



ISSN 2587-9006 (Print)
ISSN 2949-3722 (Online)

Воронежский государственный
технический университет

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Химия, физика и механика
материалов

Выпуск № 2(45), 2025

ISSN 2587-9006 (Print)
ISSN 2949-3722 (Online)

***ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»***

**ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА
МАТЕРИАЛОВ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

- ХИМИЯ
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
- ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
- ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ
- МЕХАНИКА

Выпуск № 2(45), 2025

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Адрес учредителя и издателя: 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 - 77347 от 05.12.2019).

Главный редактор – д-р хим. наук, проф. О.Б. Рудаков

Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. В.Т. Перцев

Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. В.А. Небольсин

Ответственные секретари – канд. техн. наук, доц. О.Б. Кукина

канд. техн. наук, М.А. Шведова

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. О.В. Артамонова (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. Д.Е. Барабаш (г. Воронеж, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»); д-р техн. наук, проф. Л.И. Бельчинская (г. Воронеж, ВГЛТУ); д-р физ.-мат. наук, проф. П.А. Головинский (г. Воронеж, ВГТУ); д-р хим. наук, проф. А.Ю. Завражнов (г. Воронеж, ВГУ); д-р хим. наук, проф. А.Н. Зяблов (г. Воронеж, ВГУ); д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН В.М. Иевлев (г. Москва, МГУ); д-р хим. наук, проф. А.В. Калач (г. Воронеж, ВИ ФСИН); д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.Е. Калинин (г. Воронеж, ВГТУ); д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. Козлов (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук Д.Н. Коротких (г. Москва, МГСУ); д-р геогр. наук, проф. С.А. Куролап (г. Воронеж, ВГУ); д-р техн. наук, проф. С.И. Лазарев (Тамбов, ТГТУ); д-р техн. наук, проф. Л.В. Моргун (г. Ростов-на-Дону, ДГТУ); д-р техн. наук, проф. С.Л. Подвальный (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. К.К. Полянский (г. Воронеж, ВФ РЭУ им. Г.В. Плеханова); д-р техн. наук, проф. Ю.В. Пухаренко (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ); д-р хим. наук, проф. А.М. Самойлов (г. Воронеж, ВГУ); д-р хим. наук, проф. В.Н. Семенов (г. Воронеж, ВГУ); д-р физ.-мат. наук, проф. О.В. Стогней (г. Воронеж, ВГТУ); д-р техн. наук, проф. П.Т. Суханов (г. Воронеж, ВГУИТ); д-р техн. наук, проф. А.А. Трещев (г. Тула, ТулГУ); д-р техн. наук, проф. О.Л. Фиговский (Израиль, Глава Департамента по науке инновационного центра «Альянс народов мира», г. Хайфа); д-р техн. наук, доц. О.Н. Филимонова (г. Воронеж, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»); д-р биол. наук, проф. Н.Н. Харченко (г. Воронеж, ВГЛТУ); д-р хим. наук, проф. Н.В. Шелехова (г. Москва, ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»); д-р техн. наук, проф. У.М. Турдалиев (Республика Узбекистан, АндМИ).

В издании публикуются результаты научных исследований и производственного опыта сотрудников ВГТУ и других образовательных, научных, научно-производственных организаций по проблемам химии, физики и механики строительных и технических материалов; химической технологии и физико-химических методов диагностики, контроля качества и безопасности материалов, применяющихся в строительстве и технике; по техносферной безопасности.

Издание рекомендуется специалистам по промышленному и гражданскому строительству, материаловедцам, технологам, инженерам, научным сотрудникам, преподавателям, аспирантам и студентам архитектурно-строительных и технических учебных заведений.

Перепечатка материалов журнала допускается только с разрешения редакции.

Дизайн обложки Н.И. Мироненко

АДРЕС РЕДАКЦИИ

394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, ком. 6420

тел.: +7(473)2717617, +7(910)3452888

E-mail: chemistry.kaf@cchgeu.ru, lgkkn@rambler.ru, marishwedowa@mail.ru

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ

- Бессонова А.М., Водолазская Т.К., Слепцова О.В.* Исследование адсорбционной и мицеллообразующей способности ПАВ..... 4

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Рахимов Р.З.* Материаловедение, математика и физика в XIX веке..... 13
- Небольсин В.А., Корчагин В.В., Мальцев В.В.* Электрические свойства нитевидных нанокристаллов кремния, выращенных в открытой хлоридно-водородной системе..... 33
- Ерёмин А.В., Кукина О.Б., Волокитин В.П., Корнилов Е.В., Оськин Д.М.* Применение самовосстанавливающегося асфальта на дорогах общего пользования..... 51
- Жуковская В.Н., Мелехова Е.И., Левченко А.В.* Геополимерный бетон..... 56
- Ерёмин А.В., Кукина О.Б., Волокитина О.А., Корнилов Е.В., Оськин Д.М.* Обработка покрытия и основания из каменных материалов составом на основе диоксида кремния с целью увеличения физико-механических свойств..... 68

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Макушина Ю.В., Белькова Н.А., Полегенько П.В.* Разработка составов модифицированного добавками тяжелого бетона для монолитного строительства..... 73

ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ

- Шелехова Н.В., Рудаков О.Б., Артыщенко С.В.* Метод капиллярного электрофореза для мониторинга ионного состава воды в процессе водоподготовки..... 85
- Белькова Н.А., Ищенко Д.В., Хасанов В.В.* Оценка качества при производстве железобетонных конструкций..... 101

МЕХАНИКА

- Хошимова Ф.Ф., Панфилов Д.В., Поликутин А.Э., Назаренко Н.Г., Перекальский О.Е.* Теоретическое исследование работоспособности дерево-каутоновых армированных балок при статических нагрузках..... 112

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

- Отченашенко А.И., Корнеева В.В., Чернышев И.С., Алексеенко У.В.* Искусственный интеллект в исследовании структуры материалов: от микро- до наноуровня..... 127
- Коновалова В.С., Ваганов Н.А.* Возможность применения простейших нейросетей для подбора средств и методов защиты железобетона от коррозионных воздействий..... 140

ХРОНИКА, БИБЛИОГРАФИЯ

- Селеменев В.Ф., Рудаков О.Б., Буряк А.К.* 25-летие журнала «Сорбционные и хроматографические процессы»..... 166
- Шведова М.А., Небольсин В.А., Рудаков О.Б., Кукина О.Б.* К юбилею Ольги Владимировны Артамоновой..... 171

УДК 544.722.2: 544.77051.62

**ИССЛЕДОВАНИЕ АДсорбЦИОННОЙ И МИЦЕЛЛООБРАЗУЮЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ ПАВ**

*А.М. Бессонова, Т.К. Водолазская, О.В. Слепцова**

*Воронежский государственный университет,
Российская Федерация, 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1*

**Адрес для переписки: Слепцова Ольга Валентиновна, e-mail: slepts@gmail.com*

Проведено сравнительное исследование поверхностной активности и мицеллообразующей способности анионоактивных ПАВ – лаурилсульфата натрия и оксиэтилированного лауретсульфата натрия. Обнаружено, что наличие оксиэтиленовых групп в углеводородных радикалах ПАВ приводит к возрастанию их адсорбционной способности и поверхностной активности. Выяснено влияние оксиэтиленовых групп в составе молекул ПАВ на их мицеллообразующую способность. Оксиэтилирование ПАВ практически не изменяет критическую концентрацию мицеллообразования и свободную энергию Гиббса солюбилизации, но приводит к возрастанию солюбилизационной емкости вследствие увеличения длины углеводородных радикалов и размера мицелл.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, адсорбция, поверхностная активность, мицеллообразование, солюбилизация.

STUDY OF ADSORPTION AND MICELLE-FORMING CAPACITY OF SURFACTANTS

*A.M. Bessonova, T.K. Vodolazskaya, O.V. Sleptsova**

*Voronezh State University,
Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation*

**Corresponding author: Olga V. Sleptsova, e-mail: slepts@gmail.com*

A comparative study of the surface activity and micelle-forming capacity of anion-active surfactants, sodium lauryl sulfate and oxyethylated sodium laureth sulfate, was conducted. It was found that the presence of oxyethylene groups in hydrocarbon radicals of surfactants leads to an increase in their adsorption capacity and surface activity. The effect of oxyethylene groups in surfactant molecules on their micelle-forming capacity was determined. Oxyethylation of surfactants practically does not change the critical micelle concentration and the Gibbs free energy of solubilization, but leads to an increase in the solubilization capacity due to an increase in the length of hydrocarbon radicals and the size of micelles.

Key words: surfactants, adsorption, surface activity, micellization, solubilization.

Введение

В современном строительстве широко применяют поверхностно-активные добавки, вводимые в состав бетона для улучшения его структурно-механических свойств. Поверхностно-активные вещества (ПАВ), вводимые в небольших количествах, значительно улучшают технологические свойства бетонной смеси и строительно-технические свойства бетонов, оказывают положительное влияние на формирование структуры цементного камня, способствуют повышению морозостойкости, водонепроницаемости и других свойств бетонов [1, 2]. Известно использование ПАВ в дорожном строительстве для получения асфальтобетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками [4 – 8].

В настоящее время большой популярностью пользуются композиционные поверхностно-активные вещества. Однако при создании композиций ПАВ необходимо принимать во внимание индивидуальные физико-химические свойства компонентов. Учитывая возрастающий интерес к оксиэтилированным ПАВ, содержащим гидрофильные оксиэтиленовые фрагменты, целью данной работы послужило сравнительное исследование поверхностной активности и мицеллообразующей способности индивидуальных ПАВ лаурилсульфата натрия $C_{12}H_{25}OSO_3Na$ (Sodium Lauryl Sulfate, SLS) и оксиэтилированного лау-

рилсульфата натрия – лауретсульфата натрия $C_{12}H_{25}(CH_2-CH_2-O)_2OSO_3Na$ (Sodium Laureth Sulfate, SLES). Оба ПАВ относятся к классу анионоактивных мицеллообразующих или коллоидных ПАВ. Исследование процессов самоорганизации в растворах коллоидных ПАВ, которые обладают не только адсорбционной, но и мицеллообразующей способностью представляет несомненный интерес. Уникальные свойства дифильных молекул ПАВ приводят к формированию не только организованных слоев на межфазных границах, но и ассоциатов молекул различной формы в объеме растворов – мицелл. Критической концентрацией мицеллообразования (*ККМ*) является та концентрация ПАВ, при которой в его растворе возникает большое число ассоциатов, находящихся в термодинамическом равновесии с молекулами или ионами в поверхностных адсорбционных слоях и в истинно растворенном состоянии. Таким образом, самоорганизация молекул или ионов ПАВ на границах раздела фаз и в объеме раствора взаимосвязаны, поэтому *ККМ* можно определить, исследуя как поверхностные (связанные с адсорбционной способностью), так и объемные (связанные с мицеллообразованием) свойства ПАВ.

