить такие свойства полимеров, как механические, термостойкие, ударные и др. [1-4]. При этом благодаря новым свойствам наноккомпозитные материалы находят широкое применение в различных областях производства, технологии и науки. Важной спецификой современных полимерных композитов является создание их специальных модификаций под конкретные области применения, учитывая особенности

размера частиц наполнителей и их взаимодействия с полимерной матрицей.

Размер частиц минеральных наполнителей зависит от их природы и специфических свойств. Различные минералы имеют разную структуру и морфологию, что влияет на размер и форму частиц. Размер частиц наполнителей играет важную роль в композитных материалах, поскольку он влияет на их дисперсию в матрице, поверхностные свойства, а также механические и физико-химические характеристики. Контроль и оптимизация размера частиц минеральных наполнителей является

важным фактором для достижения требуемых свойств композитных материалов и их применений в различных областях промышленности.

К числу одних из перспективных полимерных материалов относится полиамид-6 (ПА-6). ПА-6 применяется для улучшения свойств конструкционных материалов, а именно в производстве подшипников, деталей для роторов в моторах и др. Для достижения необходимых свойств полиамиды наполняются различными добавками, например, крахмал, сажа, порошки различных металлов, технический углерод, бентонит, графит и др. [5-8]. Полимерные композиты на основе ПА имеют высокую прочность и жесткость, а также высокие показатели износа и удара. Также эти композиты используются во многих отраслях промышленности, таких как автомобильная, авиационная, электронная. В автомобильной промышленности, например, композиты на основе ПА используются для производства деталей кузова и двигателя, которые требуют высокой прочности и жесткости при низком весе.

Однако для достижения эффективных результатов по конкретным свойствам содержание этих добавок составляет 5-10%, а в некоторых случаях даже 30-70%, например, в случае гидроксидов металлов [9, 10]. При этом из-за высокого содержания таких добавок происходит повышение вязкости полимера при его обработке и ухудшение основных физико-механических характеристик. Поэтому путь решения данной проблемы – это использование наполнителей, улучшающих свойства полиамида. Одними из таких наполнителей являются минеральные наполнители, такие как вермикулит, диатомит и перлит [11-13].

Вермикулит – это минерал из группы гидрослюд, который может использоваться в качестве наполнителя для полимерных материалов. Его высокая способность к поглощению воды и других жидкостей может улучшить термические свойства полимерных нанокompозитов. Полимерные нанокompозиты, содержащие вермикулит, обладают улучшенными механическими свойствами и более высокой термической стабильностью. Это делает их привлекательными для использования в различных про-

мышленных приложениях, таких как автомобильная и аэрокосмическая промышленность, электроника и медицинская техника [5, 11]. Диатомит имеет высокую пористость и также используется в качестве наполнителя для полимерных материалов, улучшая их механические свойства и термическую стабильность. Природный минерал перлит состоит из силикатов алюминия, калия, натрия и магния и имеет легкий и пористый характер. В полимерных материалах перлит способствует улучшению механических свойств и термической стабильности.

Одной из наиболее оптимальных технологий получения полимерных композитов с наполнителями является экструдирование [14, 15]. При экструзии происходит смешивание полимера с наполнителями. Этот процесс осуществляется путем нагревания материала и пропускания через экструдер, который имеет специальную насадку для формирования нити. Важно поддерживать оптимальную температуру и скорость экструзии, чтобы обеспечить равномерное распределение наночастиц в матрице полимера. После процесса экструзии сформируется нить диаметром 3 мм. Эта нить может быть дальше обработана для получения гранул, которые будут содержать частицы наполнителя, равномерно распределенные по всему объему матрицы полимера. Для получения гранул полученную после экструзии нить непрерывно подают в гранулятор для процесса измельчения и формирования гранул. Эти гранулы могут быть использованы для изготовления различных образцов для экспериментальных испытаний.

Для проведения исследования о распределении частиц по размерам был применен метод динамического рассеяния света на анализаторе субмикронных частиц HORIBA LB 550. Подготовка образцов для исследования в виде суспензий проходила следующим образом: сначала 2 г наполнителя в порошкообразном состоянии с размерами гранул менее 60 мкм постепенно насыпали на поверхность 50 мл дистиллированной воды. В процессе насыпания проводилось периодическое перемешивание, чтобы обеспечить равномерное распределение наполнителя и образование однородной суспензии.

В качестве полимерной матрицы использовался ПА-6. Полимерные композиты получали методом экструзии. При этом сначала наполнители (вермикулит, диатомит и перлит) нагревали в муфельной печи до 900°C в течение часа со скоростью $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, после чего охлаждали до исходной температуры со скоростью $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. После этого наполнители измельчали в мельнице тонкого помола до образования тонкодисперсного порошка с размерами гранул менее $60\ \mu\text{м}$. Далее полученный порошок предварительно перемешивали с полимерными гранулами, а после этого эту смесь пропускали через экструдер при температуре выше температуры плавления полимера [16, 17]. Таким образом в экструдере происходило перемешивание порошкообразного наполнителя и расплавленного полимера. Количество наполнителя составляло 3% от массы матрицы ПА-6.

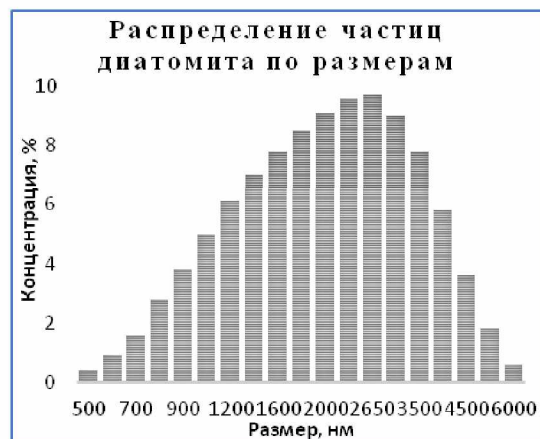
Образцы полимерных композитов получали в виде непрерывной нити диаметром около 2 мм путем перемешивания расплавленного ПА-6 и наполнителей в двухшнековом экструдере (модель: SJZS-10A) при температуре 240°C [8, 17]. Скорость вращения шнеков составляла 35 об/мин. Далее полученную нить измельчали с помощью резательной установки, получая гранулы цилиндрической формы диаметром около 2 мм и длиной 3-4 мм.

Для визуальной характеристики исследуемых образцов с наполнителями, анализа морфологии их поверхности были получены микрофотографии разного увеличения, с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 3D 200i [18].

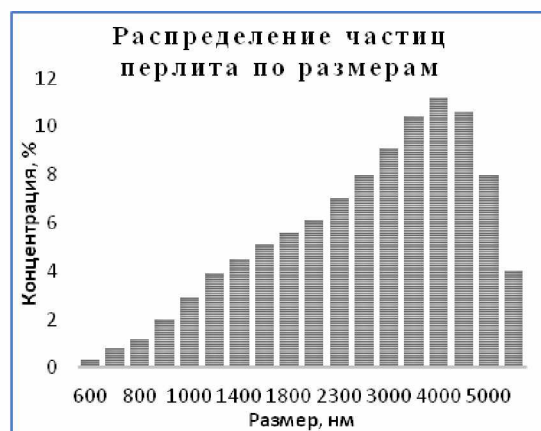
На рис. 1 приведены полученные результаты анализа трех образцов водных суспензий с содержанием следующих наполнителей: вер-



а)



б)



в)

Рис. 1. Распределение частиц по размерам для всех образцов наполнителей

микулит (а), диатомит (б) и перлит (в).

На рис. 1 представлены результаты анализа размеров частиц трех наполнителей: вермикулита, диатомита и перлита. В случае вермикулита наблюдается начальный размер частиц, равный примерно 900 нм, при этом средний размер частиц составляет около 2,5-3 мкм. Средний размер частиц диатомита составляет примерно 2 мкм, а размер частиц начинается с 500 нм. В случае перлита размеры его частиц начинаются с около 600 нм, а средний размер составляет 2,7-3 мкм.

Для получения микрофотографий образцов наполнителей была использована более высокая разрешающая способность, что обу-

словлено более высокой электропроводностью вермикулита, диатомита и перлита по сравнению с композитами на их основе. Снимки полимерных композитов, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, демонстрируют темные и светлые участки, вызванные разрядом образца под действием электронного пучка. На рис. 2 представлены электронные микрофотографии наполнителя вермикулита при увеличении 5000 раз (рис. 2а) и 10000 раз (рис. 2б). Также здесь приведены электронные микрофотографии полученных полимерных композитов ПА/вермикулит при увеличении 5000 раз (рис. 2в) и 10000 раз (рис. 2г).

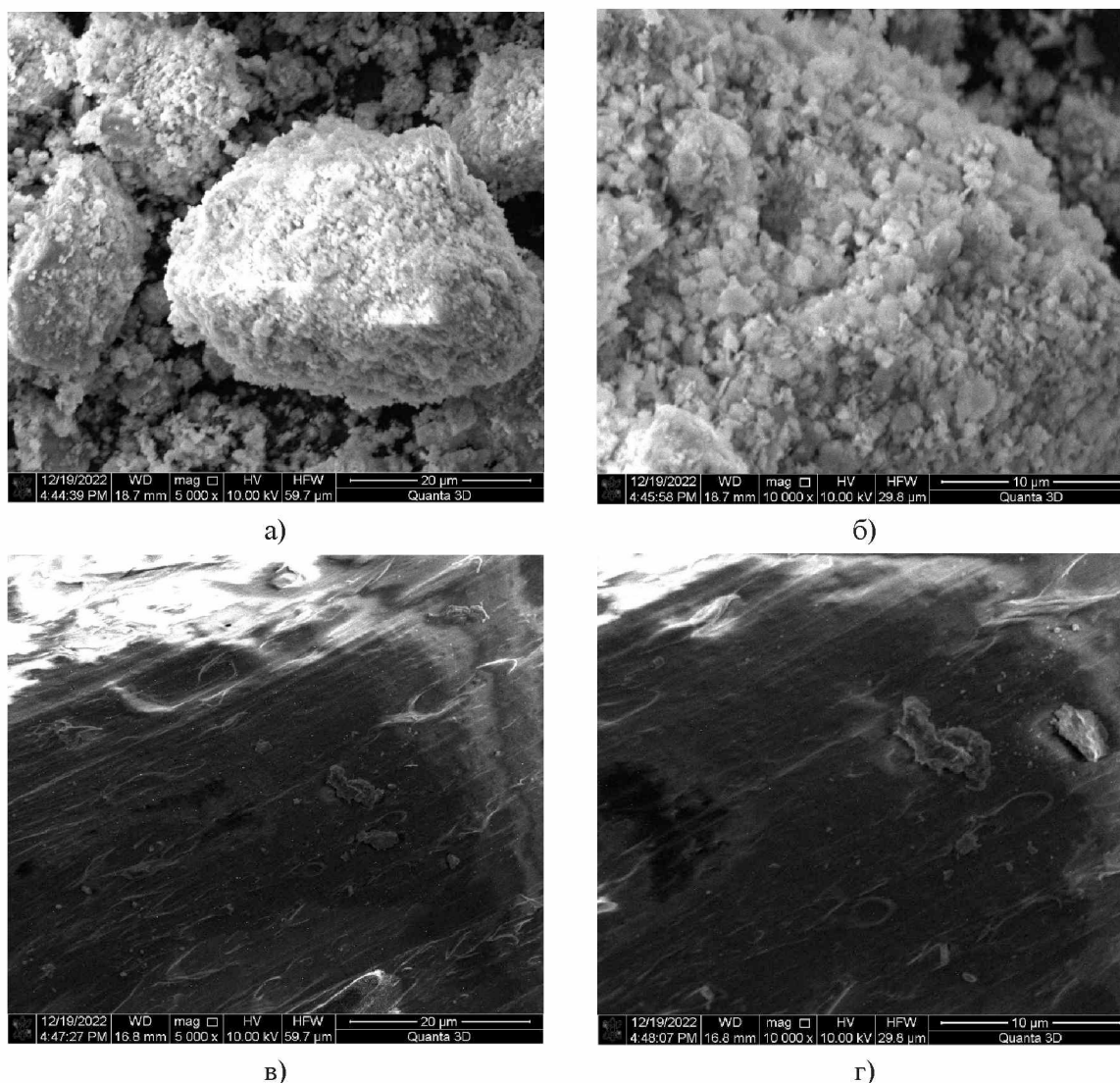


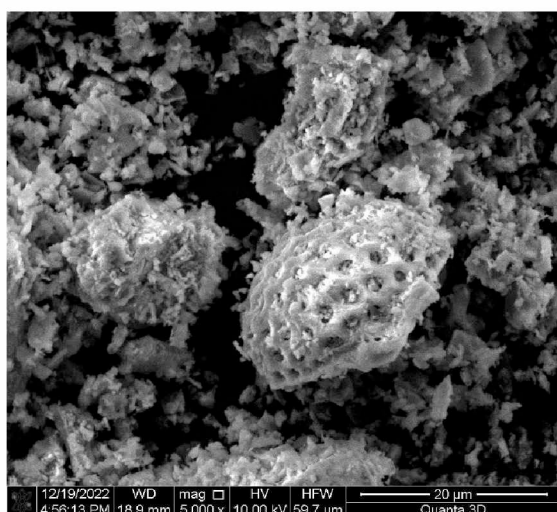
Рис. 2. Микрофотографии вермикулита при увеличении 5000 раз (а) и 10000 раз (б), а также полимерного композита ПА/вермикулит при увеличении 5000 раз (в) и 10000 раз (г).

Вермикулит обладает пористой структурой и высокой поверхностной активностью. Его частицы имеют отрицательный заряд на поверхности, что приводит к образованию агломератов из-за электростатического притяжения между ними. На рис. 2 (а, б) видно, что частицы вермикулита имеют размеры меньше 1 мкм в виде агломератов (комков), размерами от 5 до 20 мкм и иногда больше. Это наглядно видно при увеличении одного из участков скопления, размерами около 30 мкм рис. 2 (б). Также здесь видно, что частицы вермикулита обладают различной формой и толщиной, что может влиять на их поверхностную активность. На рис. 2 (в, г) представлены микрофотографии поверхности композита ПА/вермикулит, полученные

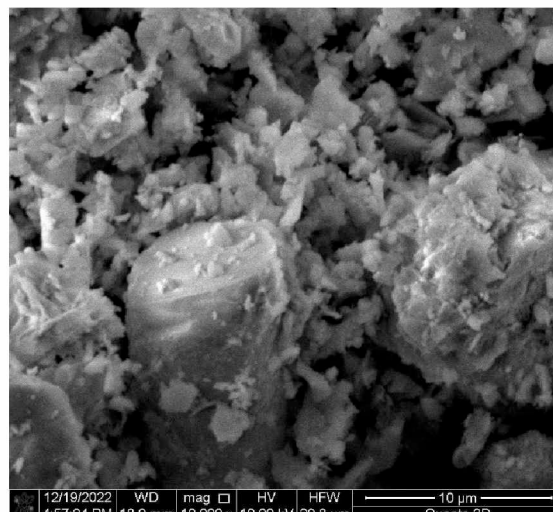
с помощью растрового электронного микроскопа. На данных изображениях наблюдаются частицы наполнителя вермикулита различных размеров, имеющие форму крупинок. Кроме того, на поверхности композита можно заметить небольшие скопления вермикулита размером в диапазоне от 1 до 3 мкм.

На рис. 3 (а, б) приведены электронные микрофотографии наполнителя диатомита при увеличении 5000 раз (рис. 3а) и 10000 раз (рис. 3б). На рис. 3 (в, г) представлены электронные микрофотографии полимерных композитов ПА/диатомит при увеличении 1000 раз (рис. 3в) и 5000 раз (рис. 3г).

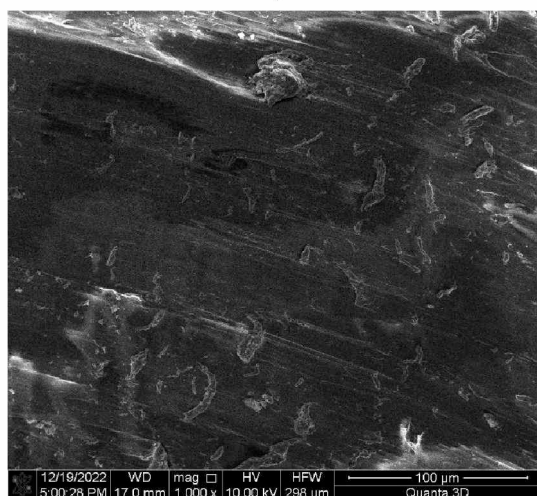
На электронных микрофотографиях, представленных на рис. 3 (а, б), наблюдается мно-



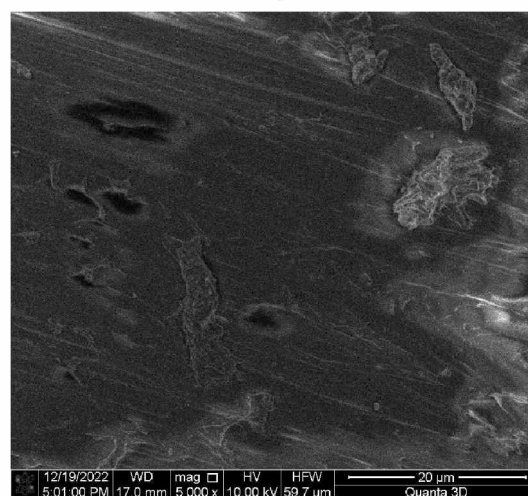
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Снимки образца диатомита при увеличении 5000 раз (а) и 10000 раз (б), а также полимерного композита ПА/диатомит при увеличении 2000 раз (в) и 5000 раз (г)

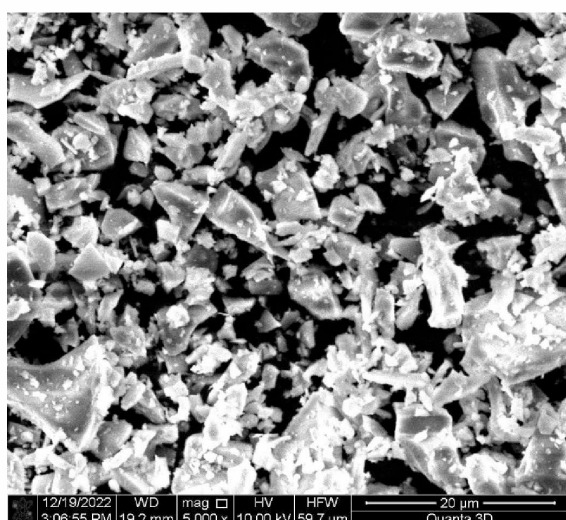
гогранная структура наполнителя диатомита, состоящая из мелких частиц размерами от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров. Здесь видно, что имеются отдельные частицы диатомита, а также их скопления размерами около 20 мкм. Описанные морфологические особенности могут оказывать существенное влияние на свойства композитов, включая их механическую прочность и термическую стабильность.

Неравномерное распределение наполнителя диатомита в матрице полимера, наблюдаемое на рис 3 (в, г), вероятно, связано с особенностями структуры диатомита. Мелкие ча-

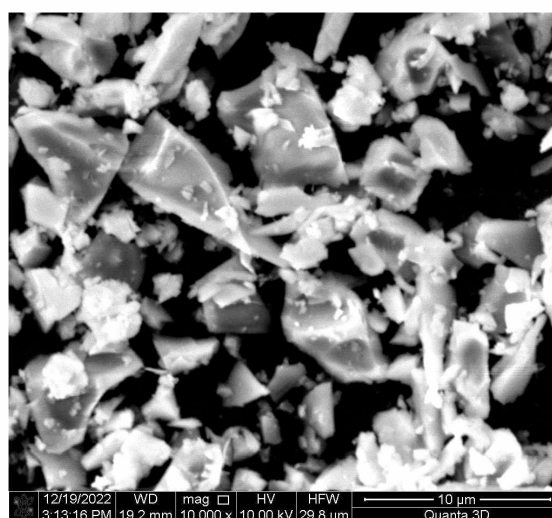
стицы диатомита имеют многогранную форму и различные размеры, что может приводить к образованию скоплений частиц в матрице полимера, обладающих различной толщиной и длиной.

На рис. 4 (а, б) представлены электронные микрофотографии наполнителя перлита, полученные при увеличении в 5000 и 10000 раз соответственно. На рис. 4 (в, г) представлены электронные микрофотографии полимерных композитов ПА/перлит при увеличении 5000 раз (рис. 4в) и 10000 раз (рис. 4г).