Экспериментальная часть

Поверхностные свойства ПАВ исследовали сталагмометрическим методом и методом отрыва кольца, измеряя поверхностное натяжение σ водных растворов ПАВ [9].

Для каждого ПАВ были рассчитаны поверхностная активность g и адсорбционный потенциал W [9].

Поверхностная активность g отражает способность ПАВ снижать поверхностное натяжение в результате адсорбции на границе раздела фаз:

$$g = \lim_{c \rightarrow 0} \left(- \frac{d\sigma}{dc} \right),$$

где c – концентрация раствора ПАВ.

Адсорбционный потенциал W рассчитывали по уравнению:

$$W = RT \ln \frac{g}{RT \delta},$$

где δ – толщина адсорбционного монослоя [10].

Одно из основных свойств мицелл ПАВ – способность самопроизвольно солюбилизировать малорастворимые в воде органические вещества. В работе была изучена солюбилизация толуола анионоактивными ПАВ SLS и SLES рефрактометрическим методом.

По данным рефрактометрических исследований солюбилизации толуола были определены солюбилизационная емкость мицелл ПАВ и свободная энергия Гиббса солюбилизации ΔG_{sol}^0 [11].

Результаты и их обсуждение

Для оценки поверхностной активности ПАВ были получены изотермы поверхностного натяжения $\sigma = f_T(c)$ (рис. 1). На кривых наблюдается резкий излом, отвечающий образованию сферических мицелл – *ККМ*.

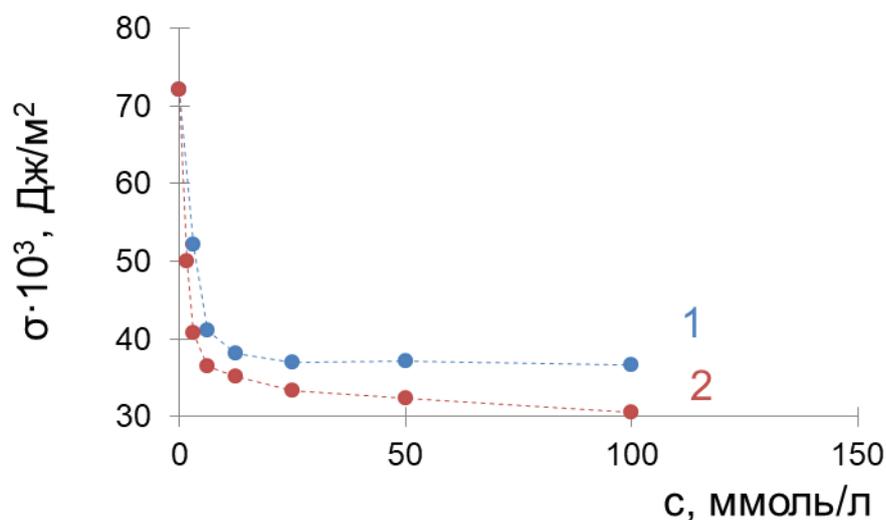


Рис. 1. Изотермы поверхностного натяжения растворов SLS (1) и SLES (2) ($T = 293$ K).

В области концентраций ниже *ККМ* мицеллы отсутствуют, а по достижении *ККМ* их концентрация резко увеличивается. В рамках фазового подхода критическая концентрация мицеллообразования соответствует некоторому предельному значению молекулярной растворимости ПАВ в воде; при этом счита-

ется, что в области концентраций выше KKM увеличение концентрации ПАВ приводит к росту концентрации ассоциированного вещества.

Для каждого ПАВ была определена критическая концентрация мицеллообразования KKM , и рассчитаны поверхностная активность g и адсорбционный потенциал W (табл. 1).

Таблица 1

Физико-химические характеристики растворов ПАВ

ПАВ	Поверхностная активность g , Дж·м/моль	Адсорбционный потенциал W , кДж/моль	Критическая концентрация мицеллообразования KKM , ммоль/л	Солюбилизационная емкость CE , моль/моль ПАВ	Свободная энергия Гиббса солюбилизации ΔG_{sol}^0 , кДж/моль
SDS	$7.02 \cdot 10^{-3}$	20.6	8.38	2.058	- 30.23
SLES	$12.03 \cdot 10^{-3}$	22.0	8.35	2.267	- 30.33

Поверхностная активность, отражающая способность снижать поверхностное натяжение в результате адсорбции на границе раздела фаз исследованных SLS и оксиэтилированного SLES, несколько отличается. Лауретсульфат натрия (SLES) благодаря наличию гидрофильных оксиэтиленовых групп в углеводородном радикале обладает большей поверхностной активностью, чем SLS, и, как следствие, более высоким адсорбционным потенциалом (табл. 1). При этом наличие оксиэтиленовых групп практически не влияет на концентрацию мицеллообразования (KKM). Очевидно, в данном случае определяющее влияние имеет природа функциональных групп ПАВ ($-\text{OSO}_3\text{Na}$).

Одно из основных свойств мицелл ПАВ – способность самопроизвольно солюбилизовать малорастворимые в воде органические вещества (липофильные). В работе была изучена солюбилизация толуола (метилбензола, PhMe) мицеллярными растворами анионоактивных ПАВ SDS и SLES рефрактометрическим методом [11]. Изотермы солюбилизации лиофобного солюбилизата (толуола) исследуемыми ПАВ приведены на рисеугт 2. С увеличением концентрации ПАВ в растворе солюбилизация S_{PhMe} закономерно увеличивается для обоих ПАВ.

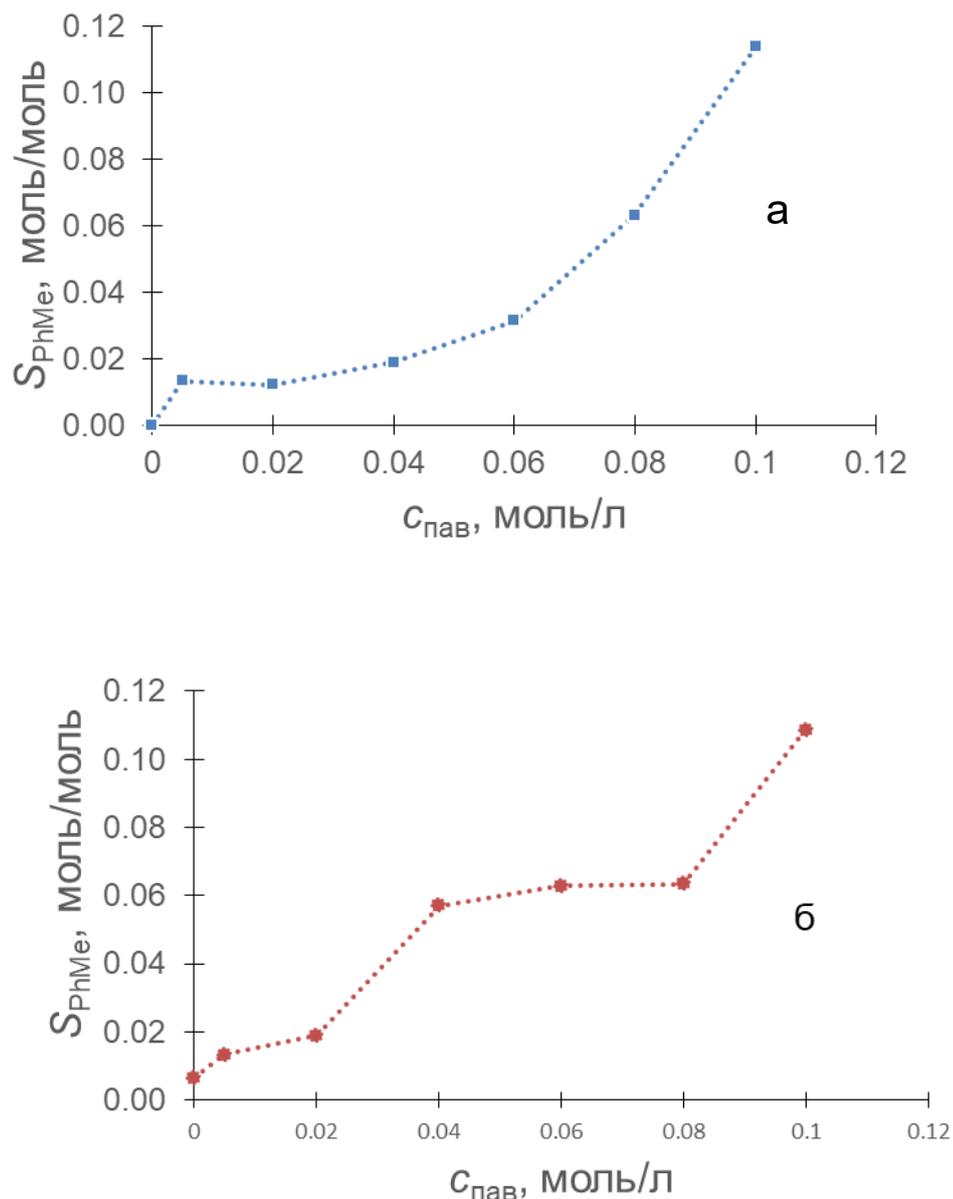


Рис. 2. Изотермы солюбилизации для водных растворов SLS(а) и SLES (б) ($T = 293$ K).

По данным рефрактометрических исследований солюбилизации толуола были определены солюбилизационная емкость мицелл ПАВ CE и свободная энергия Гиббса солюбилизации ΔG_{sol}^0 (табл. 1). С появлением оксиэтиленовых групп в молекулах SLES увеличивается размер сферическим мицелл, и, соответственно, возрастает солюбилизационная емкость мицеллярных растворов. Свободная энергия Гиббса солюбилизации практически не изменяется, так как

определяется в первую величину критической концентрации мицеллообразования.

Заключение

Исследование поверхностной активности и мицеллообразующей способности лаурилсульфата натрия и оксиэтилированного лауретсульфата натрия, показало, что наличие оксиэтиленовых групп в углеводородных радикалах ПАВ приводит к возрастанию их адсорбционной способности, зависящей от длины углеводородного радикала молекул ПАВ. Влияние оксиэтиленовых групп в составе анионоактивных ПАВ на мицеллообразующую способность не столь однозначное. С одной стороны, остается неизменной критическая концентрация мицеллообразования и свободная энергия Гиббса сольubilизации, с другой стороны, введение оксиэтиленовых групп приводит к возрастанию сольubilизационной емкости вследствие увеличения размера мицелл.

Список литературы

1. Шमितько Е.И., Белькова Н.А., Макушина Ю.В. Влияние поверхностно-активных веществ на влажностную усадку бетонов // Строительные материалы. 2018. № 4. С. 48-51.
2. Василик П.Г., Бурьянов А.Ф., Самченко С.В. Сравнение адсорбционного поведения пластификаторов разных типов // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29, № 3. С. 261-273.
3. Абдуллаев А.М., Муртазаев С.-А.Ю. Повышение удельной поверхности цементов диспергирующим действием высокоэффективных ПАВ // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 1. С. 40-45.
4. Кучма М.И. Поверхностно-активные вещества в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1982. 191 с.

5. Галдина В.Д., Е.В Гурова. Физико-химические процессы в технологии дорожно-строительных материалов: учебное пособие // Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. 183 с.
6. Исследование составов дорожных поверхностно-активных веществ / Д.А. Аюпов [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 3(45). С. 178-188.
7. Суфиянов Р.Ш. К вопросу о применении стабилизаторов грунтов при строительстве автомобильных дорог (обзор) // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24, № 6. С. 41-48.
8. Оценка и подбор качественных эксплуатационных составов модифицированных песчаных и щебеночных асфальтобетонов / В.Т. Ерофеев [и др.] // Русский инженер. 2022. № 4 (77). С. 31-38.
9. Вережников В.Н., Гермашева И.Н., Крысин М.Ю. Коллоидная химия поверхностно-активных веществ: учебное пособие. СПб.: Лань, 2015. 304 с.
10. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Ленинград: Химия, 1981. с. 93.
11. Практикум по коллоидной химии / Под ред. В.Г. Куличихина. М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2012. 288 с.

References

1. Shmitko E.I., Belkova N.A., Makushina Yu.V. The effect of surfactants on the moisture shrinkage of concrete // Building Materials. 2018. No. 4. pp. 48-51.
2. Vasilik P.G., Buryanov A.F., Samchenko S.V. Comparison of the adsorption behavior of plasticizers of different types // Silicate engineering and technology. 2022. Vol. 29, No. 3. pp. 261-273.
3. Abdullaev A.M., Murtazaev S.-A.Y. Increasing the specific surface area of cements by the dispersing action of highly effective surfactants // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2016. No. 1. pp. 40-45.
4. Kuchma M.I. Surfactants in road construction. Moscow: Transport, 1982. 191 p.

5. Galdina V.D., E.V. Gurova. Physico-chemical processes in the technology of road construction materials: a textbook // Omsk: Siberian State Automobile and Road University (SibADI), 2021. 183 p.

6. Investigation of compositions of road surfactants / D.A. Ayupov [et al.] // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2018. No. 3(45). pp. 178-188.

7. Sufianov R.S. On the issue of the use of soil stabilizers in the construction of highways (review) // Bulletin of the Technological University. 2021. Vol. 24, No. 6. pp. 41-48.

8. Evaluation and selection of high-quality operational compositions of modified sand and crushed asphalt concrete / V.T. Yerofeev [et al.] // Russian Engineer. 2022. No. 4 (77). pp. 31-38.

9. Verezhnikov V.N., Germasheva I.N., Krysin M.Yu. Colloidal chemistry of surfactants: a textbook. St. Petersburg: Lan Publ., 2015. 304 p.

10. Abramzon A.A. Surfactants. Leningrad: Khimiya Publ., 1981. p. 93.

11. Workshop on colloidal chemistry / Edited by V.G. Kulichikhin. Moscow: University textbook: INFRA-M, 2012. 288 p.

Бессонова Анна Михайловна – студент 4 курса химического факультета ВГУ, обучающийся по направлению 04.03.01. Химия

Водолазская Татьяна Константиновна – студент 5 курса химического факультета ВГУ, обучающийся по специальности 04.05.01. Фундаментальная и прикладная химия

Слепцова Ольга Валентиновна – канд. хим. наук, доцент кафедры высокомолекулярных соединений и коллоидной химии, ВГУ

УДК 691

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МАТЕМАТИКА И ФИЗИКА В XIX ВЕКЕ

Р.З. Рахимов

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
Российская Федерация, 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1*

Адрес для переписки: Рахимов Равиль Зуфарович, e-mail: rahimova.07@list.ru

В статье представлены сведения о развитии материаловедения, математики физики и механики в 19-ом веке. В этот период были созданы или продолжили развитие различные научные школы, в том числе металловедение, древесиноведение, научных основ минеральных и органических материалов. В развитии материаловедения оказали естественное влияние и развитие фундаментальных наук, в частности, математики и физики.

Рассмотрены отдельные элементы развития в 19-ом веке:

- математики в части: создания теории чисел, теории вероятностей, теории аналитических функций комплексного переменного, теории бесконечности и множества и др.; разработки неевклидовой геометрии, основ высшей алгебры; изобретения первой в истории вычислительной машины и т.д.;

- физики: открыты законы – парциальных давлений, кратных отношений, броуновского движения, пространственных решеток, радиоактивности; введено понятие «атомный вес» и рассчитаны атомные веса ряда элементов; разработаны теории теплопроводности, упругости, термодинамики и др.

- механики: разработаны – основы математической теории упругости, понятий – напряжений, деформации, удара, усталости, ползучести; теоретические основы расчета железобетона и т.д.

Ключевые слова: физика, механика, математика, материалы, материаловедение.

**MATERIALS SCIENCE, MATHEMATICS AND PHYSICS
IN THE XIXth CENTURY**

R.Z. Rakhimov

*Kazan State University of Architecture and Engineering, ul. Zelenaya, 1, 420043,
Russian Federation*

Corresponding author: Ravil Z. Rakhimov, e-mail: rahimova.07@list.ru

The article presents information about the development of materials science, mathematics physics and mechanics in the 19th century. During this period various scientific schools were created or continued to develop, including metallurgy, wood science, and the scientific foundations of mineral and organic materials. The development of materials science was also naturally influenced by the progress in basic sciences, particularly mathematics and physics.

Specific elements of development in the 19th century are considered:

- Mathematics: The creation of number theory, probability theory, the theory of analytic functions of a complex variable, infinity and set theory, etc.; the development of non-Euclidean geometry, the foundations of higher algebra; the invention of the first computing machine in history, etc.;

- Physics: Laws of partial pressures, multiples, Brownian motion, spatial lattices, and radioactivity were discovered; the concept of ‘atomic weight’ was introduced and atomic weights of a number of elements were calculated; theories of heat conduction, elasticity, thermodynamics, etc. were developed.

- Mechanics: The foundations of the mathematical theory of elasticity, the concepts of stress, deformation, impact, fatigue, creep, and the theoretical basis for the calculation of reinforced concrete, etc. were developed.

Keywords: physics, mechanics, mathematics, materials, materials science.

«Прежде чем обратить взор в будущее, надо как следует изучить прошлое»

Конфуций – мыслитель и философ Древнего Китая 1-го века до н.э.

Введение

Начавшиеся в конце 18-го века в 19-ом веке получили продолжение и развитие промышленная революция и многие области знания обеспечили невиданные достижения в развитии техники, технологий, экономики и науки. В течение 19-го века были созданы или продолжили развитие различные научные

школы, в том числе и материаловедения: металловедения, древесиноведение. Получили развитие разработки и научных основ минеральных и органических материалов. При этом постепенно выяснилось, что многие области знания пересекаются и значительно расширяют сферу познания. В развитии материаловедения определенный вклад вложили отраслевые, прикладные и фундаментальные науки, в частности – математика и физика, развитие которых в 19-ом веке рассматривается ниже.

Математика в 19-ом веке

В начале 19-го века в области математики продолжены исследования и разработки в развитие: вариационного исчисления и математического анализа (Ж.Л. Лагранж); теории вероятности и дифференциальных уравнений (П.С. Лаплас); метода разложения любой периодической функции на сумму определенных элементарных функций (Ж.Б.Ж. Фурье); принципов непрерывности и теории полярных плоскостей (Г. Монж). Публикуется: теорема о числе корней алгебраического уравнения, лежащих между данными границами; работа «Аналитическая теорема тепла», которая явилась отправным пунктом создания теории тригонометрических рядов и разработки некоторых общих проблем математического анализа (Ж.Б.Ж. Фурье).

В 1808-ом году опубликована работа о колебаниях тонких пластинок (С. Жермен).

В первой половине 19-го века опубликовано сочинение по теории чисел и высшей алгебре «Арифметические исследования», в котором приведены: теория квадратичных вычетов, теория уравнения деления круга, приведено построение правильного семнадцатиугольника при помощи циркуля и линейки; открыт и разработан основной математический метод обработки неравноценных наблюдаемых данных – метод наименьших квадратов. В 1827-ом году опубликовано сочинение «Общие изыскания о кривых поверхностях», в котором делается заключение о том, что при изучении поверхности как бесконечно тонкой гибкой пленки основное значение имеет не уравнение поверхности в декартовых координатах, а диф-

ференциальная квадратичная форма, через которую выражается квадрат элемента длины и инвариантами которой являются все собственные свойства поверхности – прежде всего ее кривизна в каждой точке (К.Ф. Гаус).

Выполнены работы по интегральному исчислению, исчислению конечных разностей теории дифференциальных уравнений с частными производными, теории вероятностей, где доказаны частный случай закона больших чисел: и одна из предельных теорем: . Разработаны теорема теории вероятностей, описывающая поведение частоты появления некоторого события в последовательности независимых испытаний частный случай закона больших чисел; предельная теорема теории вероятностей, позволяющая приближенно оценивать вероятность данного числа появлений маловероятного события при большом числе независимых испытаний, 1837 г. (С.Д. Пуассон) В первой половине 19-го века развиты основы теории аналитических функций комплексного переменного, сформулированы основные теории существования решений и метод интегрирования уравнений с частными производными первого порядка. Опубликованы работы: «Курс анализа» 1821 г.; «Резюме лекций по исчислению бесконечно малых», 1823 г.; «Лекции по приложениям анализа к геометрии». В них даны определения: понятие непрерывности функции, интеграла как предела сумм, выражения: аналитической функции в виде интеграла, разложение функции в степенной ряд; четкое построение теории исходящих рядов; теория вычетов (О.Л. Коши).