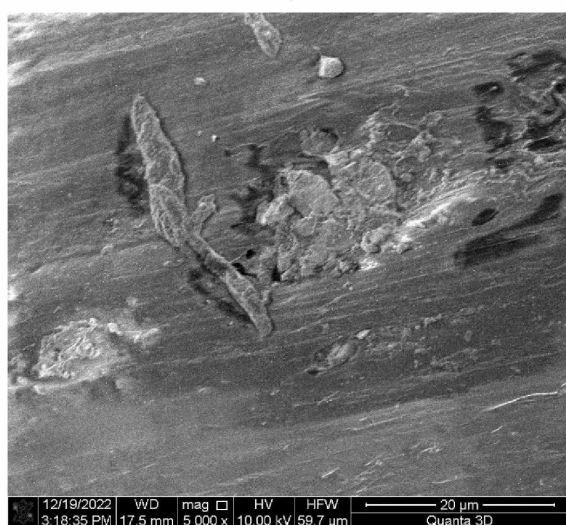
Микрофотографии перлита, представленные на рис. 4 (а, б), соответствуют морфоло-



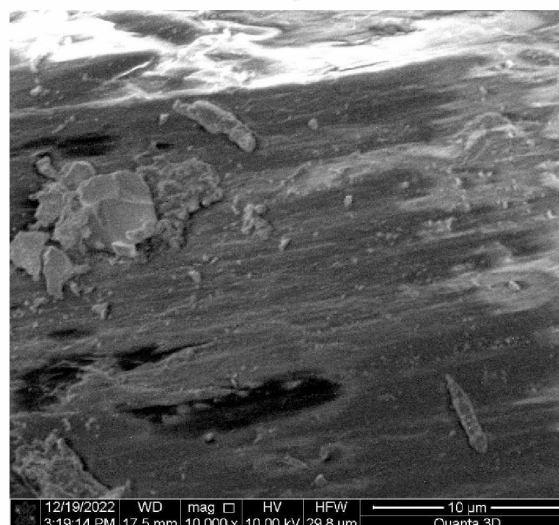
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Микрофотографии перлита при увеличении 5000 раз (а) и 10000 раз (б), а также полимерного композита ПА/перлит при увеличении 5000 раз (в) и 10000 раз (г)

гии частиц перлита. Здесь видно, что частицы перлита имеют форму с заостренным кончиком, размерами от нескольких мкм до нескольких десятков мкм. Также следует отметить, что на представленных микрофотографиях нет участков, где наблюдается скопление частиц наполнителя. На микрофотографиях полимерных композитов ПА/перлит, представленных на рис. 4 (в, г), видно, что частицы наполнителя перлита распределены на поверхности композита неравномерно. Здесь наблюдаются участки скопления частиц наполнителя размерами от 20 до 40 мкм. Неравномерное распределение частиц с участками их скопления может оказывать существенное влияние на механические свойства, такие как предел прочности при растяжении. Это объясняется тем, что наличие скоплений наполнителя может привести к разрушению материала именно в этой области при растяжении полимерного композита.

Выводы

Результаты исследований модифицированного ПА-6 с помощью растровой электронной микроскопии подтвердили наличие изменений в структуре материала. Полученные компо-

зитные материалы представляют собой сложную неоднородную систему, которая состоит из полиамида-6 и введенных в него минеральных наполнителей. Толщина этих наполнителей составляет несколько микрометров, а их диаметры зависят от метода получения и свойств используемого минерала. Введение минеральных наполнителей в расплав полимера приводит к формированию новых надмолекулярных структур, что может быть связано с ролью наночастиц минеральных наполнителей в качестве нуклеатора кристаллизации. Таким образом, полученные материалы имеют множество особенностей, которые оказывают влияние на их свойства и потенциальные применения. Полученные результаты доказывают эффективность использования минеральных наполнителей с модификаций ПА-6 и имеют потенциал для дальнейшего применения композитных материалов. Таким образом, полученные данные являются вкладом в исследование структуры и свойств композитных материалов на основе полиамида-6 и минеральных наполнителей, которые будут использоваться для разработки новых композитов с улучшенными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hassan H., Hocine N.A., Médéric P., Deffarges M.P., Poirot N. Thermal and mechanical properties of PA12/C30B nanocomposites in relationship with nanostructure. // *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. V. 132. № 18.
2. Sharma S., Kumar Poddar M., Moholkar V.S. Enhancement of thermal and mechanical properties of poly (MMA-co-BA)/Cloisite 30B nanocomposites by ultrasound-assisted in-situ emulsion polymerization. // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017. V. 36. P. 212-225.
3. Suparanon T., Phusunti N., Phetwarotai W. Properties and characteristics of polylactide blends: Synergistic combination of poly (butylene succinate) and flame retardant. // *Polymers for Advanced Technologies*. 2018. V. 29. № 2. P. 785-794.
4. Висханов С.С., Хаширова С.Ю., Микитаев А.К., Межидов В.Х. Влияние бентонитовой глины месторождения Чеченской республики на физико-механические свойства полиэтилена высокого давления // *Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы»*. Нальчик, 2012. С. 53-57.
5. Наполнители для полимерных композиционных материалов // *Под ред. Г.С. Каца, Д.В. Микевски*; пер. с англ. Москва: Химия, 1981. 736 с.
6. Микитаев А.К., Каладжян А.А., Леднев О.Б., Микитаев М.А. Нанокompозитные полимерные материалы на основе органоглин // *Электронный журнал «Исследовано в России»*. 2004. № 83. С. 912-922. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/083.pdf>.
7. Межидов В.Х., Дадашев Р.Х., Гацаев З.Ш., Галанина Н.А. Физико-химические процессы при синерезисе гидрогеля бентонита // *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2022. Т. 18. № 3 (29). С. 82-89. – DOI 10.34708/GSTOU.2022.72.56.009. – EDN GYZNVW.
8. Висханов С.С., Сапаев Х.Х., Слонов А.Л., Иванова Л.В., Шафенков М.Ю. Органомодификация и исследование свойств природного бентонита месторождения Чеченской Респу-

- блики // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2022. Т. 12. №3. С. 47-51. – EDN GSGFYZ.
9. *Hornsby P.R., Wang J., Cosstick K., Rothon R.N., Jackson G., Wilkinson G.* Mechanism of fire retardancy in polyamides filled with magnesium hydroxide, *Progress in Rubber & Plastics Technology* // 1994. V. 10. P. 204-220.
 10. *Hirschler M.M.* Reduction of smoke formation from and flammability of thermoplastic polymers by metal oxides. // *Polymer*. 1984. V. 25. I. 3. P. 405-411.
 11. *Kelly P., Akelah A., Moet A.J.* Mater. Sci. 1994. V.29. P. 2274-2280.
 12. *Даукаев А.А.* Глины четвертичного возраста на территории Чеченской Республики // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2020. Т. 5. №2 (20). С. 14-19. – DOI 10.25744/genb.2020.20.2.002. – EDN GGJSUP.
 13. *Муртазаев С.-А. Ю., Сайдумов М.С., Саламанова М.Ш., Гацаев З.Ш.* Перспективы использования бентонитовых глин в составах бетонных композитов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2020. Т. 16. №4 (22). С. 70-76. – DOI 10.34708/GSTOU.2020.49.91.010. – EDN ARFMOW.
 14. *Bee S.L., Abdullah M.A. A., Bee S.T., Sin L.T., Rahmat A.R.* Polymer nanocomposites based on silylated-montmorillonite: A review // *Progress in Polymer Science*. 2018. V. 85. P. 57-82.
 15. *Zhang G., Wu T, Lin W., Tan Y., Chen R., Huang Z., Yin X., Qu J.* Preparation of polymer/clay nanocomposites via melt intercalation under continuous elongation flow // *Composites Science and Technology*. 2017. V. 145. P. 157-164.
 16. Патент РФ. №2398732. Способ получения полимерных нанокомпозитов/*Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Титорский И.А., Покидько Б.В., Битт В.В., Склярёвская Н.М., Волкова Т.С.* 10.09.2010.
 17. *Peponi L., Puglia D., Torre L., Kenny J.M.* Processing of nanostructured polymers and advanced polymeric based nanocomposites. // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2014. V. 85. №1. P. 1-46.
 18. *Саламанова М.Ш., Гацаев З.Ш., Сызранцев В.В.* Исследование свойств щелочных вяжущих материалов с добавкой тонкодисперсного бентонита // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. №8. С. 1017-1026. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.8.1017-1026. – EDN CNIZIL.

USE OF MINERAL FILLERS IN POLYAMIDE-BASED POLYMER COMPOSITES

© S. S. Vikhanov, Kh. Kh. Sapaev, Z. Sh. Gatsaev, D. S. Tochiev

GSTOU named after acad. M. D. Millionshchikov, Grozny

CSU named after A. A. Kadyrov

ISU, Magas, Russia

The use of fillers in polymer materials is one of the ways to improve their properties. Nanocomposites obtained by adding nanoparticles to a polymer matrix have unique properties, such as increased strength, rigidity and thermal stability, etc. Currently, to create polymer nanocomposites, much attention is paid to the use of natural fillers such as vermiculite, diatomite and perlite. These materials have a light and porous structure, which allows them to effectively reinforce the polymer matrix. Polyamide-6 (PA-6) was used as the polymer matrix. Vermiculite, diatomite and perlite were used as filler. Microphotographs of the samples were obtained using a Quanta 3D 200i scanning electron microscope. Samples of polymer nanocomposites based on polyamide-6 with the addition of vermiculite, diatomite and perlite were obtained. To visually characterize the samples under study and analyze the morphology of their surface, electron micrographs of different magnifications were obtained. It has been shown that particles of mineral fillers in the volume of the polymer are randomly distributed. It has been shown that the introduction of mineral fillers into the polymer melt leads to the appearance of new supramolecular structures; perhaps, in this case, particles of mineral fillers play the role of a crystallization nucleator.

Keywords: polymer nanocomposite, polyamide, vermiculite, perlite, diatomite.

REFERENCES

1. Hassan H., Hocine N.A., Médéric, P., Deffarges, M. P. and Poirot, N. (2015). 'Thermal and mechanical properties of PA12/C30B nanocomposites in relationship with nanostructure'. *Journal of Applied Polymer Science*. V. 132. №18.
2. Sharma, S., Kumar, Poddar M. and Moholkar, V. S. (2017). 'Enhancement of thermal and mechanical properties of poly (MMA-co-BA)/Cloisite 30B nanocomposites by ultrasound-assisted in-situ emulsion polymerization'. *Ultrasonics Sonochemistry*. V. 36, pp. 212-225.
3. Suparanon, T., Phusunti, N. and Phetwarotai, W. (2018). 'Properties and characteristics of polylactide blends: Synergistic combination of poly (butylene succinate) and flame retardant'. *Polymers for Advanced Technologies*. V. 29. №2, pp. 785-794.
4. Vikhanov, S. S., Khashirova, S. Yu., Mikitaev, A. K. and Mezhidov, V. Kh. (2012). 'The influence of bentonite clay deposits of the Chechen Republic on the physical and mechanical properties of high-density polyethylene'. *Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference "New Polymer Composite Materials"*. Nalchik, pp. 53-57.
5. Katsa, G. S. and Mikevski D. V. (ed.) (1981). *Fillers for polymer composite materials*. Trans. from English, Khimiya, Moscow, 736 p.
6. Mikitaev, A. K., Kaladzhyan, A. A., Lednev, O. B. and Mikitaev, M. A. (2004). 'Nanocomposite polymer materials based on organoclays'. *Electronic journal "Researched in Russia"*. №83, pp. 912-922 available at: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/083.pdf>.
7. Mezhidov, V. Kh., Dadashev, R. Kh., Gatsaev, Z. Sh., Galanina and N.A. Physico-chemical processes during syneresis of bentonite hydrogel. // *Bulletin of GGNTU. Technical science*. 2022. T. 18. №3 (29), pp. 82-89. DOI 10.34708/GSTOU.2022.72.56.009. EDN GYZNVW.
8. Vikhanov, S. S., Sapaev, Kh.Kh., Slonov, A. L., Ivanova, L. V. and Shafenkov, M. Yu. (2022). 'Organomodification and study of the properties of natural bentonite deposits of the Chechen Republic'. *News of Kabardino-Balkarian State University*. 2022. V. 12. №3. P. 47-51. EDN GSGFYZ.
9. Hornsby, P. R., Wang, J., Cosstick, K., Rother, R. N., Jackson, G., Wilkinson, G. (1994). *Mechanism of fire retardancy in polyamides filled with magnesium hydroxide*, *Progress in Rubber & Plastics Technology*. V. 10. P. 204-220.
10. Hirschler, M. M. (1984). *Reduction of smoke formation from and flammability of thermoplastic polymers by metal oxides*. *Polymer*. V. 25, I. 3, pp. 405-411.
11. Kelly, P., Akelah, A. and Moet, A. J. (1994). *Mater. Sci.* V.29, pp. 2274-2280.
12. Daukaev, A. A. (2020). 'Quaternary clays on the territory of the Chechen Republic' *Grozny Natural Science Bulletin*. V. 5, No. 2 (20). pp. 14-19. DOI 10.25744/genb.2020.20.2.002. – EDN GGJSUP.
13. Murtazaev, S.A. Yu., Saidumov, M. S., Salamanova, M. Sh. and Gatsaev, Z. Sh. (2020). 'Prospects for the use of bentonite clays in concrete composites'. *Herald of GSTOU. Technical sciences*. V. 16, №4 (22), pp. 70-76. DOI 10.34708/GSTOU.2020.49.91.010. EDN ARFMOW.
14. Bee, S. L., Abdullah, M.A. A., Bee, S. T., Sin, L. T., and Rahmat, A. R. (2018). 'Polymer nanocomposites based on silylated-montmorillonite: A review' *Progress in Polymer Science*. V. 85, pp. 57-82.
15. Zhang, G., Wu, T, Lin, W., Tan, Y., Chen, R., Huang, Z., Yin, X. and Qu, J. (2017). 'Preparation of polymer/clay nanocomposites via melt intercalation under continuous elongation flow'. *Composites Science and Technology*. V. 145, pp. 157-164.
16. Bader, E. Ya., Petrova, G. N., Tutorsky, I. A., Pokidko, B. V., Bitt, V. V., Sklyarevskaya, N. M. and Volkova, T. S. (2010). *Method for producing polymer nanocomposites*. RF, patent №2398732.
17. Peponi, L., Puglia, D., Torre, L. and Kenny, J. M. (2014). 'Processing of nanostructured polymers and advanced polymeric based nanocomposites'. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. V. 85. №1, pp. 1-46.
18. Salamanova, M. Sh., Gatsaev, Z. Sh. and Syzrantsev, V. V. (2022). 'Study of the properties of alkaline binders with the addition of finely dispersed bentonite'. *Bulletin of MGSU*. V. 17, №8, pp. 1017-1026. DOI 10.22227/1997-0935.2022.8.1017-1026. EDN CNIZIL.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МАССОПРОВОДНОСТИ ГИДРОКСИДОВ КАЛЬЦИЯ В БЕТОНЕ ДЛЯ МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ

© Нго Суан Хунг¹, Б.И. Булгаков², ЛЕ Чунг Хиеу³

¹ Ханойский горно-геологический университет; Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам

² НИУ МГСУ, Москва, Россия

³ Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

На протяжении многих лет проблема низкой долговечности железобетонных конструкций в гидротехнических средах вызывает беспокойство, особенно для морских бетонных конструкций, в том числе на участках, подверженных воздействию волн и приливов. Особенно важно изучение явления коррозии бетона вследствие диффузии гидроксида кальция, образующегося в процессе гидратации цемента. Поэтому цель данного исследования – анализ влияния водной среды на коэффициент массопроводности гидроксидов кальция в бетонах морских гидротехнических сооружений. Методом термогравиметрического анализа, применяемым в исследованиях на основе действующих российских и вьетнамских стандартов, проведена оценка свойств сырья, бетонных смесей и бетона, получаемого при затвердевании. Содержание гидроксида кальция определяли термогравиметрическим анализом центральной части кубического образца с интервалом в 14 дней в течение 70-дневного испытания. Исследования проводились как в обычной воде, так и в 5% растворе поваренной соли. Для оценки и представления результатов эксперимента использовалось вспомогательное компьютерное программное обеспечение (Origin 2018 и Matlab). По результатам расчетов построены графики зависимости концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине бетонных образцов, находящихся в различных водных средах. Приведено изменение коэффициента массопроводности гидроксида кальция во времени.

Ключевые слова: коэффициент массопроводности, гидроксид кальция, морские сооружения, коррозионное разрушение железобетонных конструкций.

Формат цитирования: Хунг НГО Суан, Булгаков Б.И., Хиеу ЛЕ Чунг. Определение коэффициента массопроводности гидроксидов кальция в бетоне для морских сооружений // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX, №4 (34). С.76-84. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.74.26.001

В настоящее время область гидростроительства имеет важное значение для проектирования и строительства ирригационных сооружений, гидроэнергетики, берегоукрепления, а также работ вдоль континентального шельфа и в районе прибрежных лиманов.

Для большинства стран с протяженными приграничными территориями, расположенными вдоль морей и океанов, основной проблемой является проектирование, строительство и обслуживание сооружений и транспорта при соприкосновении с территорией прибрежных вод [1, 2].

Для отмеченных целей уже более 200 лет успешно используется железобетон, который является одним из самых популярных в мире строительных материалов для гидростро-

ительства [3]. Его основные преимущества проявляются в следующем [4, 5]:

- хорошая водостойкость;
- легкое изготовление конструкций разных размеров;
- хорошая сопротивляемость действию соляных растворов;
- доступность, невысокая цена.

Однако на протяжении многих лет проблема низкой долговечности железобетонных конструкций в гидротехнических средах вызывает беспокойство. Важно отметить, что разрушение железобетонных конструкций происходит за счет процесса коррозии, вызванного диффузией (массопереносом) (см. рис. 1) [6, 7].

Как известно, коррозия стали в бетонных конструкциях – электрохимический процесс,

коррозионные элементы часто образуются из-за разницы концентраций ионов и газов вблизи поверхности металла (см. рис. 2). Идеальным считается вариант, когда металлическая арматура имеет на поверхности тонкую оксидную пленку и поэтому становится пассивной к дальнейшей коррозии.

На рисунке 3 показаны воздействия разного уровня, приводящие к эрозии бетонных и железобетонных конструкций в морской среде.

При оценке долговечности железобетонных конструкций главным образом учитывается фактор коррозии стальной арматуры в бетоне вследствие проникновения хлорид-ионов. На основе моделей определения коэффициента проникновения хлорид-ионов в бетон исследованы и оценены выводы о коррозии стальной арматуры в бетоне и разрушении конструкций. Разрушение бетонных слоев под воздействием ионов солей в морской среде представлено на рисунке 4.