В 1829-ом – 1830-ом годах был опубликован труд «О началах геометрии» который стал первой в мировой литературе серьезной публикацией по неевклидовой геометрии (геометрии Лобачевского), основы которой открыли путь геометрии разных пространств, ведущих в четырехмерный мир теории относительности, в океан непостижимых далей и глубин, на берега которых вышло человечество. В этом труде детально разработаны тригонометрия неевклидова пространства, дифференциальная геометрия (включая вычисления длин, площадей и объемов) и смежные аналитические вопросы. В качестве альтернативы аксиоме направленности Евклида предложена другая аксиома: на плоскости через точку, лежащую на данной прямой, проходит более чем одна прямая, не пересекающую данную (Н.И.

Лобачевский). Одним из первооткрывателей неевклидовой геометрии Лобачевского в первой половине 19-го века стал Янош Бойяи.

В середине 19-го века изобретена первая в истории аналитическая вычислительная машина (Ч. Бибидж).

В это же время на основе вариационного исчисления и принципе наименьшего действия было сформулировано положение: в любом: природном: явлении количество действия стремится к минимальному. Открыты и исследованы кватернионы, побочным результатом этих исследований стало создание векторного анализа и введение в науку понятия векторного поля. Введено понятие географа, который применяется для описания траектории точки, движущейся в пространстве; этот метод применим: для: описания и прямолинейного и криволинейного движения (У.Р. Гамильтон).

В этот же период времени в математическую физику было введено понятие условной сходимости рядов и дан признак сходимости. В теории чисел доказана теорема о прогрессии. Внесен вклад в математический анализ, теорию функций и теорию чисел. В теории чисел доказана теорема о прогрессии. Доказана разложимость в ряд Фурье всякой монотонной кусочно-непрерывной функции. Сформулирован комбинационный принцип метод решения краевых задач для эллиптических уравнений с частными производными – принцип Дирихле (И.П.Г.Л. Дирихле).

В начале 19-го века были заложены основы современной высшей алгебры, сформулированы такие фундаментальные понятия, как группа, симметричные группы, поле. Конечные поля носят название их: автора. Положено начало теории абстрактных алгебраических структур (Э. Галуа).

Во второй половине 19-го века: создана теория аналитических функций, в основу которой положены степенные ряды, разработана система логического обоснования математического анализа на основе построенной теории действительных чисел; введено понятие сходимости: функционального ряда. Разработаны полная теория сходимости, теорема о аналитичности суммы равномерно сходящегося ряда аналитических функций, теория делимости степенных рядов,

теория минимальных поверхностей, теория элементарных делителей в линейной алгебре, основы теории целых функций и функций нескольких комплексных переменных (К.Т.В. Вейерштрассе – «отец современного анализа»).

В середине 19-го века определено общее понятие n -мерного многообразия и его метрику в виде произвольной положительно определенной квадратичной формы (риманова метрика). Обобщена гауссова теория поверхностей на многомерный случай с введением при этом тензора кривизны и других понятий римановой геометрии. Выдвинуто предположение, что геометрия в микромире может отличаться от трехмерной евклидовой. В 1868-ом году издается труд «О гипотезах, лежащих в основах геометрии», в которой выдвигается теория многомерных пространств. Разработана эллиптическая геометрия, создано геометрическое направление аналитических функций. Разработаны: теория конформных отображений; геометрическая теория, основанная на аксиомах, требования которых отличны от аксиом евклидовой геометрии. Введены: так называемые римановы поверхности, важные при исследованиях многозначных функций (Г.Ф.Б. Риман).

Во второй половине 19-го века обоснована общепринятая точка зрения на понятие случайной величины как одно из основных понятий теории вероятностей. Выведена формула для определения с большой точностью количественных чисел, заключенных между единицей и любым: числом x . Построена общая теория ортогональных многочленов, теория равномерных приближений, разработан ряд важных концепций механизмов. Основана математическая теория механизмов. Получена общая формулировка закона больших чисел: если математические ожидания серии n случайных величин и квадраты этих математических ожиданий ограничены в совокупности, то среднее арифметическое этих величин с ростом n сходится к среднему арифметическому для их математических ожиданий (П.Л. Чебышев).

В это же время было показано, как свести общее алгебраическое уравнение пятой степени к виду, разрешимому в эллиптических модулярных функциях. Создана теория инвариантов, доказана трансцендентность числа e (Ш. Эрмит).

В 1863-ем году открыт класс бирациональных преобразований (кремоновы), выполнены значительные работы в области начертательной и алгебраической геометрии (Л. Кремона).

В 1888-ом году введен термин «интегральные уравнения» и представление об интеграле как процессе вычисления площади ограниченной кривой (П. де Буа Раймон).

В конце 19-го века изданы математическая теория бесконечности и теория множеств, ставшая основой всей математики. Введены понятия кардинальных и порядковых чисел, разработана теория о трансфинитных числах (Г.Ф.Л.Ф. Кантор).

В 1872-ом году выдвинуты идеи в работе «Сравнительное рассмотрение новых геометрических исследований», получившей название «Эрлангенская программа», и которая давала новое представление о геометрии и намечала ясную перспективу дальнейших исследований. В начале четвертой четверти 19-го века было представлено первое доказательство непротиворечивости геометрии Лобачевского, опубликованы работы о решении уравнений пятой, шестой и седьмой степеней, о интегрировании дифференциальных уравнений, о абелевых функциях. В 1882-ом году приведен пример односторонней поверхности – «бутылки Клейна» (Ф. Клейн).

Во второй половине 19-го века создана теория нового класса функций (фуксовы) – автоморфные, доказаны теорема сложения и теорема возможности униформизации алгебраических кривых (то есть представления их через автоморфные функции, это двадцатая вторая проблема Гильберта, решенная: Пуанкаре в 1907-ом году). Эти открытия стали вершиной всего развития теории аналитических функций комплексного переменного в 19-ом веке. Автоморфные функции позволяют решить любое линейное дифференциальное уравнение с алгебраическими коэффициентами. Построен новый раздел математики – «качественная теория дифференциальных уравнений». Введены понятия предельного цикла и индекса цикла. Разработана общая теория интегральных инвариантов и решения уравнений в вариациях. Для уравнений в конечных разностях

создано новое направление – асимптотический анализ решений. Основана теория вычетов для многомерного случая. Разработана теорема о разложении интегралов по малому параметру. Созданы математические основы теории относительности (Анри Пуанкаре).

В это же время в теории вероятностей доказана предельная теорема, устанавливающая некоторые весьма общие достаточные условия для сходимости распределения сумм независимых случайных величин к нормальному закону (А.М. Ляпунов).

В 1888-ом году решена «проблема Гордана», часто называемая «основной теоремой теории инвариантов», и доказано существование базиса для любой системы инвариантов.

В конце 19-го века:

- российский математик Л.К. Лахтин публикует свои работы «Некоторые упрощения в решении неопределенных уравнений второй степени с двумя неизвестными» (1890 г.), «Алгебраические уравнения, разрешимые в гипергеометрических функциях» (1892 – 1893 гг.);

- английский основатель дифференциальной психологии, психометрики, статистик Ф. Гальтон в 1888-ом году опубликовал основополагающую работу о корреляции – изучения взаимосвязи между двумя различными величинами;

- немецкий математик Г. Минковский разработал геометрическую теорию чисел и геометрическую четырехмерную модель теории относительности;

- английский математик, статистик, биолог и философ, основатель математической статистики К. Пирсон, автор более 650 опубликованных научных работ, из которых более 400 работ по математической статистике, разработал теорию корреляции, критерий согласия, алгоритмы принятия решений и оценки параметров;

- немецкий математик-универсал Д. Гильберт разработал теорию инвариантов (1885 – 1893), теорию алгебраических чисел (1893 – 1898), в 1897-ом году опубликовал монографию «Отчет о числах», а в 1899-ом году труд «Основания геометрии».

Физика в 19-ом веке

В 1801-ом году английский физик и химик Д. Дальтон открыл закон парциальных давлений, названный его именем; в 1802-ом году открыл закон равномерного расширения газов при нагревании, в 1803-ем году установил закон кратных отношений, ввел понятие «атомный вес», первым рассчитал атомные веса ряда элементов.

В 1812-ом году французский математик и физик Ж. Фурье представил разработку аналитической теории теплопроводности, а в 1822-ом году опубликовал труд «Аналитическая теория тепла».

В 1821-ом – 1823-ем годах французский физик, математик и механик С.Д. Пуассон опубликовал в 1829-ом году работы по теории упругости и гидромеханике, ввел Пуассона коэффициент и обобщил уравнения теории упругости на анизотропные тела.

В 1827-ом году было открыто броуновское движение – экспериментальное подтверждение существования атомов (Роберт Броун).

В 1-ой четверти 19-го века был заложен фундамент физики твердого тела – разработаны: общая теория упругих свойств твердых тел (Навье); закон сохранения энергии, связывающего все явления природы воедино; закон теории теплоты – 2-е начало термодинамики; молекулярно-кинетическая теория, классическая статистическая механика (Д.У. Гиббс).

В 1831-ом году английский физик-экспериментатор и химик М. Фарадей ввел в научный оборот термины: ион, катод, анод, электролит, диэлектрик, парамагнетизм; понятие физического поля – непрерывной области пространства, сплошь заполненной силовыми линиями и взаимодействующей с веществом.

Немецким математиком, физиком и астрономом Ф. Гауссом в 1832-ом году создана абсолютная система мер, с введением трех основных единиц: длины – 1 мм, единица времени – 1с, единица массы – 1 мг. Эта система стала прообразом системы единиц СГС.

С 1834-го года французский физик и инженер Э. Клапейрон опубликовал работы по термодинамике: «О внутреннем равновесии твердых частиц», «Об

устойчивости арок», «О механической теории теплоты»; впервые ввел в термодинамику графический метод – индикаторные диаграммы, в частности, система координат $p - V$; вывел уравнение идеального газа, объединяющее законы: Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Авогадро.

В 1837-ом году немецкий физик В.Э. Вебер теоретически вывел закон взаимодействия движущихся зарядов и формул, в которой учитываются не только знаки, но и величина этих зарядов и относительная скорость их перемещения; разработал гипотезу о дискретности электрического заряда; установил абсолютную систему электрических измерений.

В 1847-ом году британский физик, математик и механик Д.К. Максвелл вывел новые закономерности теории упругости, сделал вклад в развитие метода фотоупругости. Во второй половине 19-го века им развита кинетическая теория газов с представлением о газе как об ансамбле множества идеальных шариков, хаотически движущимся в замкнутом пространстве.

В первой половине 19-го века итальянский физик и химик Авогадро Амедео выдвинул гипотезу, согласно которой молекулы простых газов состоят из одного или нескольких атомов. На ее основе он дал формулировку одного из основных законов идеальных газов, согласно которому в равных объемах различных газов при определенных температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул (закон Авогадро). Число молекул в одном моле любого вещества или число атомов в грамм-атоме любого химически простого вещества названо числом Авогадро, он дал способ определения атомных и молекулярных масс.

В 1850-ом году немецкий физик, механик и математик Р. Клаузиус в работе «Теплота сама собой не может перейти от тела холодного к телу горячему» дал первую формулировку второго начала термодинамики. До конца 19-го века им выполнено: введено понятие идеального газа, введено понятие свободного пробега молекул и впервые вычислена эта длина, доказана теорема вириала, связывающая кинетическую энергию системы частиц с действующими в ней силами; построена кинетическая теория перехода вещества из одного агрегат-

ного состояния в другое; обосновано уравнение, связывающее изменение температуры плавления с изменением давления (уравнение Клапейрона-Клаузиуса).

В 1869-ом году голландский физик, Нобелевский лауреат Ван дер Ваальс открыл силы взаимодействия между молекулами (силы Ван дер Ваальса), в 1873-ем году он развил модель, единообразно описывающую газообразную и жидкую фазы вещества, на основе которой вывел уравнение состояния.

В это же время американский физик, физико-химик, математик и механик Д.У. Гиббс разработал энтропийные диаграммы, играющие большую роль в технической термодинамике; показал, что трехмерные диаграммы позволяют представить все термодинамические свойства вещества; опубликовал фундаментальную статью «О равновесии в гетерогенных системах», которая стала одной из наиболее значимых в научной деятельности 19-го века; разработал общую теорию термодинамических потенциалов; построил общую теорию поверхностных явлений; сформулировал правило фаз и получил уравнение, устанавливающее связь между внутренней энергией термодинамической системы и термодинамическими потенциалами.

В 1874-ом году британский физик и математик Д. Стони выявил существование элементарного электрического заряда, а в 1881-ом году вычислил его величину; в 1881-ом году для обозначения этого элементарного заряда ввел термин «электрон» определив его как «фундаментальную единицу измерения электроэнергии».

В 1875-ом году российский ученый Е.С. Федоров создал теорию пространственных групп, определивший законы пространственной симметрии кристаллических решеток, которые стали основой важнейшего метода изучения кристаллических веществ, в том числе – силикатов.

В 1880-ом году французский физик и химик Ле Шателье создал затвердевания цемента, которую описал в своей монографии «Кремнезем и силикаты», в 1884-ом году сформулировал принцип динамического равновесия (принцип Ле

Шателье), в 1894-ом году установил зависимость между растворимостью, температурой процесса и теплотой плавления вещества.

В конце 19-го века немецкий физик Рентген Вильгельм Конрад (1845 – 1923) открыл излучение, которое получило название Рентгеновские лучи, а последующие исследования сыграли важную роль в изучении строения атома, структуры вещества. Рентгеновский структурный анализ, рентгеновский спектральный анализ, рентгеновская спектроскопия, созданные на базе использования и анализа рентгеновского излучения методы и аппаратура, нашли применение в рентгенотерапии и рентгенодиагностике в медицине, в астрофизике, исследованиях дефектов строения кристаллов; структурном анализе металлов, неорганических и органических соединений, поликристаллов; определении числа, размеров и разориентировки кристаллов; остаточных напряжений, фазового состава и фазовых превращений, радиационных повреждений кристаллических и аморфных материалов.

В 1895-ом году французский физик Жан Батист Перрен установил, что катодные лучи являются потоком отрицательно заряженных частиц, чем опроверг бытующее до него представление, что катодные лучи – разновидность светового излучения.

В 1896-ом году французский физик, Нобелевский лауреат А.А. Беккерель случайно открыл радиоактивность во время работы по исследованию фосфоресценции в солях урана.

В 1897-ом году английский физик, Нобелевский лауреат Д.Д. Томсон открыл «электрон», в 1896-ом году открыл рентгеновское излучение, предложил модель атома, который состоит из положительно заряженной сферы, в которой электроны находятся в стабильном равновесии с их взаимным отталкиванием и притяжением к положительно заряженной сфере; показал, что такая модель может иметь периодические свойства, если электроны собираются в последовательные кольца по мере увеличения их числа; разработал метод масс-спектропии.

В это же время французский физик Кюри Пьер вместе с братом Полем Жаком: Кюри открыл и исследовал явление пьезоэлектричества; сформулировал принцип (Кюри принцип), позволяющий определить симметрию кристалла, находящегося под действием какого либо внешнего воздействия (механического, электрического и др.) установил зависимость магнитной восприимчивости парамагнитных тел от абсолютной температуры (Кюри закон) и к обнаружению особой температуры, выше которой (ферромагнитные материалы превращаются в парамагнитные. Вместе с женой Марией Складовской-Кюри открыл полоний и радий, установил состав излучения радия и окрашивания стекла и фарфора под действием этого излучения. Исследовал биохимическое действие радиоактивности.

В 1898-ом году британский физик новозеландского происхождения, Нобелевский лауреат, отец ядерной физики, Э. Резерфорд открыл альфа- и бета-лучи, чем сделал первые шаги в исследованиях радиоактивного урана, и тория.

В 1898-ом году французский физик, Нобелевский лауреат П. Кюри открыл полоний и радий, в 1880-ом году открыл пьезоэлектрический эффект, установил зависимость между температурой и намагниченностью (закон Кюри).

В конце 19-го и до середины 20-го века русский физико-химик, металлург Курнаков Николай Семенович (1860 – 1941) совместно с С.Ф. Жемчужным, установил зависимости между составом двойных систем и их свойствами электропроводностью, твердостью, давлением истечения и др.; установил, что образование определенного соединения двойных жидких смесей в однородной среде выражается появлением сингулярной точки на диаграмме химического соединения постоянного и переменного состава. Его исследования способствовали развитию аффинажа платиновых металлов, выплавки алюминия и магния, легких сплавов, сплавов высокого электрического сопротивления и др. Изобретение им самопишущего термометра явилось крупным усовершенствованием термического анализа.

Физическая научная дисциплина в 19-ом веке – механика

В 19-ом веке продолжилось интенсивное развитие всех разделов механики.

А. В первой половине 19-го века:

- в начале века французский математик и механик Ж.-Б. Ронделе разработал математические теоремы для структурного анализа конструкций зданий, разработал методику расчетного определения зависимости между толщиной стены, глубиной комнаты и высотой этажа;

- введена числовая характеристика упругости при растяжении и сжатии – модуль Юнга (Т. Юнг).

- немецкий математик, механик, ученый-энциклопедист И. Гаусс ввел в аналитическую механику понятие принципа наименьшего принуждения, который относится к числу дифференциальных вариационных принципов механики;

- французские физики и инженеры Клапейрон и Ламе опубликовали формулы для определения напряжений в толстостенных полых цилиндрах, нагруженных равномерными внутренними и наружными давлениями;

- французский ученый С. Пуассон распространил принцип возможных перемещений на методы определения перемещений в стержневых системах;

- в 1821-ом году один из основателей современной теории упругости французский механик и инженер А. Навье, автор ряда трудов по строительной механике, сопротивлению материалов, теории упругости и др. развил молекулярную теорию упругости твердого тела; в 1826-ом году опубликовал открытие явления ползучести металлов; в 1822-ом году разработал уравнение Навье-Стокса, играющую ключевую роль в гидродинамике; разработал методики определения перемещений при изгибе прямых и кривых стержней малой кривизны; сделал вклад в расчеты статистически неопределимых стержневых систем и пластин и оболочек; в 1821-ом году сформулировал теорию упругости в математическом виде, сделав ее пригодной для применения в строительстве с достаточной на первое время точностью; в 1819-ом году определил нулевой уровень механического напряжения; в 1826-ом году модули упругости введены как характеристика материалов, не зависящая от второго момента площади; в

1820-ом году представил труд «Мемуар об изгибе пластин», а в 1821-ом году – труд, в котором изложил молекулярную теорию упругого твердого тела и вывел уравнения равновесия и движения в его перемещениях; в 1826-ом году опубликовал курс лекций по сопротивлению материалов, в котором рассмотрены расчеты растяжения, сжатия, кручения и изгиба стержней и пластин, подпорных стен, арок и ферм; в нем даны решения задач определения напряжений и прогибов балки прямоугольного сечения на основе интегрирования приближенного уравнения упругой линии, а также изгиба стержней при малых перемещениях;

- в 1834-ом году французский ученый Л. Вика опубликовал результаты первых испытаний на ползучесть металлов при комнатной температуре;

- один из основоположников изучения свойства усталости материалов французский математик, механик и инженер Ж.-В. Понселе в 1828 – 1829-х годах в исследованиях циклического нагружения ввел термин «усталость»; в 1836-ом году при изучении продольного удара по стержню и возникающих при этом колебаний установил, что внезапно приложенная к упругой системе нагрузка вызывает вдвое большее перемещение, чем в случае статического нагружения той же силой; ввел в механику чисто кинематический термин «ускорение»;

- французский ученый, заложивший основы математической теории упругости, О. Колли написал более 800 научных работ, ряд среди которых был значительным вкладом в формирование математического аппарата механики сплошных сред; в 1823-ем году опубликовал создание теорий напряжений и деформаций; в 1827-ом году установил свойство взаимности напряжений; показал, что напряжение имеет шесть составляющих (три нормальные и три тангенциальные), откуда позднее появилась теория тензоров; совместно с Пуассоном разработал фундамент теории волн малой амплитуды;

- французский математик, механик и инженер К.Г. де Кариолес в 1835-ом году разработал теорему сложения ускорений, первым сформулировал понятие «механическая работа»;

- российский математик и механик М. Остроградский опубликовал монографии «Об интегралах общих уравнений динамики», «К общей теории удара» и др.;

- ирландский ученый У. Гамильтон в 1846 –1847-ых годах ввел в механику понятие годографа – наглядного представления изменения величины и направления напряжений с течением времени;

- российский ученый-механик Н. Ястржемский, основоположник теории сопротивления материалов в России, издал: в 1837 – 1838-ых годах.