Рис. 1. Железобетонные конструкции, морские сооружения, подверженные коррозии

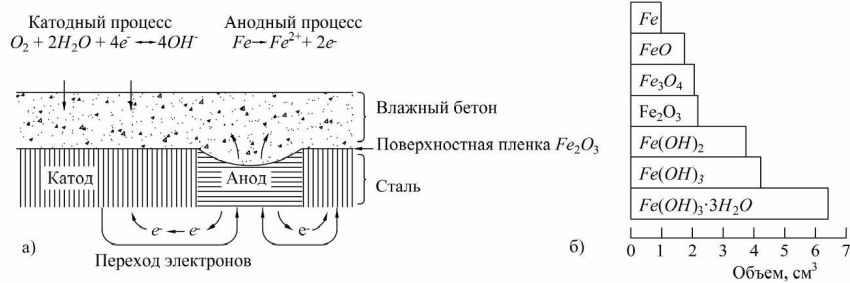


Рис. 2. Схема коррозии железобетона в морских водах (Mehta P.К., 2003) [8]: а – анодные и катодные процессы, протекающие при коррозии стальной арматуры в бетоне; б – объемное расширение в результате окисления стальной арматуры

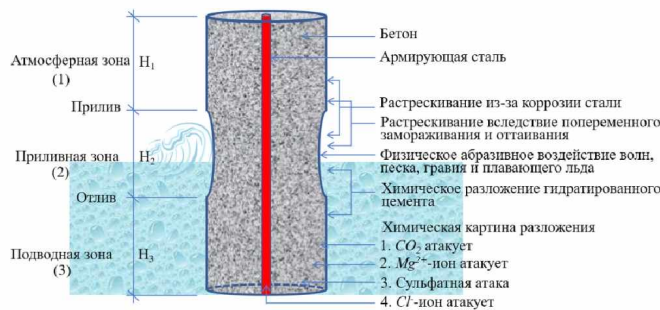


Рис. 3. Основные причины разрушения железобетонных конструкций в морской среде (Mehta P.К., 2003) [8]

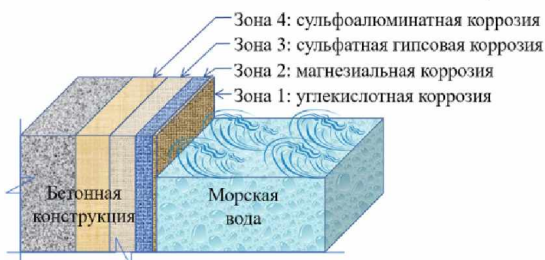


Рис. 4. Разрушение бетонных слоев в морских средах (Фам Хью Хань, Ле Чунг Тхань, 2012) [6]

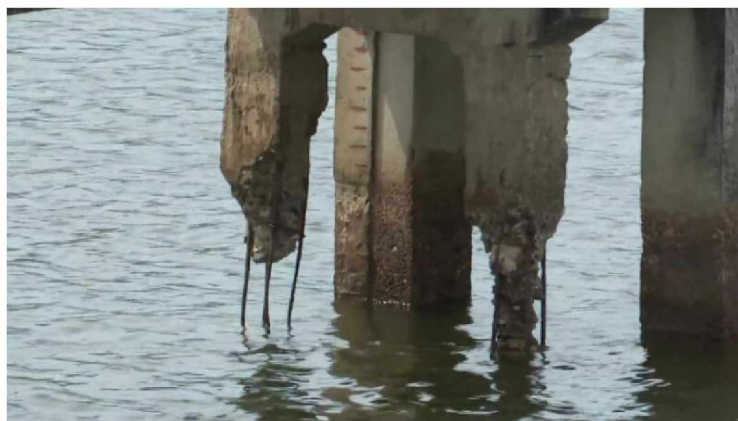


Рис. 5. Железобетонные конструкции подвергаются коррозии под воздействием приливов и отливов (Нго Суан Хунг, 2022) [18]

Для морских бетонных конструкций, в числе на участках, подверженных активному воздействию ударных волн во время приливов, явление коррозии бетона вследствие диффузии гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующегося в процессе гидратации цемента, является существенным и требует тщательных и подробных исследований [9, 10]. Влияние морской среды на долговечность бетонных и железобетонных конструкций показано на рисунке 5.

В исследовании, проведенном Хуашаня Янга [11], было подтверждено, что диффузия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в образцы бетона во влажной среде увеличивает пористость структуры, вызывая ухудшение прочности бетона, и способствует более быстрому развитию солянокислой коррозии. Результаты исследования показывают, что для частичной замены цемента могут быть использованы минеральные добавки, способные повысить структурную плотность и снизить скорость диффузии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетоне.

На основании исследований [12, 13, 14] посредством решения неопределенной задачи диффузии авторами сделана попытка охарактеризовать процесс диффузии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетоне коэффициентом массопроводности k . Следовательно, зная коэффициент k , можно оценить уровень коррозии бетонных конструкций в разные моменты времени, что является важным параметром в задаче проектирования и прогнозирования ресурса морских сооружений.

Таким образом, цель данного исследования

– анализ влияния водной среды на коэффициент массопроводности гидроксидов кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетонах морских гидротехнических сооружений. Используя российские, вьетнамские и зарубежные нормативные документы относительно коррозии бетона и железобетона в гидравлических средах, в том числе при диффузии гидроксида кальция, образующегося в ходе цементации, была поставлена задача разработать испытательную модель с образцами бетона по ГОСТ 27677-88 для воды и водных растворов хлорида натрия (5%).

В своих исследованиях профессор В.М. Москвин показал [15], что простейшей формой развития коррозии бетона является выщелачивание. В этом случае агрессивный компонент не проникает глубоко в материал железобетонной конструкции. Скорость коррозионного процесса определяется диффузией гидроксида кальция из пор внутренних слоев структуры к внешней поверхности границы раздела фаз «твердая-жидкая фаза» с последующим массопереносом с поверхности в жидкую массу. Этот процесс массообмена схематически показан на рисунке 5.

При испытаниях использовались образцы бетона на заполнителе В150 в естественно влажном состоянии размерами 50x50x50 мм согласно требованиям ГОСТ 12730.1-2020 [16].

Содержание гидроксида кальция определяли методом термогравиметрического анализа в центральной части кубических образцов через

каждые 0,025 м толщины с 14-дневным интервалом в течение 70 суток испытаний. Указанный раствор содержал хлориды кальция, магния и калия, а также сульфат натрия с общей концентрацией ионов кальция, равной 0,7 кг/м³, ионов хлора 18,2 кг/м³, ионов натрия 11,3 кг/м³, ионов калия 0,4 кг/м³, ионов магния 1,4 кг/м³ и сульфат-анионов 2,7 кг/м³.

В этом случае рассмотрим распределение концентрации Ca(OH)₂ компонента, передаваемого по координатам, в виде выражения параболической функции следующим образом [17]:

где $a_{t_i}, b_{t_i}, c_{t_i}$ – коэффициенты уравнения параболы в момент времени.

Соответственно, уравнение $C(x, t_i)$ рассчитывается как функция в зависимости от распределения концентрации гидроксида кальция по толщине бетонной конструкции и показано на рисунке 8.

Для упрощения процесса поиска решения примем некоторые допущения, которые принципиально не изменят физическую природу результата. Для модельной задачи можно предположить постоянное значение коэффициента массопроводности Ca(OH)₂ k . В этом случае задачу о переносе массы гидроксида кальция из бетонной конструкции в воду можно сформулировать с помощью дифференциального уравнения непостоянной массопроводности в теле бетонной и железобетонной конструкции:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}; \tau > 0; 0 \leq x \leq \delta$$

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C_0$$

где C_0 – начальная концентрация гидроксида кальция в бетоне в пересчете на оксид кальция, кг СаО/кг бетона.

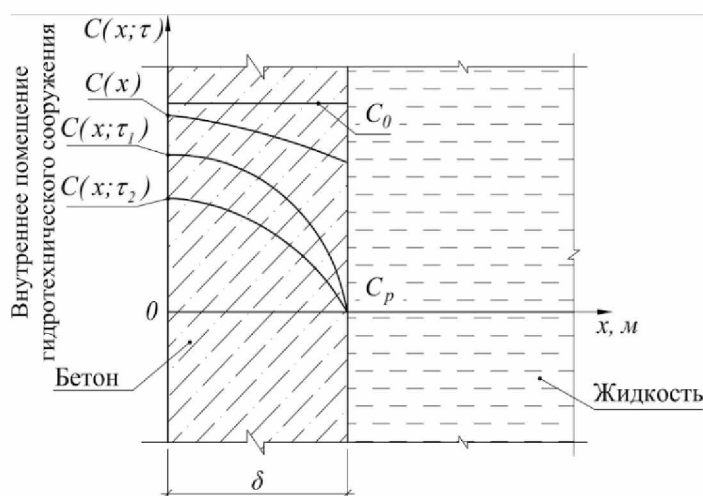


Рис. 6 . Схема процесса массопереноса Ca(OH)₂ (Нго Суан Хунг, 2022) [18]

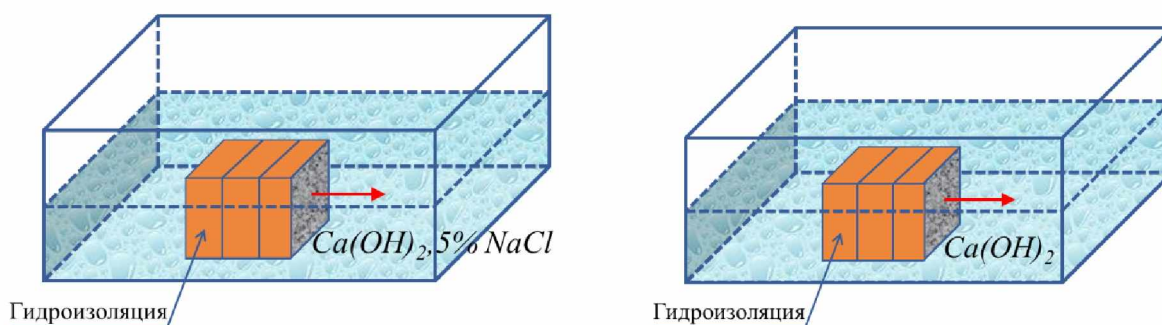


Рис. 7. Экспериментальная схема определения коэффициента диффузии гидроксида кальция по толщине бетонных конструкций в различных водных средах: а) в водной среде (Состав №1); б) в водной среде с 5% NaCl (Состав №2)

Процесс проведения испытаний выполняется в несколько этапов на последовательности рисунков ниже.

С помощью термогравиметрического анализа были построены графики изменения концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине бетонных образцов, находящихся в различных водных средах, представленные на рисунке 10.

После определения градиента концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на границе раздела фаз путем анализа кривой его концентрации по толщине образца бетона были рассчитаны значения коэффициента массопроводности k гидроксида кальция (табл. 1).

Изменения коэффициента массопроводности гидроксида кальция во времени приведены на рисунке 11.

На основании данных таблицы 1 и анализа графиков на рисунке 11 можно заключить следующее:

- коэффициент массопроводности гидроксида кальция у бетона состава №1 примерно в 2,7 раза больше, чем у контрольного бетона состава №2. Это показывает, что растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в водной среде достаточно велика (около 1,18 г/л в пересчете на массу CaO при 200°C), а наличие в водной среде ионов SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ , Na^+ способствует растворению $\text{Ca}(\text{OH})_2$;

- наиболее активный рост коэффициента массопроводности $\text{Ca}(\text{OH})_2$ наблюдается для компонента бетона №1 через 42 суток. Это подтверждает, что увеличение пористости бетона способствует активной диффузии $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

В результате анализа данных, полученных в рамках проведенных исследований, можно сделать следующие основные выводы:

1. При анализе процесса коррозии бетона и железобетона гидротехнических сооружений рассматривается градиент концентрации гидроксида кальция.

2. Состав рабочей среды бетона оказывает большое влияние на потерю массы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетоне. Учитывая изменение концентрации гидроксида кальция в бетоне с течением времени, важно грамотно оценить потерю массы бетона морских гидротехнических сооружений.

3. Показано, что образцы бетона, работающие в растворе, по составу, аналогичному составу морской воды, имеют более высокую степень диффузии, что приводит к потере прочности бетона.

Таким образом, поиск новых методов исследования по предотвращению коррозии стальной арматуры в железобетонных конструкциях является важным вопросом для экономической и оборонной безопасности

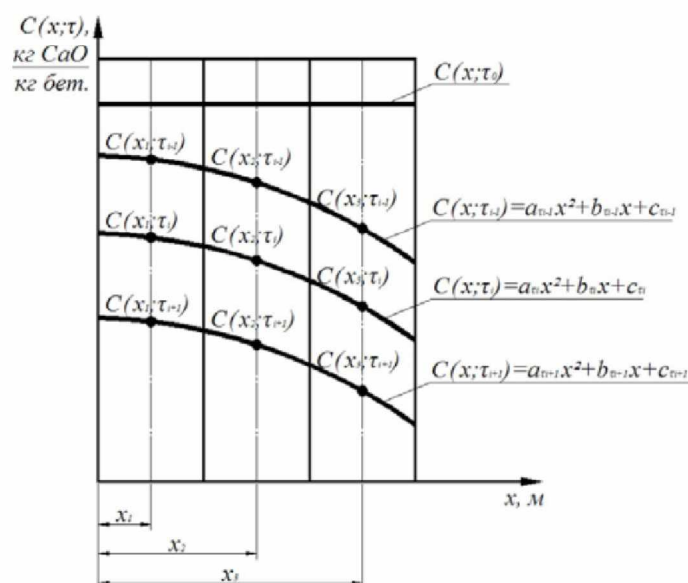


Рис. 8. Иллюстрация уравнения концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетоне [17]

каждой страны, в том числе стран с большой береговой линией, и требует дальнейших исследований.

Благодарности. Особую благодарность авторы выражают строительной лаборатории кафедры подземного и горного строительства

факультета гражданского строительства Ханойского горно-геологического университета, г. Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам. Это исследование финансируется Ханойским горно-геологическим университетом в рамках гранта T23-43.



а)



б)



в)



д)

Рис. 9. Процесс проведения испытаний:

а) навеска бетонной смеси для испытаний; б) изготовление образцов (смешивание, формование, отверждение); в) нумерация образцов перед замачиванием; г) замачивание бетонных образцов; д) высушивание бетонных образцов

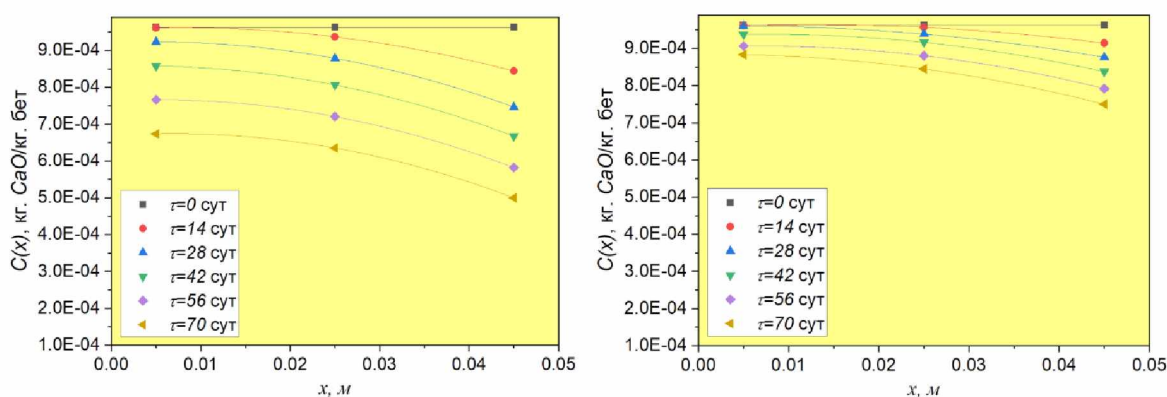


Рис. 10. Концентрационные профили $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по объему бетонных образцов В15 в водной среде (слева) и в 5% растворе хлорида натрия

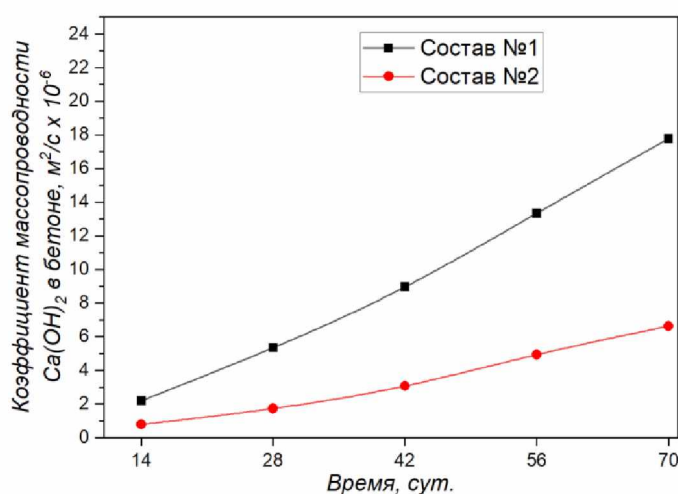


Рис. 11. Зависимость коэффициента массопроводности $\text{Ca}(\text{OH})_2$ от времени проведения испытаний

Таблица 1

Коэффициенты массопереноса гидроксида кальция в бетонных образцах

№ п/п	Бетоны	Коэффициент массопроводности в бетоне, $\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^{-6}$				
		τ , сут.				
		14	28	42	56	70
1	Состав №1	2.196	5.349	8.969	13.337	17.656
2	Состав №2	0.799	1.743	3.075	4.940	6.632

ЛИТЕРАТУРА

1. Долговечность железобетона в агрессивных средах: Совм. изд. СССР – ЧССР – ФРГ / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Числь. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
2. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Structure, Properties, and Materials. Prentice Hall, 1993. 548 р.
3. Васильев О.Ю. Технология приготовления высокопрочных бетонов с применением виброактивации // Технологии бетонов. 2010. №7-8. С. 64-68.
4. Баженов Ю.М. Бетонведение. М.: Издательство АСВ, 2015. 144 с.
5. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Издательство АСВ, 2011. 528 с.
6. Фам Хью Хань, Ле Чунг Тхань. Бетон для морских сооружений. Ханой: Изд. Строительство, 2012. 216 с.
7. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S. Physical and mathematical

- modelling of the mass transfer process in heterogeneous systems under corrosion destruction of reinforced concrete structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. C. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012039
8. *Mehta P.K.* Concrete in the Marine Environment // Taylor & Francis. London, 2003. 224 p.
 9. *Nguyễn Thanh Bằng* (2006). Nâng cao khả năng chống thấm cho đập bê tông trong điều kiện nóng ẩm Việt Nam, luận văn tiến sỹ kỹ thuật, Matxcova.
 10. *Nguyễn Thanh Bằng* (2012). Nguyên nhân gây xâm thực bê tông và bê tông cốt thép công trình thủy lợi - Giải pháp khắc phục phòng ngừa. Tạp chí KH&CN Thủy lợi, số 8.
 11. *Yang, H., Che, Y., Leng, F.* Calcium leaching behavior of cementitious materials in hydrochloric acid solution. *Sci Rep* 8, 8806 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27255-x>.
 12. *Fedosov S.V., Bulgakov B.I., Krasilnikov I.V., Ngo Xuan Hung, Tang Van Lam* (2022). Forecast of the Durability of Shore Structures Made of Reinforced Concrete // *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. ISSN: 1662-9779. Vol. 329, 2022. P. 25-31.
 13. *Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S.* (2018). Physical and mathematical modelling of the mass transfer process in heterogeneous systems under corrosion destruction of reinforced concrete structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Novosibirsk. 2018. C. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012039.
 14. *Trương Hoài Chinh, Trần Văn Quang* (2008), “Nghiên cứu khảo sát hiện trạng ăn mòn phá hủy của các công trình bê tông cốt thép và khả năng xâm thực của môi trường ven biển thành phố Đà Nẵng”, Tạp chí khoa học và công nghệ Đại học Đà Nẵng, 6(29).
 15. *Москвин В.М.* Коррозия бетона. М.: Госстройиздат, 1952. 342 с.
 16. ГОСТ 12730.1-2020. Бетоны. Методы определения плотности. М.: Стандартинформ, 2021. 12 с.
 17. Теоретические и экспериментальные исследования процессов коррозии первого вида цементных бетонов при наличии внутреннего источника массы / *С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, И.В. Красильников* // *Строительные материалы*. 2013. №6. С. 44-47.
 18. *Нго Суан Хунг* Коррозионностойкий бетон с модифицированной структурой для морских сооружений: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.5. М., 2022. 146 с.

DETERMINATION OF THE MASS CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF CALCIUM HYDROXIDES IN CONCRETE FOR MARINE STRUCTURES

© Ngo Xuan Hung¹, B.I. Bulgakov², LE Chung Hieu³

¹ Hanoi Mining and Geological University, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam

² NRU MSUCE, Moscow, Russia

³ Russian University of Transport (RUT), Moscow, Russia

For many years, the problem of low durability of reinforced concrete structures in hydraulic environments has been a concern, especially for marine concrete structures, including in areas exposed to waves and tides. It is especially important to study the phenomenon of concrete corrosion due to the diffusion of calcium hydroxide formed during the hydration of cement. Therefore, the purpose of this study is to analyze the influence of the aquatic environment on the mass conductivity coefficient of calcium hydroxides in concrete of marine hydraulic structures. The thermogravimetric analysis method used in research based on the current Russian and Vietnamese standards was used to evaluate the properties of raw materials, concrete mixtures and concrete obtained during solidification. The content of calcium hydroxide was determined by thermogravimetric analysis of the central part of a cubic sample at intervals of 14 days during a 70-day test. The studies were carried out both in ordinary water and in a 5% solution of table salt. Auxiliary computer software (Origin 2018 and Matlab) was used to evaluate and present the results of the experiment. Based on the results of calculations, graphs of the dependence of the concentration of Ca(OH)₂ on the thickness of concrete samples in various aqueous media are constructed. The change in the mass conductivity coefficient of calcium hydroxide over time is given.

Keywords: mass conductivity coefficient, calcium hydroxide, marine structures, corrosion destruction of reinforced concrete structures.

REFERENCES

1. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry, S., Chissl, P. and others (1990). *Durability of reinforced concrete in aggressive environments*. Stroyizdat, P. Chissl, 320 p.
2. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (1993). *Concrete: Structure, Properties, and Materials*. Prentice Hall, 548 p.
3. Vasiliev, O.Yu. (2010). 'Technology for preparing high-strength concrete using vibration activation'. *Concrete Technologies*. №7-8, pp. 64-68.
4. Bazhenov, Yu.M. (2015). *Concrete science*. ASV Publishing House. Moscow, 144 p.
5. Bazhenov, Yu.M. (2011). *Concrete technology*. ASV Publishing House. Moscow, 528 p.
6. Pham, Huu Hanh and Le Trung, Thanh (2012). *Concrete for offshore structures*. Ed. Construction. Hanoi, 216 p.
7. Fedosov S.V., Roumyantseva, V.E., Krasilnikov, I.V. and Konovalova, V.S. (2018). 'Physical and mathematical modeling of the mass transfer process in heterogeneous systems under corrosion destruction of reinforced concrete structures' *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. P. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012039
8. Mehta, P.K. (2003). *Concrete in the Marine Environment*. Taylor & Francis. London. 224 p.
9. Nguyễn, Thanh Bằng (2006). *Nâng cao khả năng chống thấm cho đập bê tông trong điều kiện nóng ẩm Việt Nam*, luận văn tiến sĩ kỹ thuật, Matxcova.
10. Nguyễn Thanh Bằng (2012). *Nguyên nhân gây xâm thực bê tông và bê tông cốt thép công trình thủy lợi - Giải pháp khắc phục phòng ngừa*. Tạp chí KH&CN Thủy lợi, số 8.
11. Yang, H., Che, Y. & Leng, F. (2018). *Calcium leaching behavior of cementitious materials in hydrochloric acid solution*. *Sci Rep* 8, 8806. DOI: 10.1038/s41598-018-27255-x.
12. Fedosov, S.V., Bulgakov, B.I., Krasilnikov, I.V., Ngo, Xuan Hung and Tang, Van Lam. (2022). *Forecast of the Durability of Shore Structures Made of Reinforced Concrete*. *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. ISSN: 1662-9779. Vol. 329, P. 25-31.
13. Fedosov, S.V., Roumyantseva, V.E., Krasilnikov, I.V. and Konovalova, V.S. (2018). 'Physical and mathematical modeling of the mass transfer process in heterogeneous systems under corrosion destruction of reinforced concrete structures'. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Novosibirsk, p. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012039.
14. Trương, Hoài Chính and Trần, Văn Quang (2008), "Nghiên cứu khảo sát hiện trạng ăn mòn phá hủy của các công trình bê tông cốt thép và khả năng xâm thực của môi trường ven biển thành phố Đà Nẵng", Tạp chí khoa học và công nghệ Đại học Đà Nẵng, 6(29).
15. Moskvina, V.M. (1952). *Concrete corrosion*. Gosstroyizdat, Moscow, 342 p.
16. (2021). GOST 12730.1-2020. Concrete. Methods for determining density, Standartinform, Moscow. 12 p.
17. Fedosov, S.V., Rumyantseva, V.E., Kasyanenko, N.S. and Krasilnikov, I.V. (2013). 'Theoretical and experimental studies of corrosion processes of the first type of cement concrete in the presence of an internal source of mass'. *Construction materials*. №6, p. 44-47.
18. Ngo, Xuan Hung (2022). *Corrosion-resistant concrete with a modified structure for offshore structures: Ph.D. Thesis (2.1.5.)*, Moscow, 146 p.

ГИДРОТУРБИНА – ИСТОЧНИК ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГОЕМКИХ СТРОЙМАТЕРИАЛОВ

© В.Т. Федоров¹, М.Н. Кокоев², А.В. Илюхин³

¹Концерн «Наноиндустрия», Москва, Россия

²КБГУ им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

³МАДИ, Москва, Россия

Почти 9 миллиардов тонн угля, десятки миллиардов тонн нефти и газа, сжигаемых ежегодно, не улучшают атмосферу и климат на Земле. В статье предложена концепция, как уменьшить выбросы диоксидов углерода и сернистых газов при производстве некоторых энергоемких строительных материалов. Предложено решение – механическую энергию гидротурбины мощностью порядка 50 МВт превратить напрямую в высокотемпературное тепло с рабочей температурой 1200-1300°C без электрического цикла преобразования энергии. В преобразователе применить несколько валов с лопатками на основе оксида алюминия и другой огнеупорной керамики. Для этого существует преобразователь механической энергии в тепло – установка аэродинамического нагрева для инструментальных цехов, созданная в России в 1960-х. Концепция, в случае её реализации, позволяет уберечь атмосферу от миллионов тонн диоксидов углерода и оксидов серы, значительного снижения капитальных затрат на переоборудование части гидротурбин под производство энергоемких строительных материалов за счет исключения установки электрогенераторов, каждый из которых стоит сотни миллионов рублей.

Ключевые слова: энергоемкие стройматериалы, тепличные газы, гидротурбина, преобразование энергии без электрогенератора, высокотемпературное тепло.

Формат цитирования: Федоров В.Т., Кокоев М.Н., Илюхин А.В. Гидротурбина – источник тепловой энергии для производства энергоемких стройматериалов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX, №4 (34). С.85-95. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.83.55.003

Введение

С конца 20 века климат ускоренно теплеет, что очевидно для многих климатологов. Это видно по тому, как усилилось таяние многовековых ледников в горах и в приполярных областях, по сильным ураганам и смерчам, по участвовавшим наводнениям и небывалой жаре в странах Европы и в некоторых районах России. Точно не известно, какая причина таких изменений в климате. Но известно, что почти 9 миллиардов тонн угля [1], десятки миллиардов тонн других углеводородов, сжигаемых ежегодно, не улучшают атмосферу и климат на Земле.

Поэтому технологически развитый мир взял курс на развитие альтернативных источников энергии (ВИЭ), который уже обеспечивает от 15 до 30% потребности многих стран за счет «чистой» энергии [2, 3]. Возобновляемые источники энергии могут обеспечить незави-

симый от колебаний мировых цен на углеводороды рост экономики. Рынок нефти и газа всегда сильно реагирует на ухудшение политической обстановки в мире.

Почти во всех странах есть отрасли промышленности, выбрасывающие в атмосферу большое количество тепличных газов, которые, по мнению многих климатологов, приводят к потеплению на Земле. Это производство строительных материалов – цемента, арматурной стали и металлочерепицы, строительной керамики, стекла, теплоизоляционных материалов. Выбросы диоксида углерода при производстве энергоемких строительных материалов можно разделить на две части: одна часть образуется при сжигании органического топлива, другая часть происходит при сильном нагреве сырья, содержащего карбонатные минералы (известняки, известь, кальцит, доломит, мергель и др.).

О каких тепличных газах идет речь? В пер-

вую очередь, это диоксид углерода. Во-вторых, это метан (CH_4), который «утепляет» земную атмосферу на два порядка больше, чем CO_2 при равных количествах по массе выбросов в атмосферу. К счастью, пока поступление метана в воздушный океан не столь большое, как диоксида углерода. Но за северным полярным кругом постепенно оттаивает вечная мерзлота, и миллионы кубометров метана из газогидратных соединений диффундируют через оттаявший грунт и попадают в атмосферу. Мировая добыча природного газа, состоящего на 95-98% из метана, его транспортировка и хранение неизбежно приводят к утечке метана в атмосферу, которая в среднем достигает 3,5% [4].

Но можно ли тепловую энергию в больших количествах получать для производства строительных материалов, не сжигая углеводороды и не прибегая к использованию солнечных и ветроэлектрических станций, поскольку у них непостоянная мощность? Нужно подчеркнуть, что постоянство мощности геотермальных станций, независимо от времени суток и погоды [5], не делает возможным их работу на обеспечение высокотемпературным теплом крупного производства стройматериалов [6, 7], поскольку тепловые мощности обычных геотермальных станций невелики (в пределах 5-10 МВт).

Применения ядерной энергии без электрогенераторов для получения теплоносителя с высокой температурой для производства стройматериалов не следует ожидать ввиду чрезвычайной технологической сложности, дороговизны и строгих требований безопасности на ядерных объектах. В начале 21 века в попытке уменьшить выбросы CO_2 , чтобы предотвратить дальнейшее потепление климата, предлагалось значительно увеличить производство и потребление водорода. В работе [8] разбирается, почему идея применить ядерный реактор для получения водорода плоха технически и экономически. Водород, полученный разложением воды при температуре 800°C в реакторе специальной конструкции, оказывается очень дорогим.

Гидроэлектростанции, прообразом которых на протяжении веков были водяные мель-

ницы, тоже считаются чистыми источниками энергии. ГЭС не выбрасывают диоксид углерода, но на строительство плотин, особенно на равнинных реках, экологи смотрят резко отрицательно. В 20-м веке немало было построено плотин без учета долговременных отрицательных последствий для рек и природы. После строительства каскада плотин многие реки стали медленно погибать. Возьмем только одну проблему – плотины мешают нересту рыбы. Например, на плотине Волжской ГЭС построены рыбопропускные сооружения со шлюзами, но не работают десятки лет. Это непреодолимое препятствие на входе рыбы на нерест в Волгу из Каспия. В Норвегии, в которой очень развита гидроэнергетика, рядом с плотинами ГЭС делается искусственное русло, где вода течёт по небольшому уклону, и рыба идет вверх на нерест. Кстати, 99% электроэнергии в Норвегии производится на ГЭС [9], работающих в автоматическом режиме.

Самая крупная в России Саяно-Шушенская ГЭС мощностью 6400 МВт. Окончательно проект станции был утвержден в 1971 г., то есть более полувека назад. На ГЭС установлены 10 турбогенераторов по 640 МВт каждый. Экономическое значение Саяно-Шушенской ГЭС – она стала надежным источником электроснабжения для крупнейших предприятий Сибири: Саянского и Хакасского алюминиевых заводов, угольных разрезов, железных рудников, ПАО «Абаканвагонмаш», предприятий легкой и пищевой промышленности Красноярского края.

Ущерб для природы от строительства ГЭС – в зоне затопления водохранилища осталось более 3 млн. кубометров древесины; изменился микроклимат на прилегающих территориях, повысилась влажность воздуха, в зимний период усилилось образование туманов. Большой участок водохранилища в Туве в результате колебаний уровня воды при сезонном регулировании стока периодически заполняется водами Енисея, а потом обсыхает, образуя в остальное время года заболоченную и непригодную для хозяйственной деятельности низменность.

Самая крупная в мире ГЭС «Три ущелья» была построена в Китае мощностью 22500

МВт в 2012 году. На ГЭС установлено 32 (!) гидротурбины мощностью 700 МВт каждая и две турбины по 50 МВт для собственных нужд станции [11]. Обычно срок окупаемости ГЭС 10-15 лет. «Три ущелья» полностью себя окупала в 2013 году – через 4 года после пуска первых турбин и через один год после окончания строительства. ГЭС производит «чистую» электроэнергию в огромных количествах без выброса диоксида углерода и сернистых газов. Кроме того, плотина на реке Янцзы защищает нижележащие по течению города от губительных паводков. В 20 веке катастрофические разливы реки Янцзы стали причиной гибели около полумиллиона человек.

Экологические последствия строительства ГЭС «Три ущелья» – затопление плодородных пахотных и пастбищных земель, изменение температурного и водного режима вследствие возведения плотины неотвратимо влияет на ряд видов рыб, обитающих в реке, в частности семейства осетровых. При прорыве плотины в зоне затопления окажутся 360 млн. человек (по численности это 2,5 России). Поэтому сам объект и окрестные воды патрулируются китайской армией с использованием бронемашин и воздушных дронов с всепогодными телекамерами с целью предупреждения несанкционированных действий против плотины и самой ГЭС.

При всех плюсах и минусах гидроэнергетики, показанных выше, ГЭС еще долго будут выполнять важную функцию в снабжении экономики электроэнергией. В данной статье предложена концепция, каким образом уменьшить выбросы диоксидов углерода и сернистых газов при производстве некоторых энергоемких строительных материалов. Предложено решение – механическую энергию гидротурбины мощностью, например, 50 МВт и выше превратить напрямую в высокотемпературное тепло без электрического цикла преобразования энергии.

Прямое преобразование механической энергии гидротурбины в высокотемпературное тепло

В работе [8] рассматривается экономика известной тайваньской компании TSMC (Taiwan

Semiconductor Manufacturing Company) – крупнейшего производителя в мире полупроводниковых сложнейших микросхем. В технологическом отношении Тайвань в 1980-х был на уровне нашей страны. В те времена у нас пытались повторить достижения американской микроэлектроники и европейских стран, но с опозданием на 10-15 лет. В 1990-х произошел окончательный крах отечественных микроэлектронных предприятий. В 2020 году прибыль TSMC – 18,5 миллиарда долларов в год. Для сравнения, «Газпром» в том же году получил прибыль в 9 раз меньше. Несмотря на то, что в TSMC работало всего 50 тысяч человек, а в «Газпроме» в 9 раз больше. Этого примера достаточно, чтобы показать, что технологически очень сложная продукция дает норму прибыли в десятки раз больше, чем продажа энергетического сырья, и что успехи в науке, технологии и экологии определяют действительное место страны в мировой иерархии.

Вопреки прогнозам нефть и газ не закончатся еще десятки лет, но добывать их становится всё труднее и технологически намного сложнее [12]. От этого они становятся дороже. Поэтому углеводородным энергоносителям всё труднее конкурировать с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Самые мощные агрегаты среди ВИЭ – это гидротурбины (рис. 1). Обычно мощности гидротурбин от 0,5 до 700 МВт. На ГЭС установлены от нескольких до 30 гидротурбин. Новая концепция предполагает на основе механической энергии одной-двух гидротурбин сделать прямое преобразование в высокотемпературный поток теплоносителя для производства некоторых энергоемких строительных материалов.

Способ аэродинамического нагрева и первые конструкции аэродинамической печи разработаны в России в 1960-х гг. инженерами В.Н. Косточкиным, П.И. Тевис и др. [13, 14]. Такие печи создавали для термической обработки стальных деталей технологической оснастки, деталей из алюминиевых сплавов. В такой печи воздух, приводимый в движение центробежным вентилятором, с высокой скоростью циркулирует по замкнутой траектории, преодолевая аэродинамическое сопротивление

ние. При этом механическая энергия движущегося воздуха переходит в теплоту, что обеспечивает повышение его температуры и всего того, что находится в камере. Нагрев изделий происходит в результате обдува воздухом, имеющим высокую температуру. Процесс конвективного теплообмена в аэродинамическом нагревателе происходит с высокой быстротой вследствие большой скорости и турбулентности воздушных потоков [15].

Достоинствами аэродинамической печи являются высокая скорость и равномерность нагрева сырья или изделий, высокий КПД до 95-98%. Для достижения такого КПД надо только обеспечить хорошую теплоизоляцию. Кроме того, печи аэродинамического нагрева не имеют вредных выбросов и осуществляют нагрев без электрических нагревательных элементов. Поскольку для получения тепла не требуется сжигать топливо и не нужно электричество, а нужна механическая энергия гидротурбины достаточной мощности, рассмотрим гидротурбины для ГЭС.

Сейчас применяют на ГЭС три типа турбин: а) активные ковшовые, б) реактивные радиально-осевые, в) поворотные лопастные низконапорные (пропеллерные – турбины Каплана). Быстроходность ковшовых турбин достигает в пределах 3000 об/мин. Ковшовые турбины для своей работы требуют высокого напора от 200 до 600 м и выше. Такой напор обеспечивают деривационные ГЭС, которые

чаще строят в горной местности. Но для прямого преобразования в тепло ковшовые гидротурбины не подходят – у них слишком высокая частота вращения. Между гидротурбиной и преобразователем требуется понижающий редуктор – обычные керамические лопатки центробежные нагрузки не выдержат.

Тихоходные турбины – радиально-осевые, их КПД равен 93-94%. Рекордсменом среди гидротурбин считают агрегат мощностью 1000 МВт (КНР). Радиально-осевые турбины самые распространенные в гидроэнергетике. Они имеют сравнительно малую частоту вращения – от 50 до 750 об/мин. Если быстроходность турбины окажется меньше, чем требуется для нормальной работы преобразователя, то нужно использовать мультипликатор (повышающий редуктор).

Чем больше мощность турбины, тем больше требуется по размерам преобразователь механической энергии в тепло (рис. 2). Надо создать соответствующее аэродинамическое сопротивление воздушному потоку, чтобы в преобразователе объемом несколько десятков кубометров получить, например, тепловыделение 50 МВт. Определим, каким крутящим моментом можно нагрузить валы преобразователя при частоте вращения $n = 750$ об/мин, чтобы полностью использовать гидротурбину мощностью $N = 50$ МВт:

$$M_{кр} = \frac{N \cdot \eta_1 \cdot 60}{2\pi \cdot n} \quad (1)$$

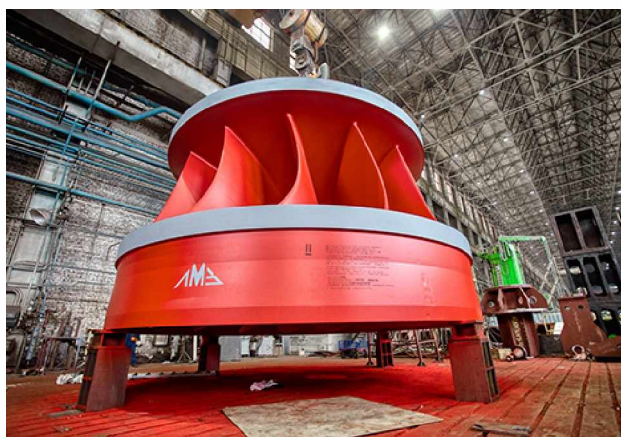


Рис. 1. Рабочее колесо турбины Фрэнсиса (радиально-осевая гидротурбина). Энергомашиностроительная компания «Силовые машины», Санкт-Петербург.

(Источник: <https://power-m.ru/img/uploads/ht.png>)

где $M_{кр}$ – крутящий момент на валу преобразователя, η_1 – КПД мультипликатора = 0,95. Расчет по (1) дает крутящий момент $M_{кр} = 504250$ Нм.

В преобразователе механическая энергия турбины без электрогенератора должна превратиться в тепло. Для этого валы преобразователя снабжены множеством керамических лопаток. Причем часть лопаток развернута под некоторым углом к продольной оси вала, создавая направленное движение воздуха с известным напором, чтобы обеспечить циркуляцию теплоносителя через преобразователь и вращающуюся печь с сырьем строительного материала (известняком и др.). Валы вращаются встречно, чтобы скорости воздушных потоков частично удваивались. Определим, с какой силой сопротивляется воздушному потоку одна лопатка, то есть найдем ее лобовое сопротивление P_v :

$$P_v = C_x \cdot S \cdot V^2 \cdot \left(\frac{\rho}{2}\right), \quad (2)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления лопатки ($C_x = 2,3$). Здесь коэффициент взят максимальный потому, что поверхность керамической лопатки имеет полусферические или полуцилиндрические углубления, обращенные навстречу воздушному потоку [16]. Кроме того, поверхность лопатки имеет максимальную шероховатость. Конечно, шлифовка и полировка изделий увеличивают прочность изделия вследствие уменьшения поверхностных дефектов. Но здесь важна грубая шероховатость поверхности из-за желания увеличить сопротивление лопатки обтеканию; S – площадь фронтальной проекции лопатки ($0,2$ м²); $V = 100$ м/с – средняя скорость движения воздушных потоков при встречном направлении вращения двух параллельных валов с лопатками; ρ – плотность воздуха при высокой температуре входящего потока ($0,746$ кг/м³). Расчет по (2) дает силу $P_v = 1720$ Н.