Курс «О сопротивлении строительных материалов», в котором основана теория сопротивления материалов; статьи «Влияние способа прикрепления цепей на сопротивление устоев висячих мостов», «О построении мостовых арок из чугуна».

Б. Во второй половине 19-го века:

- французский механик, инженер и математик С. Сен-Венан 1855-ом году ввел в теорию упругости полуобратный метод решения задач и построил общую теорию кручения и изгиба призматических стержней, сформулировал основные уравнения теории пластичности; суть принципа Сен-Венана заключается в следующем – если размеры области приложения нагрузки невелики по сравнению с размерами поперечного сечения стержня, то в сечениях, достаточно удаленных от места приложения нагрузки, напряжения и деформации мало зависят от способа реализации нагрузки;

- российский ученый в области строительной механики М.М. Черепашинский разработал методы расчета статически неопределимых систем.

- английский математик, механик и физик-теоретик Б. Стокс внес вклад в гидро- и газодинамику (уравнение Навье-Стокса) в работе «О теории внутреннего трения в движущихся жидкостях и о равновесии и движении упругих твердых тел» показал, что свойство упругих тел совершать изохронные колебания обусловлено тем, что при малых деформациях напряжения, возникающие в теле, являются линейными функциями деформаций; он исследовал также динамический прогиб мостов;

- российский ученый-механик и инженер, специалист в области мостостроения и строительной механики Д. Журавский сделал важный вклад в теорию сопротивления материалов, выполнив анализ действия касательных напряжений в балке при ее изгибе и выведя формулу для их определения (формула Журавского), вывел формулу для определения касательных напряжений в различных сечениях балки; разработал метод расчета многорешетчатых деревянных ферм с железными тяжами;

- немецкий физик и механик Р. Кирхгоф в 1858-ом году получил дифференциальные уравнения равновесия пространственного кривого стержня, нагруженного на торцах силами; в 1850-ом году разработал теорию изгиба пластины на основе гипотез, соответствующим гипотезам теории изгиба балок; опубликовал труды по механике, содержащие решение трудных вопросов теорий упругости и течения жидкостей;

- основатель российской школы механики грунтов ученый-механик и грунтовед М. Герсеванов в 1861-ом – 1862-ом годах опубликовал три тома труда «Лекции о морских сооружениях», в котором дано теоретическое обоснование взаимодействия морских сооружений с окружающей средой; среди других его работ – «Об сопротивлении свай по их отказу», «Расчеты фундаментов гидротехнических сооружений на основе учета деформаций построенных зданий», «Теоретические основы механики грунтов и их практические применения», «Основы динамики грунтовой массы» и др.;

- один из основателей кинетической теории газов британский ученый Д. Максвелл в 1878-ом году ввел в науку термин «статистическая механика»; выполнил исследования по механике – сформулировал теорему в теории упругости (теорема Максвелла), развил теорию устойчивости движения; в 1864-ом году он впервые предложил уравнения для расчета статически неопределимых ферм методом сил;

- немецкий инженер-механик, специалист по испытанию строительных материалов И. Баушингер установил уменьшение сопротивления кристалличе-

ского материала пластической деформации после малой предварительной деформации противоположного знака;

- немецкий ученый в области строительной механики и сопротивления материалов К. Мор создал: одну из теорий прочности (теория прочности Мора), графические методы определения напряжений при сложном напряженном состоянии (круг Мора), теорию расчета статически неопределимых систем методом сил, предложил графический метод построения упругой линии в простых и неразрезных балках;

- российский ученый Ф. Ясинский в 1892 – 1894-ых годах на основе анализа точного и приближенного дифференциальных уравнений изогнутой оси стержня после потери устойчивости объяснил совпадение критических сил, полученных путем интегрирования этих уравнений; решил ряд задач об устойчивости стержней под воздействием распределенных нагрузок; рассмотрел стержень с шарнирно опертыми концами в упругой среде, реакции которой, перпендикулярные оси стержня, пропорциональны его прогибам, сжатый осевой сжимающей силой, интенсивность которой пропорциональна расстоянию от среднего сечения (задача Ясинского); ввел понятие коэффициента длины, дал определение критических напряжений за пределами пропорциональности;

- российский ученый в области строительной механики и мостостроения Н. Белелюбский в конце 19-го века создал расширенную классификацию стропильных ферм, которая представлена по принципу конструктивных форм и включала балочные стропильные, серповидные стропильные с различными схемами решеток, стропильные системы стянутых дуг фермы; основными типами балок в то время являлись сплошные составные балки и легкие решетчатые балки из уголков; в 1884-ом году опубликовал труд «Таблицы для подбора сечений и исчисления веса частей железных конструкций»; организатор систематических испытаний строительных материалов в России;

- российский инженер, ученый, изобретатель и архитектор В. Шухов в 1899-ом году получил три патента на изобретение первых в мире гиперболоидных конструкций и металлических сетчатых оболочек строительных конструк-

ций; разработал многочисленные конструкции разнообразных сетчатых стальных оболочек для перекрытий общественных зданий и промышленных сооружений; изобрел арочные конструкции покрытий с тросовыми затяжками, своеобразное выпуклое перекрытие – оболочка двоякой кривизны, новые конструкции пространственных плоских ферм; разработал принципиально новый метод расчета ферм, позволяющий не только определять усилия в их элементах, но и назначать рациональное размещение их в конструкции;

- российский ученый в области мостостроения и строительной механики Л. Проскуряков впервые предложил статически определимую треугольную решетку, разработал параболические и полигональные статически определимые мостовые фермы со шпренгельной решеткой, предложил также консольные и арочные фермы для железнодорожных мостов;

- в 1892-ом году заложены первые теоретические основы расчета железобетона и предложены монолитные железобетонные ребристые перекрытия и ряд других строительных конструкций (Ф. Геннебик).

Список литературы

1. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Войткун Ф. *Материаловедение: учебник для вузов. Издание 2-е, переработанное и дополненное.* СПб.: Химиздат, 2002. 696 с.
2. Пиквер К. *Великая математика. От Пифагора до 57-мерных объектов. 250 основных вех в истории математики.* М.: Лаборатория знаний, 2015. 539 с.
3. Пиквер К. *Великая физика. От большого взрыва до квантового воскрешения.* М.: Лаборатория знаний, 2016. 551 с.
4. *История механики с конца XVIII-го века до середины XX-го века* // М.: Наука, 1973.
5. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. *История науки и техники: учебное пособие – 3-е издание переработанное и дополненное.* СПб.: Лань, 2022. 528 с.
6. *Физическое материаловедение: учебник для вузов. В 6-ти томах. Под общей редакцией Б.А.Калина.* М.: МИФИ, 2007.

7. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Осенний марафон строительного материаловедения // Академия архитектуры и строительства. 2016. № 2. С. 43 – 49.

References

1. Solntsev Y.P., Pryakhin E.I., Voytkun F. Materials science: textbook for universities. Edition 2nd, revised and supplemente. SPb.: Khimizdat, 2002. 696 p. (in Russian)

2. Pickover K. Great Maths. From Pythagoras to 57-dimensional objects. 250 major milestones in the history of mathematics. Moscow: Laboratory of Knowledge, 2015. 539 p. (In Russian)

3. Pickover K. The Great Physics. From the Big Bang to Quantum Resurrection. Moscow: Laboratory of Knowledge, 2016. 551 p. (In Russian)

4. History of Mechanics from the end of the 18th century to the middle of the 20th century. Moscow: Nauka, 1973. (In Russian)

5. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. History of science and technology: textbook - 3rd edition revised and supplemented. SPb.: Lan, 2022. 528 p. (In Russian)

6. Physical Materials Science: textbook for universities. In 6 volumes. Under general editorship of B.A. Kalin. Moscow: MEPhI, 2007. (In Russian)

7. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. Autumn Marathon of Building Materials Science // Academy of Architecture and Construction. 2016. No. 2. Pp. 43 – 49. (In Russian)

Рахимов Равиль Зуфарович – д-р техн. наук, профессор кафедры Строительных материалов Казанского государственного архитектурно-строительного университета, член-корреспондент РААСН

УДК 539.216.1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ В ОТКРЫТОЙ ХЛОРИДНО-ВОДОРОДНОЙ СИСТЕМЕ

В.А. Небольсин^{1}, В.В. Корчагин², В.В. Мальцев¹*

¹*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

²*Воронежский институт ФСИИ России, Российская Федерация,
394072, г. Воронеж, ул. Иркутская 1А*

**Адрес для переписки: Небольсин Валерий Александрович, e-mail: vcmsao13@mail.ru*

В работе представлены результаты исследования электрических свойств нитевидных нанокристаллов (ННК) кремния, полученных в проточной хлоридно-водородной системе на монокристаллических подложках Si с кристаллографической ориентацией {111}. Использование метода термокомпрессии позволило создать омические контакты к ННК AuSn-Si. Приведены вольт-амперные характеристики и зависимости электрического сопротивления кристаллов от температуры. Анализируются основные электрофизические параметры ННК, такие как температурный коэффициент сопротивления, пиковое значение напряжения, температура истощения примесей, номинальное сопротивление, переходное сопротивление контактов и др. Показано, что слой естественного оксида на поверхности ННК Si не позволяет сформировать низкоомный невыпрямляющий контакт без предварительного химического удаления оксида.