Расчет быстроходности валов с лопатками преобразователя выполняют исходя из того, что центробежные нагрузки растут пропорци-

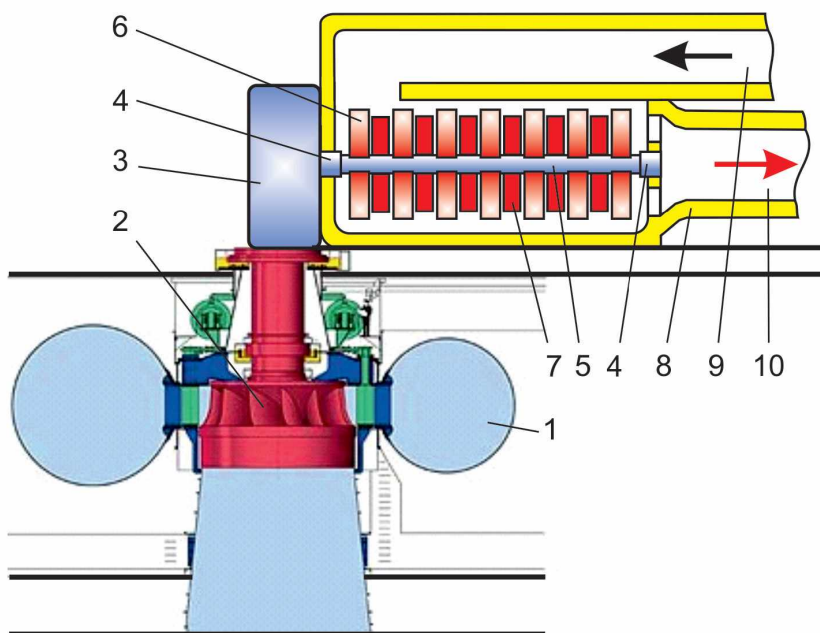


Рис. 2. Схема прямого преобразования механической энергии гидротурбины в высокотемпературный тепловой поток

1 – спиральная камера, подводящая воду к турбине; 2 – радиально-осевая гидротурбина, 3 – мультипликатор, 4 – водоохлаждаемые подшипники, 5 – водоохлаждаемые валы преобразователя, 6 – жаропрочные лопатки, часть лопаток развернута по отношению к валам; 7 – некоторые валы вращаются встречно (условно все валы не показаны), 8 – огнеупорная многослойная теплоизоляция, 9 – входящий поток теплоносителя, 10 – выходящий поток теплоносителя

онально квадрату угловой скорости вращения и длине лопаток. В расчете надо учитывать и другие параметры элементов конструкции преобразователя: размеры, массу и прочность лопаток при высокой температуре, длину и жесткость валов преобразователя и др. Кроме расчетов, надо проводить натурные испытания лопаток и валов при высокой температуре.

Примем, что шесть лопаток расположены в одной плоскости. Плоскость расположена перпендикулярно продольной оси вала. Для упрощения расчета предположим, что центр давления силы P_v приложен от оси вала на расстоянии $L = 0,7$ м. Тогда определим, какое количество лопаток $n_{\text{лоп}}$ своим аэродинамическим сопротивлением может уравновесить крутящий момент $M_{\text{кр}}$ гидротурбины:

$$n_{\text{лоп}} = \frac{M_{\text{кр}}}{(6P_v \cdot L)} \quad (3)$$

Расчет по (3) дает в преобразователе 420 керамических лопаток. Их можно разместить на 7 валах, в 10 рядов, по 6 штук в плоскости (рис. 3).

Вращающиеся детали преобразователя сделаны из огнеупорной керамики. Прочность

на растяжение керамики важна, так как от этого зависит рабочая частота вращения вала с керамическими лопатками и геометрический объем аэродинамического преобразователя. Частота вращения валов преобразователя в диапазоне 750-900 об/мин. Конечно, можно было поставить металлические турбинные лопатки из жаропрочных сплавов. Лопатки, которые стоят на авиационных двигателях, работающие при температуре 1400°C и выше при оборотах турбины 30 тысяч об/мин. Во-первых, такие лопатки дороги – они содержат рений, рутений, иттрий и др. редкие металлы. Например, монокристаллические лопатки из никелевых ренийсодержащих сплавов, обладающие высокой жаропрочностью, используются для изготовления современных газотурбинных двигателей и сопел для управления вектором тяги в истребителях. Рений, которого в сплавах до 6%, на мировых рынках стоит 3000 дол./кг и выше [17].

Во-вторых, нет надобности в использовании очень дорогих металлических жаропрочных лопаток. Ведь задача керамических лопаток в преобразователе превратить энергию гидротурбины в тепло. А для этого нужно вызвать большое аэродинамическое сопротив-

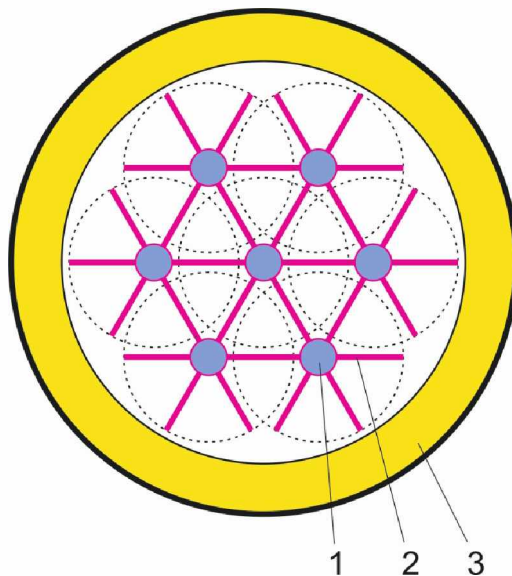


Рис. 3. Схема одного из вариантов расположения валов с лопатками преобразователя механической энергии гидротурбины в высокотемпературный поток теплоносителя.

- 1 – один из валов преобразователя, 2 – керамическая лопатка,
- 3 – многослойная огнеупорная теплоизоляция преобразователя

ление и тем способствовать превращению трения воздуха в тепло. Оценку прочности керамических лопаток плотностью $\rho_{\text{лоп}} = 2500 \text{ кг/м}^3$ в поле центробежных сил для максимальных окружных напряжений сделаем по приближенной формуле, заменив лопатки диском постоянной толщины с центральным отверстием [18]. Максимальные напряжения σ_{max} достигают наибольшие значения у центрального отверстия:

$$\sigma_{\text{max}} = \rho_{\text{лоп}} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \cdot r^2, \quad (4)$$

где r – длина лопатки, считая от центра вала ($r = 0,85 \text{ м}$), $n = 750 \text{ об/мин}$. По формуле (4) получается $\sigma_{\text{max}} = 11,1 \text{ МПа}$. Как правило, прочной керамике свойственны низкая пористость, отсутствие включений и низкопрочных фаз, мелкозернистость [19]. Керамика, испытанная в [20], с зёрнами 2-3 мкм имеет среднее значение предела прочности при растяжении 360 МПа, а керамика с зёрном больше 10 мкм и с порами размером 4-5 мкм 220 МПа. Керамика из каолина, оксида алюминия и некоторых добавок работает до 1750°C. Для известняка, например, нормальная температура обжига 1000-1100°C. Для изготовления керамзита нужна температура обжига 1100-1200°C, что меньше на 650-550°C допустимой температуры для керамики на основе оксида алюминия.

На выходе из преобразователя температура воздуха или другого газа должна быть 900-1300°C, что зависит от вида производимого строительного материала. Например, производство строительной извести. Основным процессом при производстве извести является обжиг. Известняк превращается в известь (CaO). Кроме угля, который при сгорании и нагреве известняка выделяет диоксид углерода, сам известняк при обжиге тоже выделяет большое количество CO_2 .

Поэтому производство извести занимает едва ли первое место по выбросам в атмосферу CO_2 на тонну готового продукта. Во всем мире в 2022 году произведено извести более 400 млн. т (источник: U.S. Geological Survey). Кроме строительства, известь использует черная металлургия, химическая промышленность,

известь вносят в кислые почвы и др. Это значит, при получении извести выбрасывается в атмосферу Земли много миллионов тонн диоксида углерода и сернистых газов при сжигании угля, газа и топочного мазута.

Диссоциация углекислого кальция обратима и зависит от температуры и парциального давления CO_2 . Разложение CaCO_3 начинается, когда известняк нагревается выше 600°C. Когда температура известняка достигает 900°C, то процесс удаления диоксида углерода идет с нормальной скоростью. В производственных условиях обжиг известняка зависит от наличия примесей, типа печи и температура обжига лежит в интервале 1000-1200°C [22, 24]. При обжиге из известняка удаляется углекислый газ, составляющий до 44% его массы, выгорают органические примеси – объем продукта уменьшается. Поэтому куски извести имеют пористую структуру. Удаления диоксида углерода из известняка сопровождается поглощением тепловой энергии:



Применяя рекуперативный теплообменник, можно вернуть 25-30% тепла, теряемого с уходящим горячим диоксидом углерода, в технологический процесс. Определим, сколько можно декарбонизировать известняка (M_{CaCO_3}), используя гидротурбину на 50 МВт с прямым преобразованием механической энергии турбины. Пока не учитываем количество тепла, теряемое с уходящим горячим воздухом в смеси с CO_2 :

$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{N \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{T(T_2 - T_1)C + (H \cdot \left(\frac{1}{\text{mol}}\right))}, \quad (6)$$

где N – мощность гидротурбины, η_1 – КПД мультипликатора (повышающего редуктора) = 0,95; η_2 – КПД преобразователя = 0,85; T_1 – температура входящего потока в преобразователь, T_2 – температура теплоносителя на выходе из преобразователя, C – теплоемкость известняка = 1,45 кДж/(кг·К); ΔH – мольная энтальпия диссоциации: $\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$,

равная 179 кДж/моль; 1/mol – сколько молей в 1 кг известняка без примесей.

Расчет по (6) дает массу известняка, который переработали за сутки = 1132 т/сутки.

В результате обжига известняка он теряет в массе 44%. Следовательно, не сжигая уголь, мазут и газ, можно произвести строительной извести за одни сутки:

$$m_{CaO} = m_{CaCO_3} - m_{0,44} \cdot m_{CaCO_3} = 634 \text{ т.} \quad (7)$$

Для сравнения, современная вращающаяся обжиговая печь, в которой сжигают топливо, имеет производительность 400-500 тонн извести в сутки. Чтобы получить равное количество тепла, сколько выработает гидротурбина на 50 МВт за сутки, нужно сжечь 440 т угля или более 160 тыс. тонн в год. Для подсчета предотвращенных выбросов в атмосферу диоксида углерода и сернистых газов при сгорании замещенного гидротурбиной угля, в зависимости от месторождения, есть литература [23, 24].

Таким образом, предложенная концепция, в случае её реализации, позволяет уберечь атмосферу от миллионов тонн диоксида углерода и выпадения кислотных дождей, значительно снижения капитальных затрат на переоборудование части гидротурбин ГЭС под производство энергоемких строительных материалов за счет исключения покупки электрогенераторов, каждый из которых стоит сотни миллионов рублей.

Выводы

1. Почти 9 миллиардов тонн угля, десятки миллиардов тонн нефти и газа, сжигаемых ежегодно, не улучшают атмосферу и климат на Земле. Предложена концепция, как уменьшить выбросы диоксидов углерода и сернистых га-

зов при производстве некоторых энергоемких строительных материалов. Предложено решение – механическую энергию гидротурбины, мощностью, например, 50 МВт и выше, превратить напрямую в высокотемпературное тепло без электрического генератора. Для этого существует преобразователь механической энергии в тепло – установка аэродинамического нагрева, созданная в России в 1960-х для инструментальных цехов.

2. Новизна концепции в том, что впервые предложено:

а) превратить механическую энергию гидротурбины мощностью порядка 50 МВт и выше для получения тепла без электрического цикла преобразования энергии с целью производства энергоемких строительных материалов;

б) использовать в качестве преобразователя механической энергии гидротурбины в поток теплоносителя с рабочей температурой 1200-1300°C рециркулярный аэродинамический нагрев;

в) применить для преобразователя энергии гидротурбины в поток теплоносителя несколько валов с лопатками на основе оксида алюминия и другой огнеупорной керамики.

3. Предложенная концепция, в случае её реализации, позволяет уберечь атмосферу от многих миллионов тонн диоксида углерода и выпадения кислотных дождей, значительного снижения капитальных затрат на переоборудование части гидротурбин ГЭС под производство энергоемких строительных материалов за счет исключения покупки электрогенераторов, каждый из которых стоит сотни миллионов рублей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глобальная добыча угля в 2022 году увеличилась на 7,9%. <https://oilcapital.ru/news/2023-06-27/ugol-perezhivaet-renessans-2967918> (дата обращения: 17.10.2023).
2. Правительство Китая подтверждает, что новая солнечная энергия достигнет 24,4 гигаватт в первом полугодии 2017 года. <https://cleantechnica.com/2017/08/08/china-government-confirms-24-4-gw-worth-new-solar-1h17/> (дата обращения: 17.10.2023).
3. Wind energy in Europe in 2019. Trends and statistics.2020.<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-ind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2019.pdf> (дата обращения: 17.10.2023).

4. *Кикот Д.* Нелицеприятная правда голубого водорода: анализ выбросов CO₂ и CH₄ «топлива будущего». <https://habr.com/ru/company/ua-hosting/blog/573294/> (дата обращения: 12.01.2023).
5. *Алхасов А.Б., Алхасова Д.А.* Современное состояние и перспективы освоения геотермальных ресурсов Северо-Кавказского региона // Теплоэнергетика. 2014. №6. С. 28-34.
6. *Кокоев М.Н., Федоров В.Т.* Возможности применения геотермальной энергии в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 1996. №5. С. 2-3.
7. *Кокоев М.Н., Федоров В.Т.* Выбор геотермальных месторождений для производства строительных материалов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XIX. №2 (32). 2023 С. 85-93.
8. *Березин А.* Призыв к тому, чтобы Россия стала водородной энергетической державой. Вот пять причин, почему это плохая идея. <https://naked-science.ru/article/nakedscience/chubays?ysclid=leb12tpa5e850996989> (дата обращения: 17.10.2023).
9. Норвегия производит 99% электроэнергии на гидроэлектростанциях. <https://www.kommersant.ru/doc/1634173> (дата обращения: 17.10.2023).
10. Саяно-Шушенская ГЭС установила исторический рекорд годовой выработки электроэнергии. <https://sshges.rushydro.ru/press/news/3101202242621/> (дата обращения: 17.10.2023).
11. В 2021 году «Три ущелья» преодолеют отметку в 100 млрд. кВт·ч электроэнергии. <https://www.waterpowermagazine.com/news/newsthree-gorges-crosses-100b-kwh-power-generation-mark-in-2021-9406102> (дата обращения: 17.10.2023).
12. *Бельский А.А., Яковлева Э.В.* Обоснование возможности использования возобновляемых источников энергии для энергоснабжения объектов минерально-сырьевого комплекса // Альтернативная энергетика и экология. Саров. №02/2 (120). 2013. С. 63-67.
13. Аэродинамическая печь (печь аэродинамического подогрева). <https://bigbigen.ru/c/aerodinamicheskaja-pech-8ca064> (дата обращения: 17.10.2023).
14. *Тевис П.И., Ананьев В.А., Шадек Е.Г.* Рециркуляционные установки аэродинамического нагрева. Москва: Машиностроение, 1986. 205 с.
15. *Исаев С.И.* Теория тепломассообмена. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 683 с.
16. Величины лобовых аэродинамических сопротивлений Cd тел различной формы. <https://habr.com/ru/articles/438854/> (дата обращения: 17.10.2023).
17. *Гончаров Г.В.* Краткий анализ мировых рынков рения и молибдена // Рений, вольфрам, молибден. Сб. материалов Международной научно-практич. конф. 24-25 марта 2016.
18. *Елисеев Б.М.* Расчет деталей центробежных насосов. Москва: Машиностроение, 1975. 207 с.
19. *Картер Ч.Б.* Керамические материалы: наука и техника / Ч.Б. Картер, М.Г. Нортон. Нью-Йорк: Springer, 2007. 716 с.
20. *Кудрявцев О.А., Сапожников С.Б.* Оценка прочности технической керамики в изделиях сложной формы // Вестник ЮРГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». 2014. Том 9. №3. С. 61-65.
21. *Монастырев А.В., Галиахметов Р.Ф.* Печи для производства извести. Воронеж: Истоки, 2011. 392 с.
22. Тепловые и атомные электрические станции / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. 2-е изд. Москва: Энергоиздат, 1982. 624 с.
23. *Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Габашев А.А.* Испытание грунтов осно-

ваний под здания и сооружения // Научно-технический журнал Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Том XVIII. №1 (27). С. 77-84.

24. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш. Получение жидкостекольных силикатнатриевых щелочных растворов из кремнеземсодержащих добавок // Научно-технический журнал Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2019. №1 (15). С. 58-68.

WATER TURBINE AS A SOURCE OF THERMAL ENERGY FOR ENERGY INTENSIVE BUILDING MATERIALS PRODUCTION

© V.T. Fedorov¹, M.N. Kokoev², A.V. Ilyukhin³

¹Concern "Nanoindustry", Moscow, Russia

²Kabardino-Balkar State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

³MARI, Moscow, Russia

Almost 9 billion tons of coal and tens of billions of tons of oil and gas burned annually do not help improve the climate and environment on Earth. The article proposes a concept to reduce emissions of carbon dioxide and sulfur dioxide gases in the production of certain energy intensive building materials. A solution has been proposed - the mechanical energy of a hydraulic turbine with a power of about 50 MW can be converted directly into high-temperature heat with an operating temperature of 1200-1300° C without an electrical energy conversion cycle. The converter uses several shafts with blades based on aluminum oxide and other refractory ceramics. In the 1960s such converter of mechanical energy into heat was created in Russia for tool shops. The concept, if implemented, will save the atmosphere from millions of tons of carbon dioxide and sulfur oxides, significantly reducing capital costs for converting some hydraulic turbines to power production of energy-intensive building materials by eliminating the installation of electric generators, each costing hundreds of millions of rubles.

Keywords: energy-intensive building materials, greenhouse gases, water turbine, energy conversion without an electric generator, high-temperature heat.

REFERENCES

1. 'Global coal production increased by 7.9% in 2022', available at: <https://oilcapital.ru/news/2023-06-27/ugol-perezhivaet-renessans-2967918> <https://oilcapital.ru/news/2023-06-27/ugol-perezhivaet-renessans-2967918> (Accessed 17.10.2023).
2. 'Chinese Government Confirms 24.4 Gigawatts Worth Of New Solar In H1'17', available at: <https://cleantechnica.com/2017/08/08/china-government-confirms-24-4-gw-worth-new-solar-1h17/> (Accessed 17.10.2023).
3. Wind energy in Europe in 2019. Trends and statistics. 2020, available at: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-ind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2019.pdf> (Accessed 17.10.2023).
4. Kikot, D. The Hard Truth of Blue Hydrogen: An Analysis of CO₂ and CH₄ Emissions of the "Fuels of the Future", available at: <https://habr.com/ru/company/ua-hosting/blog/573294/> (Accessed 12.01.2023).
5. Alkhasov A.B. and Alkhasova, D.A. (2014). 'Current state and development prospects geothermal resources of the North Caucasian region'. *Heat power engineering*. №6, p. 28-34.
6. Kokoev, M.N. and Fedorov, V.T. (1996). 'Possibilities of using geothermal energy in the production of building materials' *Building materials*. №5, pp. 2-3.
7. Kokoev, M.N. and Fedorov, V.T. (2023). 'Selection of geothermal deposits for the production of building materials.' *Herald of GSTOU. Technical Sciences*, Volume XIX, №2 (32), pp. 85-93.
8. Berezin, A. 'Call for Russia to become a hydrogen energy power. Here are five reasons why this is a bad idea', available at: <https://naked-science.ru/article/nakedscience/chubays?ysclid=leeb12tpa5e850996989> (Accessed 17.10.2023).
9. 'Norway produces 99% of its electricity from hydroelectric power plants', available at: <https://www.kommersant.ru/doc/1634173> (Accessed 17.10.2023).

10. ‘Sayano-Shushenskaya HPP set a historical record for annual electricity production’, available at: <https://sshges.rushydro.ru/press/news/3101202242621/> (Accessed 17.10.2023).
11. ‘Three Gorges crosses 100b kWh power generation mark in 2021’, available at: <https://www.waterpowermagazine.com/news/newsthree-gorges-crosses-100b-kwh-power-generation-mark-in-2021-9406102> (Accessed 17.10.2023).
12. Belsky, A.A. and Yakovleva, E.V. (2013). ‘Substantiation of the possibility of using renewable energy sources for energy supply of objects of the mineral resource complex’. *Alternative energy and ecology*. №02/2 (120). Sarov, pp. 63-67.
13. ‘Aerodynamic oven, (aerodynamic heating furnace)’, available at: <https://bigenc.ru/c/aerodinamicheskaja-pech-8ca064> (Accessed 17.10.2023).
14. Tevis, P.I., Ananyev, V.A. and Shadek, E.G. (1986). *Recirculating aerodynamic heating units*. Mechanical Engineering. Moscow, p. 205.
15. Isaev, S.I. (1997), *Theory of heat and mass transfer*. Publishing house of MSTU named after N.E. Bauman, Moscow, p. 683.
16. ‘The magnitude of the frontal aerodynamic resistance Cd of bodies of various shapes’, available at: <https://habr.com/ru/articles/438854/> (Accessed 17.10.2023)
17. Goncharov, G.V. (2016). ‘Brief analysis of the world markets of rhenium and molybdenum’ *Rhenium, tungsten, molybdenum. Sat. Materials of international scientific and practical. conf. 24-25 May 2016*.
18. Eliseev, B.M. (1975). *Calculation of parts of centrifugal pumps*. Mechanical Engineering. Moscow, 207 p.
19. Carter, C.B. and Norton, M.G. (2007). *Ceramic materials: science and engineering*. Springer, New York, 716 p.
20. Kudryavtsev, O.A. and Sapozhnikov, S.B. (2014). ‘Evaluation of the strength of technical ceramics in products of complex shape’ *Bulletin of SURSU. Series “Mathematics. Mechanics. Physics”*. Volume 9, №3, pp. 61-65.
21. Monastyr, A.V. and Galiakhmetov, R.F. (2011). *Furnaces for lime production*. Istoki, Voronezh, 392 p.
22. Thermal and nuclear power plants (1982). Under the general editorship. In V.A. Grigoriev and V.M. Zorina (ed.), 2nd (ed.), Energoizdat, Moscow, 624 p.
23. Murtazaev, S-A. Yu., Salamanova, M.Sh. and Gabashev, A.A. (2022). ‘Testing of soils under the foundation of buildings and structures’ *Herald GSTOU. Technical sciences*. Volume XVIII. №1 (27). P.77-84.
24. Murtazaev, S-A. Yu. and Salamanova, M.Sh. (2019). ‘Preparation of liquid-glass sodium silicate alkaline solutions from silica-containing substances’. *Herald of GSTOU. Technical sciences*, №1 (15), pp. 58-68.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УКЛАДЧИКА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА И АРКТИКИ

© А. В. Рябков¹, А. Н. Тараканов², Г. П. Хубаева³

¹ГГНУ, Тюмень, Россия

²ИШ «Философия эффективного управления», Москва, Россия

³СКГМИ (ГТУ), Владикавказ, Россия

Разработан алгоритм расчета НДС параметров и эффективная методика использования универсального автоматизированного укладчика в экстремальных условиях. Данная система будет обеспечена дистанционным управлением с единым пультом телеметрии в операторском режиме при точном инструментальном контроле выполнения всех норм технологического регламента, прямо на экране дисплея компьютера у оператора, находящегося в центре управления.

Ключевые слова: колея образующая направляющая, робототехника, унификация конструктивных схем, строительная мехатроника, бионический принцип моделирования, колебание.

Формат цитирования: Рябков А. В., Тараканов А. Н., Хубаева Г. П. Эффективность использования универсального автоматизированного укладчика в условиях Крайнего Севера и Арктики // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX, № 4 (34). С. 96-103. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.15.18.002

На первом этапе достоверного системного анализа методов строительства вдоль трассовых дорог для укладки трубопроводов на территории Крайнего Севера и Арктики и используемых строительных машин, трубоукладчиков показали технологическую ошибку. Она заключается в том, что разработчики не пошли по пути автоматизации управления отдельными технологическими операциями, а просто сконцентрировали свои усилия на создании универсальных и специализированных машин и трубоукладчиков.

На втором этапе комплексного анализа научно-практических работ за прошедшие годы, посвященных вопросам принятия оптимальной продуманной концепции проектирования, строительства и эксплуатации, а также оптимизации параметров при создании нового автоматизированного трубоукладчика, для освоения территории в экстремальных условиях Крайнего Севера и Арктики, а также на заболоченных и обводненных местах в условиях их протекания, выявлено отсутствие их тесной взаимосвязи друг с другом.

Необходимо отметить, что отдельные задачи решались на достаточно высоком научно-практическом уровне и в настоящее время имеют научную и практическую ценность [1,

8, 10, 15]. Тем не менее, все эти работы не объединены между собой целью, которая давно известна: из одного пункта в другой пункт по трубопроводу необходимо доставить определенное количество нефти, газа, нефтепродукта по прямой линии.

Проблемы возникают на первом же этапе выбора трассы: каким образом соединить пункты А и Б в экстремальных условиях, по кривой или по прямой линии, где пройдет трасса, какие препятствия она пересечет; как оценить наиболее труднопроходимые участки трассы; как увязать трассу с существующей и намечаемой на будущее системами трубопроводов, как увязать между собой диаметр труб, рабочее давление в трубопроводе, расстановку перекачивающих станций, число ГПА, вид технологии перекачки и т. д.

В связи с этим предлагаемое научное направление в строительном комплексе в экстремальных условиях для укладки дорог без вскрышных работ из понтонных модулей и трубопроводов всех типоразмеров на основе научно-технической и технологической базы позволит создать условия для проектирования универсального автоматизированного укладчика с дистанционным управлением, доведенным до степени компьютерных систем в опе-

раторском режиме, что является весьма актуальным!

В отличие от штатного управления, осуществляемого машинистом из кабины, при дистанционном управлении вся эргономическая нагрузка ложится на руки оператора-робота. Количество команд и динамика их исполнения при реализации принципа идентичности повлекли такое уменьшение компоновки пультов управления, что возникла необходимость специального обучения операторов с использованием компьютерной техники. Несмотря на то, что практика внедрения строительных роботов подтвердила вывод ученых о влиянии дистанционного управления на повышение производительности в разы, некорректность используемых подходов породила устойчивое общественное мнение о целесообразности использования радиоуправляемых строительных машин только в экстремальных условиях, что в корне неправильно!

Ошибочность такого мнения легко опровергается хотя бы тем, что на самом деле без дистанционного управления, осуществляемого в настоящее время помощниками машиниста трубоукладчика на трассе при помощи сигналов, подаваемых руками, голосом или по радию, невозможно выполнение многих технологических процессов в экстремальных условиях.

Кроме того, следует отметить, что реализация принципа идентичности обусловила использование аналоговых сигналов при формировании команд, подаваемых с пультов управления. Сложность обеспечения требуемого уровня их помехозащищенности и прецизионности исполнения существенно выше, чем при решении этих задач для дискретных сигналов.

Общий уровень сложности реализации принятых технических решений потребовал включения в штат обслуживающего персонала не только операторов-компьютерщиков, но и высокооплачиваемых специалистов по радиоэлектронике, что, в свою очередь, повлияло на уровень эксплуатационных расходов.

В основу предлагаемой нами реализации объективной потребности в дистанционном управлении положены следующие принципы:

- условия доведения уровня автоматизации строительного производства до степени компьютерных систем в операторском режиме;

- уровень агрегативности программно-технических средств должен обеспечивать возможность их поэтапно-преемственного внедрения с получением быстрого окупающего эффекта на каждом этапе внедрения;

- уровень автоматизации управления должен обеспечить доступность к управлению укладчиком персоналу любой квалификации, а также возможность оперативного контроля за качеством выполнения технологических операций;

- гарантировать выполнение условий безопасности при строительстве в особо сложных природно-климатических районах Крайнего Севера и Арктики, а также исключение строительства вдоль трассовых дорог, которое будет минимизировать экологические воздействия на окружающую хрупкую среду не на декларативном уровне, а реально!

Для реализации предложенного принципа необходима разработка математических моделей и методов расчета НДС универсального автоматизированного трубоукладчика с полной информационной характеристикой объекта моделирования (см. рис. 1).

В связи с вышеизложенным, целью научной статьи является:

- разработка концепции по использованию универсального автоматизированного укладчика дорог и трубопроводов с дистанционным управлением, доведённым до степени компьютерных систем в операторском режиме, и вывод машиниста укладчика из кабины и переход на режим дистанционного управления;

- разработка концепции экономической эффективности по использованию автоматизированного укладчика понтонных дорог и трубопроводов с дистанционным управлением, доведённым до степени компьютерных систем в операторском режиме.

Высокая потребительская ценность предлагаемой комплексной системы обусловлена в первую очередь корректностью ряда системных и научных подходов, положенных в основу используемых способов математического принципа моделирования, конструктивных и технологических решений.

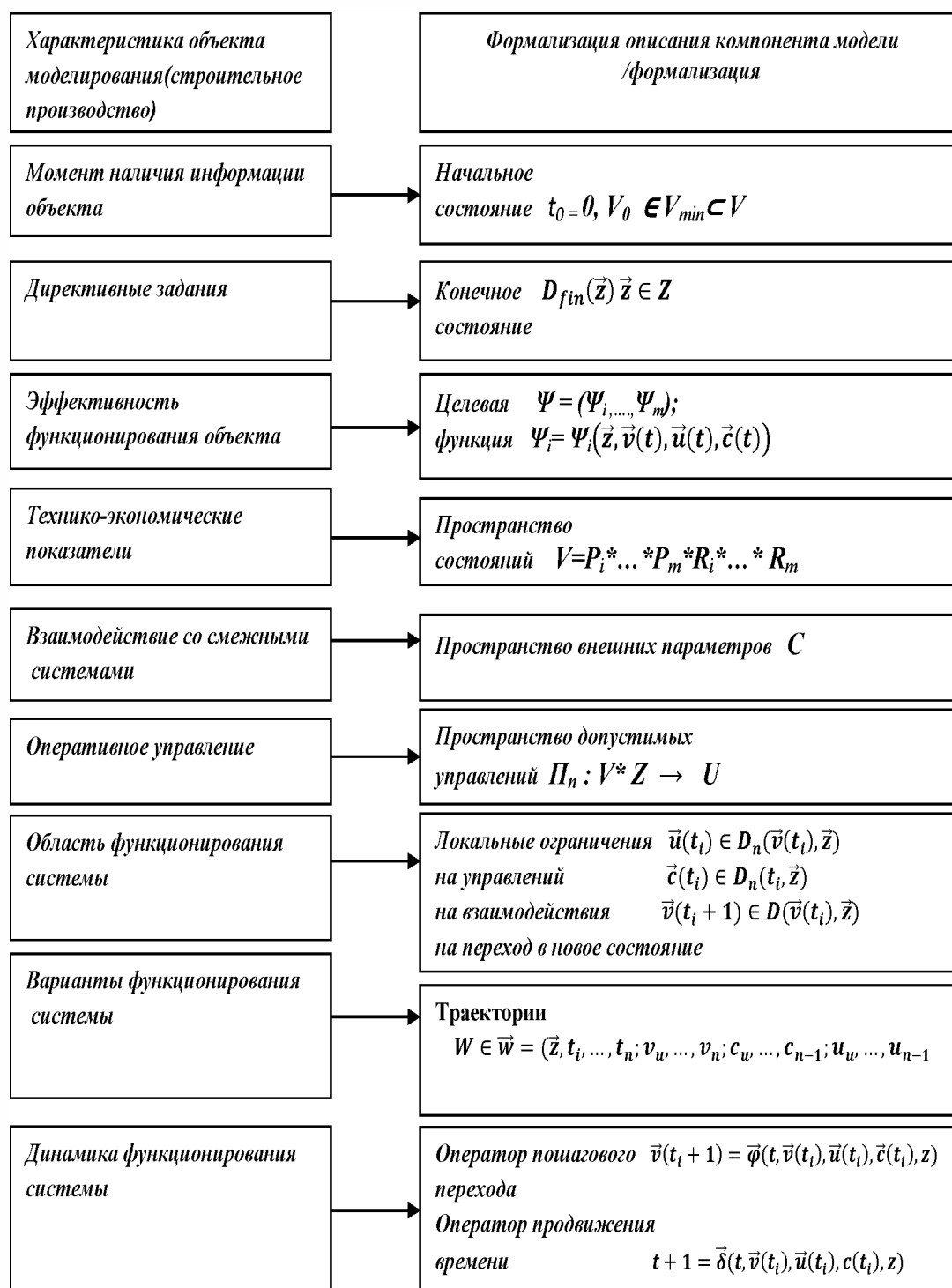


Рис. 1. Математическое представление информационной модели

Эта информационная модель позволит более полно отражать действительные условия работы и решать проблемы прогнозирования конструктивной надежности укладчика уже на стадии проектирования.

Таким образом, моделирование лежит в основе всех научных исследований, а созда-

ние новой конструкции автоматизированного укладчика с дистанционным управлением и применение бионического принципа моделирования представляет собой одну из попыток достигнуть научного понимания концепции проектирования нового универсального автоматизированного укладчика.

Поэтому использование бионического принципа моделирования и расчета регулирования параметров универсального автоматизированного укладчика и понтонного модуля позволит минимизировать пошаговые расчеты параметров и весовые характеристики всей конструкции, в частности за счет пассивной или активной оптимизации НДС [12].

Высокоэффективность предлагаемой технологии моделирования конструкции универсального автоматизированного укладчика породит бум производства радиоуправляемых машин и даже сформирует отдельное научное направление робототехники – строительная мехатроника.

Представленный общий алгоритм программы моделирования даёт возможность рассчитать и определить оптимальные параметры модульной конструкции универсального автоматизированного укладчика и понтонной дороги в целом.

Как видно, в основу предлагаемой конструктивно-технологической программы реализации объективной потребности в дистанционном управлении положены следующие принципы:

- комплексное управление универсальным роботом автоматизированным трубоукладчиком должно осуществляться при помощи различных дистанционных систем, управляемых бортовыми модулями, которые могут легко монтироваться на предлагаемой конструкции укладчика и производиться на базе единого агрегатного комплекта программно-технических средств [8, 10].

Основные результаты при моделировании параметров трубоукладчика: диаметр квадратных труб – 110 мм; длина квадратной трубы – 6000 мм; диаметр композиционного троса – 22 мм; тип лебёдки ЛП301 с максимальной тяговой силой с бандажом – 3000; диаметр колеса – 1200 мм и шириной – 500 мм; общая длина трубоукладчика – 40000 мм; с шириной – 3500 мм; высотой – 3200 мм с учетом факторов надежности и безопасности.

Один из основных показателей рациональности конструктивных решений – максимальная унификация конструктивных схем, узлов и отдельных элементов, их простота. Универсальный автоматизированный укладчик характеризуется небольшим расходом металла, малой серийностью и насыщенностью навесным оборудованием, определяющим во многом его конструктивную форму. Поэтому решение задачи внедрения проекта новой конструкции универсального автоматизированного укладчика открыло бы пути к унификации строительства дорог и трубопроводных транспортных систем в целом на территории Крайнего Севера и Арктики, а также к обеспечению безопасности использования в строительном комплексе в части, – радиоуправляемых строительных машинах при восстановлении Донбасса.

Используемые в конструкции полимерные композитные материалы (ПКМ) с успехом конкурируют с такими традиционными материалами, как металлы и сплавы. Сравнительный анализ физико-механических свойств некоторых конструкционных материалов, представ-

Таблица 1. Физико-механические свойства конструкционных материалов

Характеристики	Эпоксидная основа	Полиэфирная основа	Сталь
1. Плотность, кг/м ³	1300-1900	1300-1900	7850
2. Предел прочности при растяжении, МПа	550-1750	400-1150	340-450
3. Предел прочности при сжатии, МПа	460	320	-
4. Предел прочности при изгибе, МПа	500	350	-
5. Модуль упругости, ГПа	41	29	205
6. Температурный коэффициент линейного расширения, 100-300 К ⁻¹	9-12x10 ⁻⁶	2-3x10 ⁻⁶	1-10x10 ⁻³
7. Удельная теплоемкость, Дж/кг.К	130-990	80-670	10-650
8. Ударная вязкость, кДж/м ²	20-680	30-900	30-780

ленных в табл. 1, позволяет определить достоинства ПКМ.

Достоверность результатов подтверждена сопоставлением численных результатов расчета с решениями частных задач другими методами. Дана оценка внутренней сходимости результатов решения методом конечных разностей при удержании различного количества узловых точек на исследуемом интервале. Вот почему в предложенной технологии применяется модульный способ строительства, что вызывает внедрение блочно-комплектного способа подбора оборудования, позволяющего оптимизировать характеристики конструкции, резко повысить ремонтпригодность и возможность обслуживания трассы при любых климатических условиях. Это дает возможность выработки рациональной стратегии управления и надежной эксплуатации всей системы.

В настоящее время в постановочном варианте решена задача оптимизации различных элементов и смоделирован общий вид созданного универсального автоматизированного укладчика для труднодоступных районов Крайнего Севера и Арктики, как показано на рис. 2.

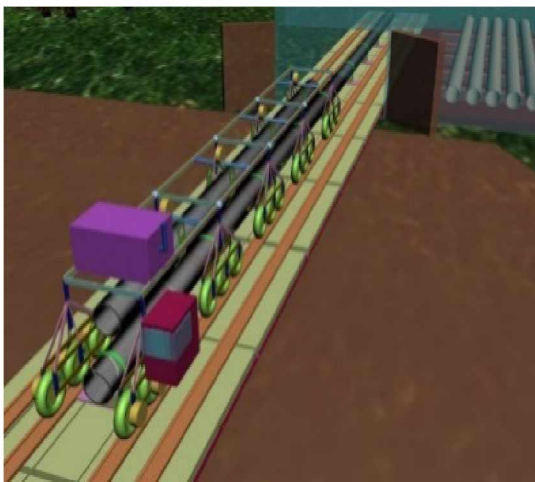


Рис. 2. Общий вид универсального автоматизированного укладчика на понтонной дороге

Для нормальной эксплуатации универсального автоматизированного укладчика, расположенного в ветровом потоке, необходимо обеспечить аэродинамическую устойчивость в целом, а также отдельных его элементов.

Кроме необходимого обычного расчета на ветровую нагрузку с учетом порывистости

ветра, выполняют дополнительные расчеты на ветровой резонанс, поскольку рассматриваемые сооружения гибкие, и в них возможно возникновение интенсивных колебаний в направлении, перпендикулярном ветровому потоку.

Интенсивное нарастание амплитуд колебаний в боковой плоскости, перпендикулярной плоскости ветрового потока, вызываемое совпадением частоты колебаний тела с частотой срыва вихрей Кармана и с одной из собственных частот сооружений, называется ветровым резонансом.

Концепция автоколебаний, положенная в обоснование явлений, возникающих при обтекании ветровым потоком, позволяет не только вскрыть механизм колебаний, но и найти пути обеспечения аэродинамической устойчивости укладчика в экстремальных условиях. Способность противостоять ветровым нагрузкам и колебаниям обеспечивается в том случае, когда все соединения в конструкции укладчика выполняются болтовым способом!

Анализ технологического процесса работы универсального автоматизированного укладчика и возможных условий его протекания показывает, что систему группового дистанционного управления следует реализовывать в следующем виде. Все подготовительные операции автоукладчика выполняются оператором в автоматическом режиме. Система обеспечивает дистанционное управление с единого пульта одним оператором при точном инструментальном контроле выполнения всех норм технологического регламента, прямо на экране дисплея. Предусматривается возможность включения бортового пульта, используемого при возникновении аварийных ситуаций.

Ожидаемое увеличение производительности при гарантированном качестве производства работ может достигать до 100%.

Сегодня управление строительной машиной и укладчиком осуществляется в основном при помощи 10 дискретных команд: вперед, назад, вправо, влево, скорее или медленнее, поднять, опустить, стоп. Эти команды формируются двумя джойстиком с бортового пульта.

Команды с джойстиков поступают на вход логико-коммутационного блока. В зависимости от вида поступившей команды, на выходе

логики-коммутационного блока формируется последовательность воздействий на органы управления укладчика.

Сигналы с выхода логики-коммутационного блока в зависимости от конструктивных особенностей универсального автоматизированного укладчика могут поступать непосредственно на входы приводов электродвигателей, электрозолотников гидropневмоприводов или на входы навесных электромеханических приводов. В рамке научной статьи описание систем приведено в общем виде. Более подробно описание этих и других систем будет представлено в дальнейших работах.

В настоящее время существует несколько подходов к пониманию свойств живучести конструктивных решений трубопроводных систем. С одной стороны, живучесть – свойство объекта противостоять возмущениям, не допуская их разрушения и развития отказов, что принципиально важно на Севере. С другой стороны, надежность новых конструктивных технических и технологических систем зависит как от надежностных характеристик, заложенных при их проектировании и создании, так и от режима эксплуатации, обслуживания и ремонта.

Выбор функциональной и технической структуры системы универсального автоматизированного управления укладчиком должен осуществляться главным образом на основании анализа сопоставления сложившейся «прибыльности» работы серийного укладчика и ее прогнозируемого значения при переходе на автоматизированное дистанционное управ-

ление в операторском режиме, которое достаточно просто считается.

Естественно, что при выборе функциональной структуры системы дистанционного управления универсального автоматизированного укладчика должен учитываться весь спектр факторов и источников повышения эффективности. В этой связи значительный экономический эффект может быть получен при внедрении системы дистанционного управления, выполняемого при прокладке дорог и трубопроводов универсальным автоматизированным укладчиком в экстремальных условиях.

Основным выводом является: представленная научная статья посвящена эффективности использования концепции универсального автоматизированного самоходного укладчика, имеющего две степени свободы и обеспеченного дистанционным управлением; новая конструкция создана в расчете на всё многообразие строительных процессов по укладке дорог на понтонных основаниях и трубопроводов круглогодично и комфортно при освоении территории в экстремальных условиях Крайнего Севера и Арктики, а также на заболоченных и обводненных местах в условиях их протекания.