Ключевые слова: нитевидные нанокристаллы, кремний, омические контакты, сопротивление, температурная зависимость, ВАХ, терморезисторы, золото

ELECTRICAL PROPERTIES OF SILICON NANOWIRES GROWN IN AN OPEN HYDROGEN CHLORIDE SYSTEM

V.A. Nebolsin^{1}, V.V. Korchagin², V.V. Maltsev¹*

¹*Voronezh State Technical University,*

Russian Federation, 394006, Voronezh, ul. 20-letia Oktiabria, 84

²*Voronezh Institute of FSIN of Russia, Russian Federation,*

1A Irkutskaya St., Voronezh, 394072

**Corresponding author: Valery A. Nebol'sin, e-mail: vcmsao13@mail.ru*

The paper presents the results of the study of electrical properties of filamentous silicon nanowires (NWs) produced in a flowing hydrogen chloride system on single-crystal Si substrates with crystallographic orientation {111}. The use of thermocompression method allowed to create ohmic contacts to AuSn-Si NWs. Volt-ampere characteristics and temperature dependences of the electrical resistance of crystals are given. The main electrophysical parameters of NWs, such as temperature coefficient of resistance, peak voltage value, impurity depletion temperature, nominal resistance, transient resistance of contacts, etc., are analyzed. It is shown that the natural oxide layer on the surface of Si NWs does not allow to form a low-resistance non-rectifying contact without preliminary chemical removal of the oxide.

Keywords: nanowires, silicon, ohmic contacts, resistance, temperature dependence, WAC, thermistors, gold

Введение

Стремительное развитие электроники и вычислительной техники оказалось предпосылкой для широкой автоматизации самых разнообразных процессов в промышленности, в научной сфере, в быту. Однако реализация этой предпосылки в большой степени определяется разработкой устройств получения информации - датчиков. Несмотря на разнообразие доступных сенсоров, измеряющих различные физические величины, они имеют некоторые недостатки и, прежде всего, ограниченную возможность настройки электрических параметров и сложность интеграции в микроэлектронные схемы [1, 2]. К тому же, если датчик имеет невысокое быстродействие, то он может регистрировать значения внешних воздействий, отличающиеся от реальных. Это означает, что датчик работает с динамической погрешностью.

Переход к наноразмерным объектам позволяет уменьшить габариты сенсора при увеличении его чувствительности за счет большой удельной поверх-

ности наноструктур [3]. Помимо высокой чувствительности, значительными преимуществами при уменьшении размеров датчика являются высокое быстродействие (малая инерционность), точность измерений, экономия материала, малый вес, простота интеграции в существующие технические системы и низкое энергопотребление. Указанные преимущества побуждают исследователей стремиться к уменьшению масштабов электронных устройств, разрабатывать полупроводниковые наноструктуры, которые могли бы стать подходящей основой для преобразовательных элементов [4]. Создание датчиков сверхмалых размеров является одним из основных и перспективных направлений развития нанотехнологий. Кремний, как основной полупроводниковый материал, обладает превосходными электронными, в частности, терморезистивными, свойствами. Существует хорошо отработанная технология изготовления Si-устройств в электронике, что делает этот материал технологически удобным для использования в электронных датчиках. Однако известные методы поверхностного структурирования Si вызывают повреждения материала и потенциально вносят загрязнения, следствием чего является повышенная скорость поверхностной рекомбинации свободных носителей заряда, что может приводить к понижению эффективности работы датчиков.

Одним из современных направлений в материаловедении является использование кремниевых нанопроводов или нитевидных нанокристаллов (ННК) в качестве материалов чувствительных элементов в датчиках различных физических величин, например, температуры [5]. Квазиодномерный перенос тока в кремниевых нанопроводах позволяет повысить эффективность и увеличить электростатический контроль устройств.

Кремниевые ННК представляют собой одномерные наноструктуры диаметром до 100 нм и длиной, значительно превышающей их диаметр, что придает им высокий аспектный коэффициент длина/диаметр (от 10 до 100) [6]. ННК Si обладают высоким совершенством структуры, уникальной одномерной формой, высоким коэффициентом тензочувствительности (120 – 150), высокими значениями температурного коэффициента сопротивления и упругой деформа-

ции. Ранее в работах [7 – 9] и др. изучалась возможность применения ННК Si в датчиках температуры. Однако используемые в этих работах кристаллы были выращены в ампульной системе, что не является технологичным методом для массового производства. Кроме того, выращивание ННК в ампулах ограничивает возможности управляемого роста, к примеру, отсутствует возможность выращивания регулярных систем ННК [10]. Целью данной работы является исследование температурной зависимости электросопротивления и вольт-амперных характеристик (ВАХ) ННК Si, выращенных в хлоридно-водородной проточной системе.

Методы исследования

Выращивание ННК Si в хлоридно-водородной открытой системе осуществлялось с участием мелкодисперсных частиц Au в качестве катализаторов роста [11]. Температура ростового процесса составляла 1273 К. Диаметры ННК заключались в интервале 200-500 нм, а длина варьировалась от 2 до 10 мкм. Кристаллографическая ориентация оси выращенных кристаллов соответствовала $\langle 111 \rangle$. Важное внимание уделялось созданию омических контактов к кристаллам [12 – 14]. Учитывая, что диффузия играет ключевую роль в формировании контактов и существенно влияет на свойства материалов, от которых зависят параметры терморезисторов, этот процесс может оказывать определяющее воздействие. Электрические контактные выводы к ННК изготавливали методом термокомпрессии на установке FINEPLACER Micro HVR Lambda (Finetech, Германия). Основным препятствующим фактором создания низкоомных контактов к ННК Si является образование прослойки естественного оксида [15, 16]. Высокое сопротивление и нелинейные ВАХ получались, если при изготовлении контактов перед нанесением металлической контактной пленки не проводилась предварительная обработка поверхности образца плавиковой кислотой ($\text{SiO}_2 + 4\text{HF} \rightarrow \text{Si} + 2\text{F}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$), затем кислотным травителем в составе $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} = 1 : 4 : 4$, который изотропно травит поверхность Si в тече-

ние 1 – 5 минут, и щелочным травителем состава $\text{NaOH} : \text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3 : \text{H}_2\text{O} = 2 : 10 : 88$, обеспечивающим анизотропное травление в течение 1 – 5 мин.

Изготовленные с помощью сплава AuSn (сплав ЗлОлМ80-20) в виде шариков или микропровода Au, легированной сурьмой (до 1 % Sb), контакты являются омическими и сохраняют омичность и линейность ВАХ вплоть до «азотных» температур и плотностей токов $(6 - 8) \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$. Температура инструмента для микросварки должна быть несколько выше температуры эвтектики Au–Sn и составляла 553 – 683 К (рис. 1).

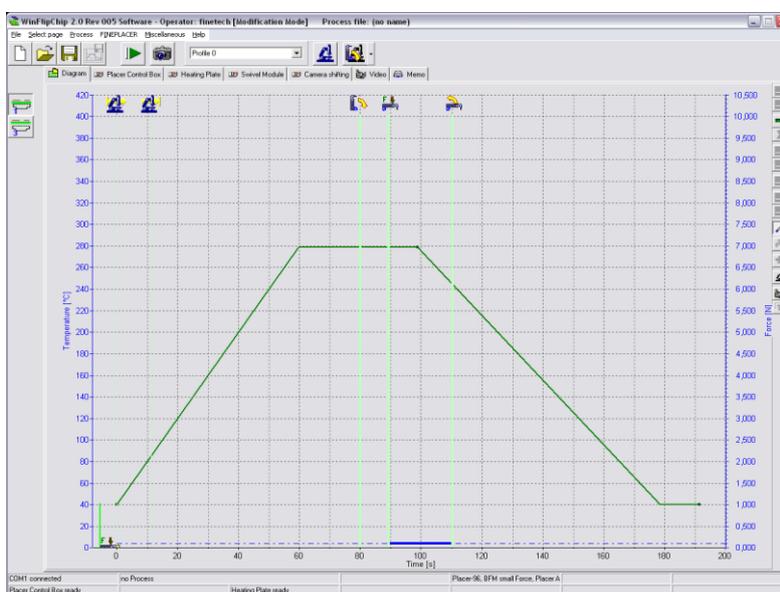


Рис. 1. Профилограмма временной выдержки по температуре в процессе при-варки контактных выводов к ННК Si.

Переходное сопротивление контактов Si-Au (Si-AuSn) в широком диапазоне температур имеет малую величину и не превышало 1 – 1,5 % от общего сопротивления кристалла. Однако на ННК Si не всегда удается получать контакты с малым переходным сопротивлением (рис. 2 а).

Если удельное электрическое сопротивление ННК превышает $3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, то контакты могут характеризоваться образованием барьера Шоттки (рис. 2 б) [17].

Для определения сопротивления ННК и построения ВАХ применяли потенциометрический метод, реализованный согласно схеме, представленной на рисунке 3.

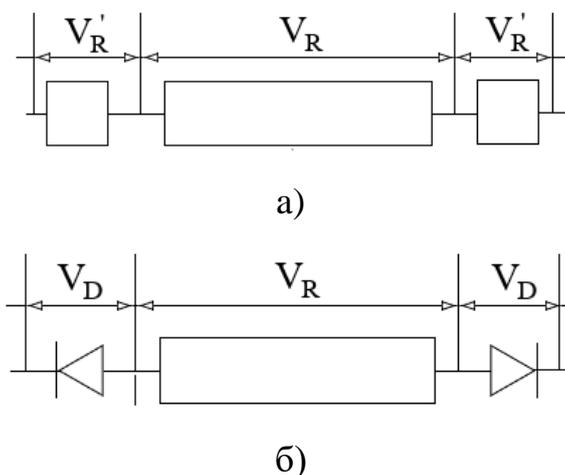


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема ННК контактами:

а) омическими, б) выпрямляющими.

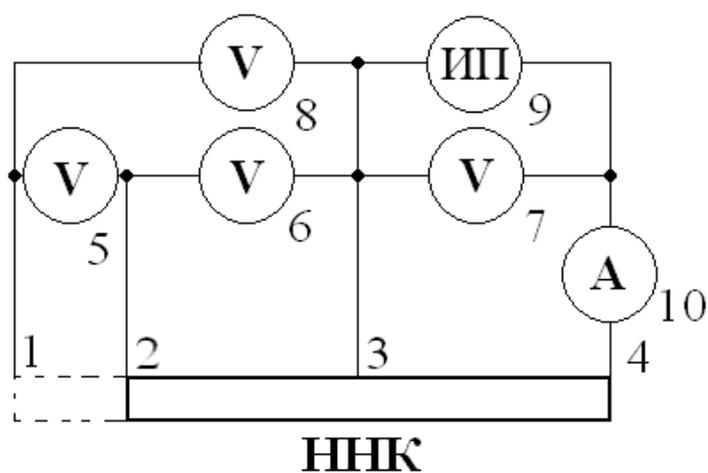


Рис. 3. Схема для снятия ВАХ терморезисторов на основе ННК с омическими и выпрямляющими контактами 1 – 4 (V(5) – V(8) - вольтметр, А(10), – амперметр, ИП (9) – источник питания).