Такое конструктивно-технологическое решение предопределило функциональную избыточность универсальных автоматизированных робототехнических решений, поэтому его можно оптимально использовать и в строительном комплексе в части – радиоуправляемых машин при восстановлении Донбасса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Айнбиндер А.Б.* Расчет магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость/*А.Б. Айнбиндер.* М.: Недра, 1991. 287 с.
2. *Андрюенко В.Г.* Индустриализация строительства объектов нефтяной и газовой промышленности/*В.Г. Андрюенко, Ю.П. Баталин, Г.И. Шмаль.* М.: Недра, 1985. 342 с.
3. *Верюжский Ю.В.* Численные методы потенциала в некоторых задачах прикладной механики. *Ю.В. Верюжский.* Киев: В. школа, 1978. 184 с.
4. ВСН 2-105-78. Инструкция по строительству временных дорог для трубопроводного строительства в сложных условиях (на обводненной и заболоченной местности). М.: МНГС, 1978. 114 с.
5. *Иванов В.А., Лысяный К.К.* Надёжность и работоспособность конструкций магистральных нефтепроводов. СПб.: Наука, 2003. 319 с.
6. Математическое моделирование при расчетах и исследованиях строительных конструкций: учеб. пособие/*В.В. Горев, В.В. Филиппов, Н.Ю. Тезиков.* М.: Высшая школа, 2002. 206 с.
7. *Мартыненко Е.П.* Сопrotивление материалов/*Е.П. Мартыненко, А.Ф. Закураев.* Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. 111 с.

8. Минаев В.И. Научные основы создания прогрессивных механизированных комплексов для сооружения магистральных трубопроводов/В.И. Минаев: диссер. ... докт. техн. наук. М.: НГИ им. Губкина, 1980. 278 с.
9. Никитенко Ф.А. Разработка карты по структурно-тектоническому и возрастному признакам территории Сибири. М.: МГУ, 1962. 141 с.
10. Подгорбунский Г.Е. Разработка технологии монтажно-укладочных работ при строительстве трубопроводов в условиях Западной Сибири/Г.Е. Подгорбунский: диссертация ... канд. техн. наук. М.: НГИ им. Губкина, 1987. 158 с.
11. Прочность, устойчивость, колебания. Спр. в трех томах. Том 3/Под ред. чл.-корр. АН. Латв. ССР Я.Г. Папонко. Рига: Наука, 1992. 156 с.
12. Рябков А.В. Методы расчета характеристик упругодеформированного состояния пластин из композиционных материалов при проектировании трубопроводов // Изв. КБНЦ РАН №6 (68). Том 2. 2015. С. 78-83.
13. Расчет параметров композитного понтонного модуля/А.В. Рябков [и др.] // Наука и техника в дорожном отрасли. №2. М., 2012.
14. СНиП 3.04.03-85 Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии.
15. Цытович Н.А. Механика грунтов/Н.А. Цытович. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

EFFECTIVENESS OF USE OF A UNIVERSAL AUTOMATED STACKER IN THE FAR NORTH AND ARCTIC CONDITIONS

© A. V. Ryabkov¹, A. N. Tarakanov², G. P. Khubaeva³

¹T SOGU, Tyumen, Russia

²SS "Philosophy of Effective Management", Moscow, Russia

³NCMMU, Vladikavkaz, Russia

An algorithm of the TAC parameters calculation and the effective methodics of the general-purpose automated stacker in the extreme conditions were developed. The present system will be supplied with the remote control using the single telemetry unit in the operative regime under the instrumental monitoring of the whole technological scheme norms right on the operator's computer display screen placed in the contral centre.

Keywords: robot technology, unification of constructive schemes, building mechatronics, bionic modeling principle, fluctuations.

REFERENCES

1. Ainbinder, A. B. (1991). *Calculation of main and field pipelines for strength and stability*, Moscow, Nedra, 287p.
2. Andrienko, V. G. Batalin, Yu.P. and Shmal, G. I. (1985). *Industrialization of the oil and gas units building in the gas industry*. Nedra, Moscow, 342 p.
3. Veryuzhski, Yu.V. (1978). Numerical methods of potential in some problems of the applied mechanics. H. School, Kiev 184 p.
4. (1978). *VBN 2-105-78 Instruction on the temporary roads building for the pipe – lines in the difficult conditins (diswater and water-logged land)*. MOGB, Moscow, 114 p.
5. Ivanov, V. A. and Lysyanyi, K. K. (2003). *Reliability and working-ability of the oil pipe sream constructions*, Nauka, St.Peterburg. 319 p.
6. Gorev, V. V., Filippov, V. V. and Tezиков, N. U. (2002). *Mathematical modeling for the calculation and research of the building constructions: Textbook*. High School, Moscow, 206 p.
7. Martynenko, E. P. and Zakuraev, A. F. (2011). *Resistance of materials*. Tyumen State University, Tyumen, 111 p.
8. Minaev, V. I. (1980). 'Scientific Basis for the progressive mechanized compexes creation during main sream pipe-lines construction'. D. Sc. Thesis. OSU named after Gubkin, Moscow, 278 p.

9. Nikitenko, F. A. (1962). *Development of a map on structural-tectonic and age characteristics of the territory of the West Siberian Plain*. Moscow State University, Moscow, 141 p.
10. Podgorbunski, G. E. (1987). 'The maintenance stacker works technology development during pipe-line construction in the West Siberia'. Ph.D. Thesis, OSU named after Gubkin, Moscow. 158 p.
11. Paponko, Ya.G. (ed.) (1992). *Reliability, stability fluctuations*. III vol, Nauka, Riga, 156 p.
12. Ryabkov, A. V. (2015). 'Calculation methods of the plates elastically-deformed state characteristics during pipe-line design'. *Bulletin of KBSCh of RASc*, №6 (68) V.2, pp. 78-80.
13. Ryabkov A.V. and others (2012). 'Calculation of the parameters of the composite pontoon module'. *Science and technology in the road industry*, №2, Moscow.
14. SNiP 3.04.03-85 Protection of building structures and structures from corrosion.
15. Tsytoich, N. A. (1983). *Mechanics of soils*. Vysshaya shkola, Moscow, 288 p.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ В ЩЕЛОЧНОЙ СРЕДЕ

© С.В. Федосов^{1,3}, С-А. Ю. Муртазаев^{1,2}, М.Ш. Саламанова^{1,2}

¹ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

²КНИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный, Россия

³Национальный исследовательский МГСУ, Москва, Россия

Научное сообщество давно ставит амбициозные задачи по разработке технологий, поддерживающих углеродную нейтральность, ведь декарбонизация и энергопереход жизненно необходимы с точки зрения социальных, экологических и экономических эффектов. В работе представлен сравнительный анализ результатов расчетов термодинамической активности по диспергации разных минералов в насыщенной щелочной среде. Проведенный термодинамический расчет реакционной способности минеральных порошков в щелочной среде подтверждает эффективность данной технологии.

Ключевые слова: термодинамический расчет, отходы промышленности, щелочной активатор, аспирационная пыль, жидкое стекло, реакционный порошок.

Формат цитирования: Федосов С.В., Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш. Термодинамический расчет реакционной способности минеральных порошков в щелочной среде // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX, №4 (34). С. 104-113. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.35.67.008

Выпускаемая продукция строительного кластера должна содержать разнообразную, отвечающую запросам потребителей, номенклатуру материалов, изделий и конструкций. Конечно же это относится и к ассортименту вяжущих материалов. Цементные заводы выпускают однообразную клинкерную продукцию, не рассматривая варианты использования отходов промышленности или получения композиционных веществ с конкретными показателями. А учитывая данные Международного энергетического агентства предприятия цементной промышленности относятся к категории «грязных» производств, по доле выбросов в атмосферу оксида углерода (26%) уступают только заводам черной металлургии. Помимо этого опасны эксплозиями тонкодисперсной реакционной цементной пыли, соединений серы, тяжелых металлов и др. в окружающую среду. Необходимо развивать бесклинкерное направление и возможности щелочной активации алюмосиликатных добавок, тем самым решая перспективные и актуальные вопросы человечества [1-4].

Результатами исследований было установлено, что реакционная активность тонкодис-

персных порошков различного происхождения, в зависимости от условий взаимодействия, и в частности с щелочными и щелочноземельными растворами, протекает в соответствии с известным уравнением Соболева – Пирсона. Сущность этого правила заключается в том, что химическое взаимодействие происходит только между сильной кислотой и сильным основанием, а слабая кислота реагирует только со слабым основанием.

Также существует гипотеза, если в минеральном составе искусственного материала, горной породы или минерала в преобладании находятся такие кислотные оксиды, как кремнезем SiO_2 , глинозем Al_2O_3 , то перечисленные объекты будут достаточно кислотостойкими, но наблюдается активное взаимодействие с основными щелочными (Na_2O , K_2O) или щелочноземельными оксидами (CaO , MgO). В другом случае, если в химико-минеральном составе искусственного материала, горной породы или минерала присутствуют в большом количестве основные оксиды, то данные объекты являются щелочестойкими, но слабо противостоят действию на них слабых и сильных кислот [5-6].

Существуют различные разновидности такого твердого и прочного минерала, как кварц SiO_2 . Наиболее часто встречающиеся в горных породах модификации – это опал, оникс, халцедон, агат, тридирмит, бингемит, кристобалит и др. Известно, что они трудно вступают в реакцию с водой, но в сильно щелочной среде, в гидротермальных условиях проявляют активное взаимодействие с оксидами щелочных и щелочноземельных металлов, образуя в итоге гидратные соединения силикатов натрия, калия, кальция. Результаты микроанализов подтверждают скопления гидратокристаллов в контактной зоне камня [5].

Породообразующий минерал полевой шпата состава $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{SiO}_2$ имеет несколько модификаций, незначительно отличающихся химическим составом:

- ортоклаз (прямо раскалывающийся) $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$
- плагиоклаз (косо раскалывающийся) $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$.

Минерал плагиоклаз имеет также разновидности: $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ (альбит) и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (анортит).

В соответствии с правилом Соболева–Пирсона полевые шпаты имеют в кристаллохимической структуре три моля SiO_2 и один моль Al_2O_3 , что влечет за собой ослабление связей в сопоставлении с минералом кварцем, которому свойственны высокая плотность, твердость, прочность. Следовательно, полевые шпаты обладают сравнительно слабыми физико-механическими свойствами и стойкостью, чем у кварца. Формирование структуры полевых шпатов происходит за счет химического взаимодействия кислотных и основных оксидов, и в результате этого образуются соединения в виде солей алюмокремниевых кислот и щелочных металлов, основность можно описать составом $\text{Na}_2\text{O} / 3(\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) \approx 0,26$ [8, 9].

Минералы слюда и гидрослюда часто присутствуют в сырьевых компонентах формовочных смесей, порошков, заполнителей. Этот минерал относится к группе алюмосиликатов. Существует несколько модификаций этого минерала, часто встречающиеся – это мусковит и

биотит. Мусковит и биотит в своей структуре содержат некоторую долю ионов алюминия Al^{3+} , которая может замещаться эквивалентными ионами магния MgO^{2+} . Следует отметить, минералы слюда и гидрослюда в сравнении с полевым шпатом и кварцем имеют меньшую основность и реакционную активность в условиях контактирования с щелочными и щелочноземельными металлами [7-10].

Ниже излагаются результаты расчетов при 25°C . Исходные данные для расчетов взяты из [6] и других источников:

1. β – кварц:



Принимаем, в ккал/моль:

$$\Delta G_{298}^0 \text{SiO}_2 = -204,7; \Delta G_{298}^0 \text{OH}^- = -37,6;$$

$$\Delta G_{298}^0 \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} = -283,1.$$

$$\text{Тогда } \Delta G_p = -3,2 \text{ ккал/моль; } \lg K_p = 2,34;$$

$$[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 1,15 \cdot 10^{-3} = 1,15 \text{ ммоль/л} = 68,9$$

SiO_2 мг/л

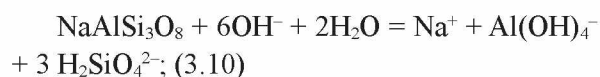
Из уравнения реакции следует:

$$[\text{OH}^-] = 2[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 1,15 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 2,3 \cdot 10^{-3}$$

моль/л;

$$\text{pH} = 11,3 \text{ [6].}$$

2. Альбит:



$$\text{Принимаем в ккал/моль: } \Delta G_{298}^0 \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 = -888,1; \Delta G_{298}^0 \text{Na}^+ = -62,6;$$

$$\Delta G_{298}^0 \text{Al}(\text{OH})_4^- = -316; \Delta G_{298}^0 \text{OH}^- = -37,6;$$

$$\Delta G_{298}^0 \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} = -283,1;$$

$$\Delta G_{298}^0 \text{H}_2\text{O} = -56,7.$$

$$\Delta G_p = -1,0 \text{ ккал/моль; } \lg K_p = 0,7;$$

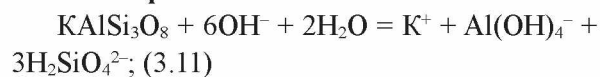
$$[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 5,37 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л} = 20,8 \text{ мг/л}$$

SiO_2 .

$$\text{pH} = 10,8.$$

$$[\text{Al}(\text{OH})_4^-] = 11,2 \text{ мг/л } \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ [6].}$$

3. Микроклин:



$$\text{Принимаем в ккал/моль: } \Delta G_{298}^0 \text{KAlSi}_3\text{O}_8 = -893; \Delta G_{298}^0 \text{K}^+ = -67,5;$$

$$\Delta G_{298}^0 \text{Al}(\text{OH})_4^- = -316; \Delta G_{298}^0 \text{OH}^- = -37,6;$$

$$\Delta G_{298}^0 \text{H}_2\text{SiO}_4^{2-} = -283,1;$$

$$\Delta G_{298}^0 \text{H}_2\text{O} = -56,7.$$

$$\Delta G_p = -0,8 \text{ ккал/моль; } \lg K_p = 0,59;$$

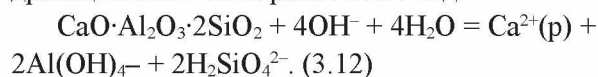
$$[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}] = 4,47 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л} = 26,8 \text{ мг/л}$$

SiO_2 .

$[Al(OH)_4^-] = 1/3 \cdot [H_2SiO_4^{2-}] = 1/3 \cdot 4,47 \cdot 10^{-4} = 1,49 \cdot 10^{-4}$ моль/л = 15 мг/л Al_2O_3 ,
 $[K^+] = 1/3 \cdot [H_2SiO_4^{2-}] = 1/3 \cdot 2,24 \cdot 10^{-2} = 74$ ммоль/л = 296 мг/л;
 $[OH^-] = 2[H_2SiO_4^{2-}] = 4,47 \cdot 10^{-4} \cdot 2 = 8,94 \cdot 10^{-4}$ моль/л;
 pH = 10,91 [6].

4. Анортит:

Схема реакции для начальной стадии гидратации этого минерала имеет вид:



Принимаем в ккал/моль:

$\Delta G_{298}^0 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 = -960,5$; $\Delta G_{298}^0 Ca^{2+} = -132,3$;

$\Delta G_{298}^0 Al(OH)_4^- = -316$; $\Delta G_{298}^0 OH^- = -37,6$;
 $\Delta G_{298}^0 H_2SiO_4^{2-} = -283,1$;

$\Delta G_{298}^0 H_2O = -56,7$.

Изменение свободной энергии при этой реакции:

$\Delta G_p = 7,2$ ккал/моль;

$lg K_p = -5,27$;

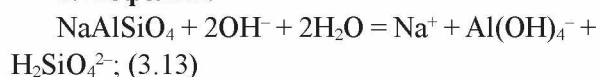
$lg [H_2SiO_4^{2-}] = 5,62$; $[H_2SiO_4^{2-}] = 4,17 \cdot 10^{-2}$ ммоль/л = 2,5 мг/л SiO_2 ;

$[Al(OH)_4^-] = [H_2SiO_4^{2-}] = 0,17$ ммоль/л = 17,37 мг/л Al_2O_3 .

$[OH^-] = 2[H_2SiO_4^{2-}] = 2 \cdot 4,17 \cdot 10^{-5} = 8,34 \cdot 10^{-5}$ моль/л;

pH = 10 [6].

5. Нефелин:



Принимаем в ккал/моль: $\Delta G_{298}^0 NaAlSiO_4 = -476,6$; $\Delta G_{298}^0 Na^+ = -62,6$;

$\Delta G_{298}^0 Al(OH)_4^- = -316$; $\Delta G_{298}^0 OH^- = -37,6$;
 $\Delta G_{298}^0 H_2SiO_4^{2-} = -283,1$;

$\Delta G_{298}^0 H_2O = -56,7$.

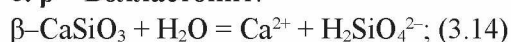
$\Delta G_p = 3,0$ ккал/моль; $lg K_p = -2,2$;

$[H_2SiO_4^{2-}] = 1500$ мг/л SiO_2 ;

pH = 12,7;

$[Al(OH)_4^-] = [H_2SiO_4^{2-}] = 2,5 \cdot 10^{-2}$ моль/л = 2500 мг/л Al_2O_3 [6].

6. β – Волластонит:



Принимаем в ккал/моль: $\Delta G_{298}^0 \beta - CaSiO_3 = -370,4$; $\Delta G_{298}^0 Ca^{2+} = -132,3$;

$\Delta G_{298}^0 H_2SiO_4^{2-} = -283,1$; $\Delta G_{298}^0 H_2O = -56,7$.

$\Delta G_p = 11,7$ ккал/моль;

$lg K_p = -8,38$; $K_p = [Ca^{2+}][H_2SiO_4^{2-}] = [H_2SiO_4^{2-}]^2$;

$2lg[H_2SiO_4^{2-}] = -8,58$; $lg[H_2SiO_4^{2-}] = -4,29$;

pH = 12,8;

$[H_2SiO_4^{2-}] = 5,13 \cdot 10^{-5}$ моль/л ≈ 3 мг/л SiO_2 [6].

Проведенный термодинамический расчет активности минералов разных групп в зависимости от диспергации исследуемых порошков в сильной щелочной среде позволил сделать сравнение с экспериментальными результатами. Получено, что аналитический расчет устанавливает числовой показатель активности вещества и ионов, а в ходе проведения эксперимента выявляем равновесную растворимость среды. Сравнительный анализ показал следующую погрешность, опытные данные выше расчетных примерно на 11-16% и варьируют в зависимости от количественного состава вещества и ионов в щелочной среде. На основании проведенных исследований установлено, что с повышением термодинамической активности растет химическая скорость протекания превращений в системе.

Результаты термодинамического расчета позволяют в зависимости от активности минералогического состава составляющих минеральных связей расположить добавки в следующий ряд возрастания реакционной способности: нефелин > микроклин > альбит > анортит > кристаллический волластонит [10-15]. И в такой же последовательности находятся вязжущие композиции с использованием порошков из указанных добавок по степени активности и прочности материала.

Химический потенциал минералов и скрытые центры кристаллизации влияют непосредственно на внутренний резерв и активность минеральных добавок, в результате взаимодействия в щелочной системе можно оценить интенсивность самопроизвольной диспергации частиц твердого материала в равновесной среде. Процесс самопроизвольного диспергирования частиц твердой фазы в щелочной среде протекает по следующим закономерностям:

– диффузионные процессы, связанные с адсорбированием поверхностью зерен мине-

ральной добавки щелочного компонента, с дальнейшим распространением мембранной прослойки в гель с образованием первичных зародышей $R_2O - R_2O_3 - SiO_2$, частицы частично диспергированы;

– массообменные процессы продолжают и приводят к повышению концентрации коллоидного гидрогеля и росту кристаллов $R_2O - R_2O_3 - SiO_2$ с дальнейшим развитием цеолитовой фазы.

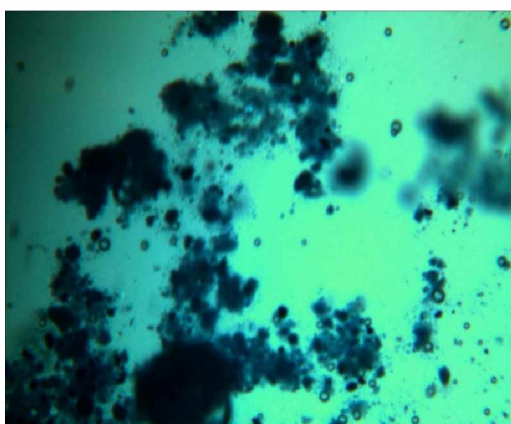
На основании существующих закономерностей можно констатировать, что частицы реакционного порошка проявляют свою реакционную способность в полной мере, с уменьшением размерности частичек и повышением температуры теплового взаимодействия, что приведет к сокращению времени диспергации в различных средах, и в частности щелочной.

Для изучения процессов самопроизвольной диспергации реакционной способности активных порошков исследовались: активированный в муфельной печи при $700^\circ C$ порошок опоки, отходы цементного производства в виде аспирационной и клинкерной пыли в щелочном компоненте. Процесс диспергации непосредственно связан с активностью материала и жидкой среды. Поэтому индикатор активности оценивали по степени диспергации твердой фазы в щелочи. В качестве щелочной среды для диспергации были исследованы натриевое жидкое стекло (водный раствор метасиликата натрия) и гидроксид натрия 40% концентрации.

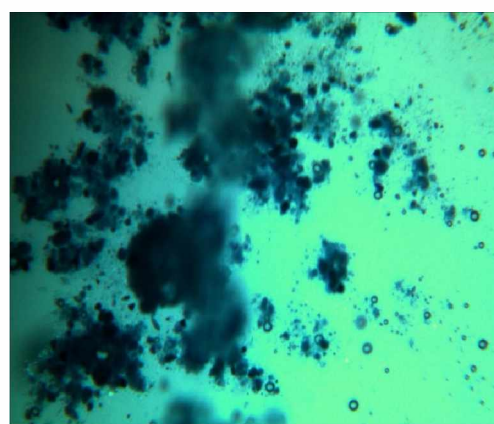
Изучение данного процесса щелочной дис-

пергации проводили с помощью лабораторного биомедицинского микроскопа ЛабоМед-2 с системой визуализации. Сравнительный анализ изменения размера частиц до и после щелочной активации позволит судить об эффективности щелочного активатора, вяжущей способности твердой фазы. Увеличение микроскопа 25 крат, микрофотографии частиц, активированных щелочью, переданы с помощью фотокамеры DCM-310 и программы ScopePhoto 3.0 для визуализации изображения на экране и последующего компьютерного анализа (рисунки 1-6).

Изучая результаты микроанализа щелочной диспергации реакционно-способных порошков, можно отметить растворение твердой фазы в жидкой среде не однозначно, и протекает в зависимости от таких факторов, как дисперсность частиц порошка, активность твердых тел, основность среды, концентрация раствора и др. Приведенные микрофотографии подтвердили, что частицы аспирационной пыли и термоактивированной опоки проявили активность и начали самопроизвольное растворение примерно в диапазоне 15-20 минут, активация в районе 60-120 минут привела к формированию кремнегеля. В растворе едкого натрия 40% концентрация растворения реакционно-способных частичек протекает значительно интенсивней, чем в среде метасиликата натрия. Клинкерная пыль диспергировалась медленней, вероятно, это обусловлено наличием стекловидной фазы, ведь этот продукт

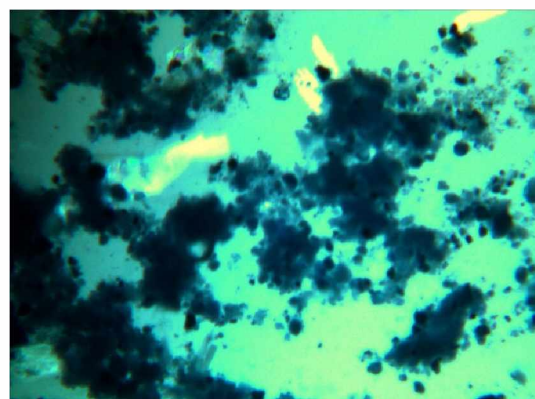
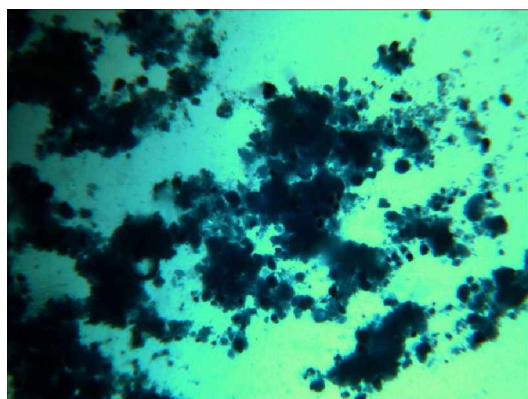


аспирационная пыль + Na_2SiO_3 активация 60 минут

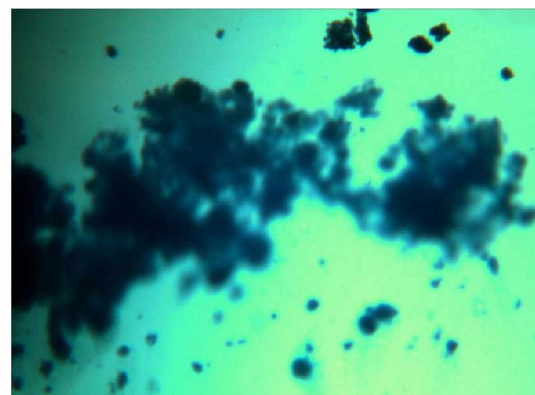
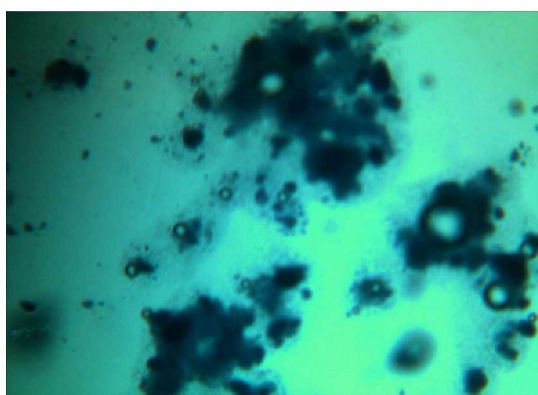


аспирационная пыль + Na_2SiO_3 активация 120 минут

Рис. 1. Диспергация частиц аспирационной пыли в растворе Na_2SiO_3



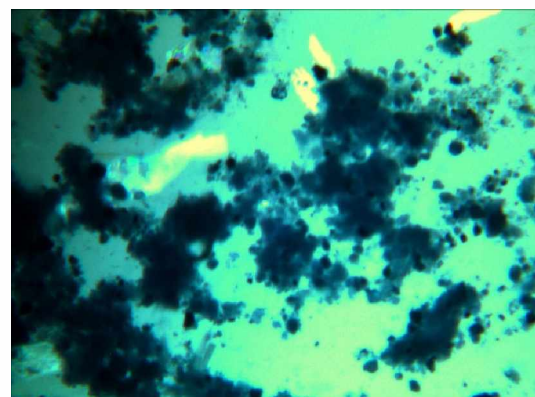
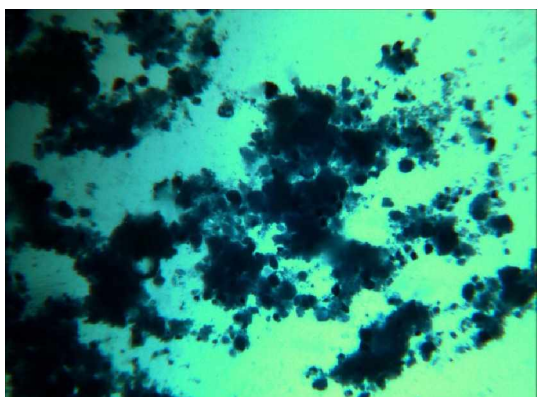
аспирационная пыль + NaOH активация 60 минут аспирационная пыль + NaOH активация 120 минут
Рис. 2. Диспергация частиц аспирационной пыли в NaOH (40% концентрации)



Термоактивация опоки при 700°C + Na₂SiO₃
активация 60 минут

Термоактивация опоки при 700°C + Na₂SiO₃
активация 120 минут

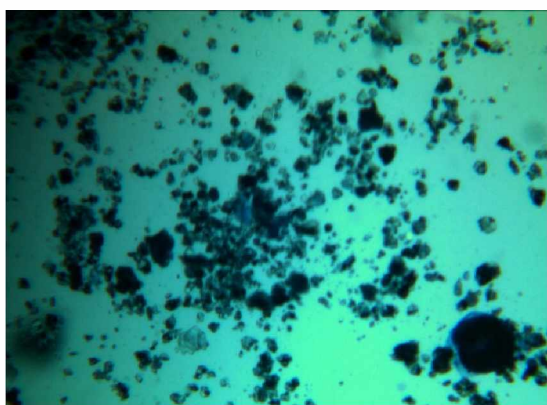
Рис. 3. Диспергация частиц термоактивированной опоки при 700°C



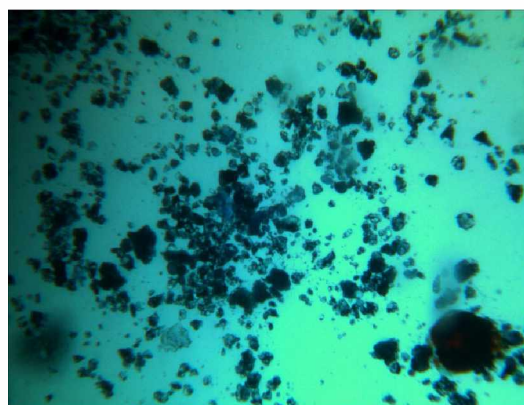
Термоактивация опоки при 700°C + NaOH
активация 60 минут

Термоактивация опоки при 700°C + NaOH
активация 60 минут

Рис. 4. Диспергация частиц термоактивированной опоки при 700°C в растворе едкого натра



клинкерная пыль + Na_2SiO_3 активация 60 минут

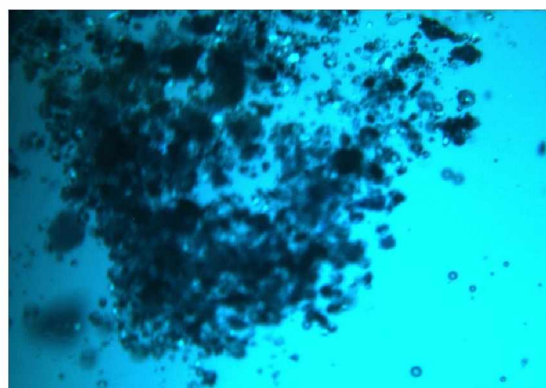


клинкерная пыль + Na_2SiO_3 активация 120 минут

Рис. 5. Диспергация зерен клинкерной пыли в Na_2SiO_3



клинкерная пыль + NaOH активация 60 минут



клинкерная пыль + NaOH активация 120 минут

Рис. 6. Диспергация зерен клинкерной пыли в растворе NaOH

собран в зоне обжига и длительное время находился под воздействием высоких температур. Едкий натр сильной концентрации способствует ускорению растворения клинкерной пыли, но наблюдался в дальнейшем процесс выщелачивания.

Процесс самопроизвольного диспергирования твердой фазы в щелочном растворе можно представить в виде топологической модели синтеза композиции «гелеобразный щелочной слой – нерастворенная часть порошков алюмосиликатной природы» (рисунок 7).

Представленная топологическая модель дает возможность воспринимать алгоритм протекающих процессов:

- самопроизвольное растворение частиц алюмосиликатной добавки с формированием Me_2O – алюмосиликатного гидрогеля;

- адсорбционное реагирование Me_2O – алюмосиликатного гидрогеля, за счет возникающего на поверхности внутреннего давления,

с непрогидратированной частью алюмосиликатной добавки, в результате формируется система «гелеобразный щелочной слой – нерастворенная часть алюмосиликатной добавки».

Процесс диспергирования твердой фазы в щелочном активаторе зависит и от степени кристалличности, с уменьшением этого показателя, растворение частиц алюмосиликатной добавки интенсифицируется и приводит к увеличению аморфизированного геля на поверхности материала. Аспирационная и клинкерная пыль, опока термоактивированная отличаются аморфной, частично скрытокристаллической структурой. По индикатору кристалличности исследуемые добавки можно расположить в следующий ряд: аспирационная пыль → термоактивированная опока → клинкерная пыль. Полученный ряд соответствует и температурам теплового воздействия исследуемых продуктов: аспирационная пыль 500°C → опока 700°C → клинкерная пыль 1500°C .

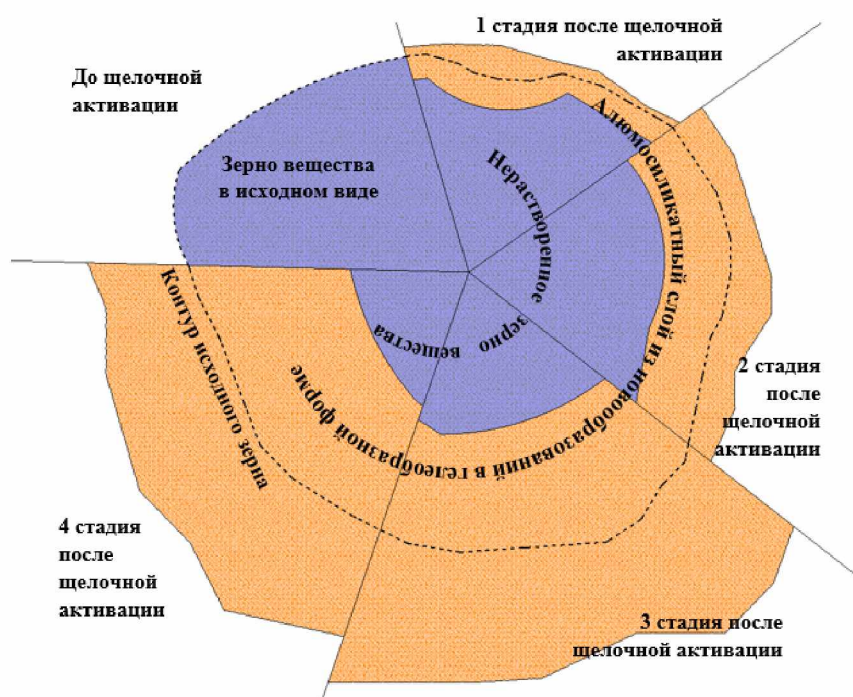


Рис. 7. Топологическая модель синтеза композиции «гелеобразный щелочной слой – непрореагировавшая часть алюмосиликатной добавки»

Полученные зависимости и закономерности позволяют утверждать, что реакционная способность минеральных алюмосиликатных порошков возрастает с увеличением теплового воздействия и активность цементного камня с использованием щелочной активации данных добавок также будет пропорционально расти, обратно пропорционально уменьшаться с повышением показателя кристалличности твердой фазы материала.

Проведенный термодинамический расчет реакционной способности минеральных порошков алюмосиликатной природы в щелочной среде подтверждает эффективность данной технологии. Полученные результаты позволят в дальнейшем развивать данное бесклинкерное направление, расширяя линейку вяжущих материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2014. №2. Pp. 16-27.
2. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. 2020. №1-2. С. 73-77. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77>
3. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. 2018. №2 (Т. 46). С. 65-70.
4. Murtazayev S-A.Yu., Salamanova M.Sh., Mintsayev M.Sh., Bisultanov R.G. Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 500-503.
5. Маракушев Л.А. Термодинамика метаморфической гидратации / Л.А. Маракушев. М.: Наука, 1968. 200 с.

6. Наумов Г.В., Рыженко В.Н., Ходаковский И.Л. Справочник термодинамических величин. М.: Атомиздат, 1971. 238 с.
7. Рахимбаев Ш.М., Рахимбаев И.Ш. О зависимости энтропии образования оксидов и гидроксидов металлов от состава // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. №3. С. 59-61.
8. Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D., Rangan B. On the development of fly ash-based geopolymer concrete // ACJ Materials Journal. 2004. Vol.101. Pp. 467-472.
9. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008. 592 pp.
10. Fadhil Nuruddin M., Demie S., Fareed Ahmed M., Nasir Shafiq Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. №75. Pp. 908-914.
11. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere // International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 216. Pp. 102-107.
12. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Pp. 2084-2090.
13. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Композиционные шлакощелочные вяжущие с инеральными добавками различного типа активности // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2013. №16. С. 204-216.
14. Murtazayev S-A.Yu., Salamanova M.Sh., Mintshev M.Sh., Bisultanov R.G. Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 500-503. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914231>
15. Bataev D.K-S., Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 457-460. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914222>

THERMODYNAMIC CALCULATION OF THE REACTIVITY OF MINERAL POWDERS IN AN ALKALINE ENVIRONMENT

© S.V. Fedosov^{1,3}, S-A. Yu. Murtazaev^{1,2}, M.Sh. Salamanova^{1,2}

¹GSTOU named after acad. M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia

²Kh. Ibragimov Complex Institute of the RAS, Grozny, Russia

³National Research MSCU, Moscow, Russia

The scientific community has long been setting ambitious goals to develop technologies that support carbon neutrality, because decarbonization and energy transition are vital in terms of social, environmental and economic effects. The paper presents a comparative analysis of the results of calculations of thermodynamic activity based on the dispersion of various minerals in a saturated alkaline medium. A thermodynamic calculation of the reactivity of mineral powders in an alkaline environment was carried out, confirming the effectiveness of this technology.

Keywords: thermodynamic calculation, industrial waste, alkaline activator, aspiration dust, liquid glass, reaction powder

REFERENCES

1. Lopez, F.J., Sugita S., Tagaya, M. and Kobayashi, T. (2014). 'Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation'. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, №2, pp. 16-27.
2. Murtazaev, S.-A.Yu., Salamanova, M.Sh. and Nahaev, M.R. (2020). 'Vozmozhnye puti al'ternativnogo resheniya problem v cementnoj industrii', *Constaruction materials*, №1-2, pp. 73-77, available at: DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77>
3. Murtazaev, S.-A.Yu. and Salamanova, M.Sh. (2018). 'Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature', *Volga Scientific Journal*, №2 (Vol. 46), pp. 65-70.
4. Murtazayev, S.-A.Yu., Salamanova, M.Sh., MintsaeV, M.Sh. and Bisultanov, R.G. (2019). 'Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging', *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST), Vol. 1, pp. 500-503.
5. Marakushev, L.A. (1968). *Thermodynamics of metamorphic hydration*. Nauka, Moscow, 200 p.
6. Naumov, G.V., Ryzhenko, V.N. and Khodakovskiy, I.L.(1971). *Directory of thermodynamic quantities*, Atomizdat, Moscow, 238 p.
7. Rakhimbaev, Sh.M. and Rakhimbaev, I.Sh. (2010). 'On the dependence of the entropy of formation of metal oxides and hydroxides on composition'. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, №3, pp. 59-61.
8. Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D. and Rangan, B. (2004). 'On the development of fly ash-based geopolymer concrete'. *ACJ Materials Journal*, vol. 10, pp. 467-472.
9. Davidovitz, J. (2008). *Geopolymer. Chemistry and applications*. Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 592 p.
10. Fadhil, Nuruddin, Fareed, Ahmed, Nasir, Shafiq (2011). *Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete*. World Academy of Science, Engineering and Technology, №75, pp. 908-914.
11. Alex, T.C., Nath, S.K., Kumar, S., Kalinkin, A.M., Gurevich, B.I., Kalinkina, E.V. and Tyukavkina, V.V. (2013). 'Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere'. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 216, pp. 102-107.
12. Villa, C., Pecina, E.T., Torres, R. and Gomez, L. (2010). 'Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite'. *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 2084-2090.
13. Rakhimova, N.R. and Rakhimov, R.Z. (2013). *Kompozicionnye shlakoshchelochnye vyazhushchie s mineral'nymi dobavkami razlichnogo tipa aktivnosti*, №16, pp. 204-216.
14. Murtazayev, S.-A. Yu., Salamanova, M.Sh., MintsaeV, M.Sh. and Bisultanov, R.G. (2019). 'Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging'. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST), vol.1. pp. 500-503, available at: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914231>
15. Bataev, D.K.-S., Murtazayev, S.-A. Yu., Salamanova, M.Sh. and Viskhanov, S.S.(2019). 'Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders'. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST), vol. 1, pp. 457-460, available at: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914222>

ВЕСТНИК ГГНТУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

2023. Том XX. № 4 (34)

Редактор – *Таймасханова З.Р.*
Корректор, дизайн и верстка – *Черная А.В.*

Выход в свет 25.12.2023
Формат 60×84/8. Печать офсетная
Усл. печ. л. 12,32. Тираж 350 экз. Заказ № 178

Свободная цена

Типография: ИПЦ ИП Цопанова А.Ю.
362002, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-79693 от 27 ноября 2020 г.

Журнал основан в 2001 г.