Для подключения кристалла к электрической цепи формировали как минимум три контакта из Au-проволоки, легированной сурьмой. Контакты 3 и 4 выполняли роль токовых, а 1 и 2 – потенциометрических. Вольтметр 5 исполь-

зовался для измерения термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), возникающей из-за температурного градиента в зоне контактов 3 и 4. Разность потенциалов на контакте 3 регистрировалась вольтметрами 6 и 8, а на отрезке 3-4 измерялась вольтметром 7. Универсальный источник питания (УИП) 9 обеспечивал необходимый ток. Направление протекания электрического тока в образце совпадало с направлением оси роста ННК $\langle 111 \rangle$. Сила тока регистрировалась амперметром 10. Исследуемый образец располагался в термостате, что позволяло изучать ВАХ и температурную зависимость электросопротивления в диапазоне температур от 77 до 400 К. Для достижения отрицательных температур, ниже нуля по Цельсию, использовали жидкий азот.

Температуру контролировали с помощью термопары, типа хромель-копель. Одновременное измерение ВАХ между контактами 1-2 и ВАХ, относящихся к контакту 2, в сочетании с известной зависимостью $R=f(T)$ (где R – сопротивление образца) даёт возможность оценить температуру во время нагрева образца электрическим током. Исследования проводили на ННК с контактами, омичность и линейность ВАХ которых сохранялась вплоть до «азотных» температур и плотностей токов $(6 - 8) \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ (рис. 4).

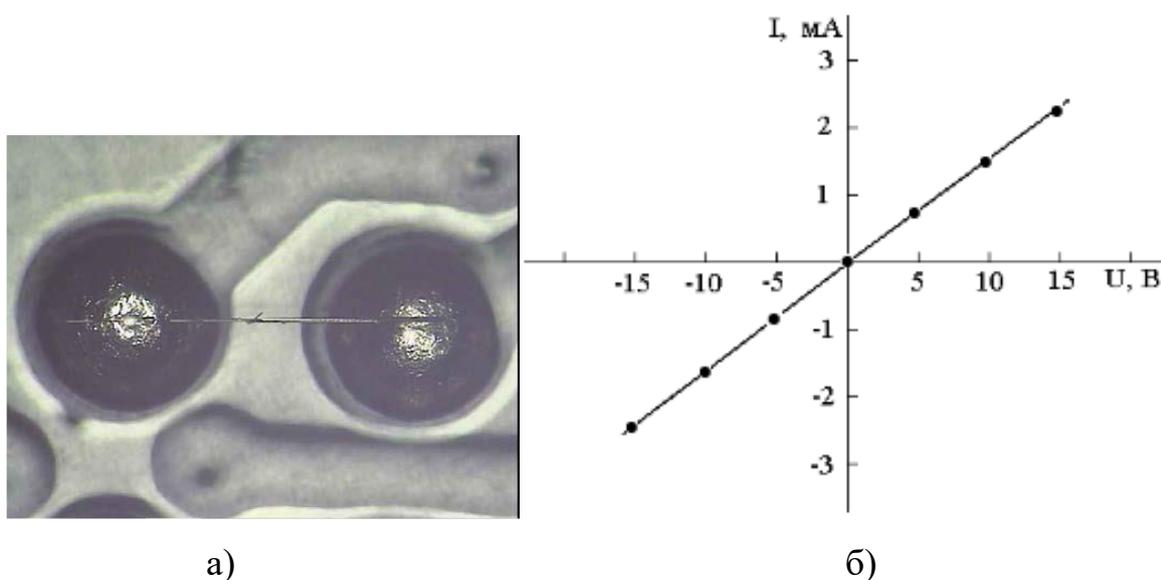


Рис. 4. Внешний вид ННК Si с контактными площадками из сплава ЗлОлМ50-50 (а) и типичная ВАХ контактного соединения AuSn-Si (б).

При измерениях использовались цифровые мультиметры ЛРРЛ 207 (Тайвань) в режимах измерения силы тока и напряжения, а также мост постоянного тока. Погрешность измерения тока I составляла $\sim 10\%$ при $I = 10^{-4}$ А и $\sim 1\%$ при $I = 10^{-3}$ А, напряжения – $0,1\%$ во всем исследуемом диапазоне, электросопротивления $\pm 0,01$ Ом в диапазоне $10^2 - 10^3$ Ом и $\pm 1,0$ Ом в диапазоне $10^3 - 10^4$ Ом, температуры ± 1 К в диапазоне $77 - 450$ К.

Для уменьшения влияния термоЭДС, величина которой может составлять до $4 \cdot 10^{-6}$ В·К⁻¹, необходимо потенциометрические контакты 3 и 4 располагать как можно ближе друг к другу, чтобы уменьшить разность T .

Результаты и обсуждение

На рисунке 5 показаны температурные зависимости электрического сопротивления НК Si $R/R_0 = f(T)$, где R_0 представляет собой электросопротивление образца при 298 К. Сопротивление исследуемых НК при комнатной температуре составляет $5 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$ Ом, а тип проводимости – либо электронный (n-тип), либо дырочный (p-тип) при легировании образца бором в процессе выращивания. По данным $R(T)$ также построены зависимости температурного коэффициента сопротивления (ТКС) $\alpha = f(T)$. ТКС характеризует изменение абсолютной величины сопротивления терморезистора при изменении T на 1 К ($\% \cdot K^{-1}$).

На кривых $R/R_0 = f(T)$ можно выделить два участка (I и II), соответствующие различным температурным диапазонам. Участок I соответствует примесной проводимости НК, а участок II (кривая II) характеризует область истощения примеси. В температурном диапазоне менее 230 К сопротивление НК R изменяется экспоненциально в соответствии с уравнением

$$R_T = A \exp(B/T), \quad (1)$$

где A и B постоянные величины, присущие конкретному терморезистору.

При $T=T_s \approx 200$ К сопротивление достигает минимального значения и $\alpha=0$. На участке истощения примеси $T > 200$ К зависимость $R = f(T)$ имеет квазилинейный характер со значением коэффициента $B = 65$ К.

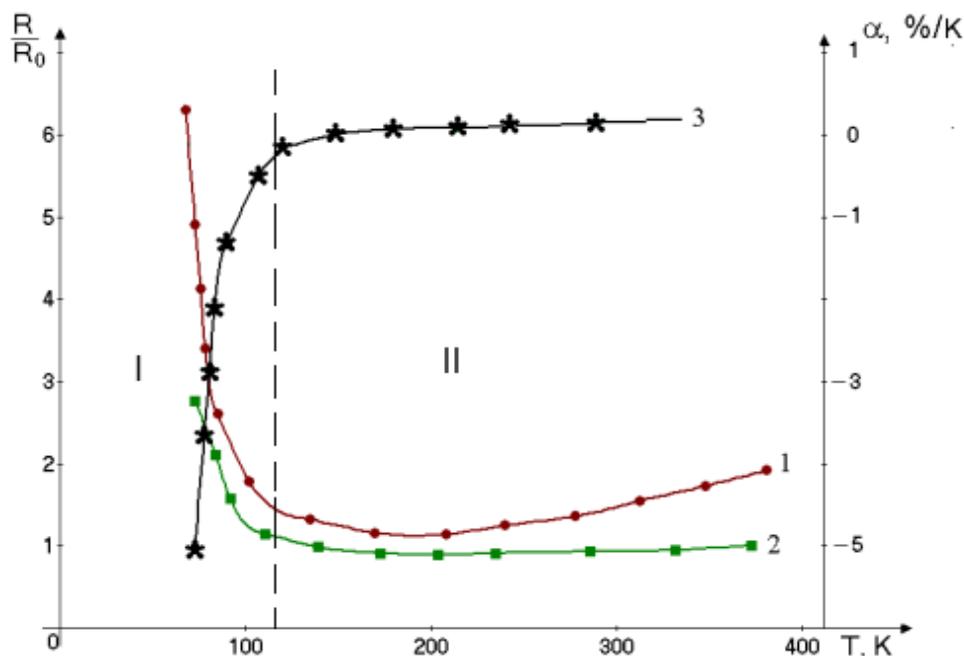


Рис. 5. Температурная зависимость электрического сопротивления R/R_0 (1, 2) и величины ТКС (3) ННК Si с различной проводимостью:

$$1 - \rho = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}, 2 - \rho = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

ТКС ННК Si на участке примесной проводимости I отрицателен, а на участке истощения примеси II – положителен. Температура истощения примеси T_s определяется природой и концентрацией примеси в кристалле. В области истощения примеси ($T > 200 \text{ K}$) электропроводность полупроводников слабо зависит от температуры. Причина этого состоит в том, что примесные уровни энергии полностью истощены, а для перехода валентных электронов из валентной зоны в зону проводимости недостаточно энергии тепловых колебаний узлов кристаллической решётки. Состав примеси определяет и абсолютную величину коэффициента α . Для описания температурной характеристики ННК Si, если известно его сопротивление при некоторой температуре T_1 , можно использовать уравнение

$$R = R_1 \exp B(1/T - 1/T_1), \quad (2)$$

которое можно получить путем подстановки (1) в следующее очевидное выражение

$$R_1 = A \exp(B/T_1), \quad (3)$$

где R_1 – некоторая постоянная, характеризующая материал и конструкцию терморезистивного элемента.

На рисунке 6 показана ВАХ исследуемых образцов ННК при различных температурах окружающей среды T_0 . Начальный участок ВАХ (0 – 4 В) – линейный (участок АВ). На этом участке ток пропорционален напряжению, а сопротивление ННК остается постоянным. Наклон прямой линии характеризует постоянство проводимости кристалла $\sigma = 1/\rho = e\mu_n n_n$, где ρ – удельное сопротивление (Ом·м), e – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), μ_n – подвижность электронов в кремнии ($0,14 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 300 К), n_n – концентрация электронов. Очевидно, что температура ННК на этом участке не превышает температуру окружающего воздуха.

Из графика ВАХ следует, что в цепях с напряжением U до 1,5 В ННК могут быть использованы как линейные элементы с предсказуемым поведением. При напряжениях более 3 – 4 В, т.е. существенно превышающих 1,5 В, зависимость силы тока в ННК от напряжения сложнее, и сопротивление резистора меняется в зависимости от условий. При прямом напряжении после 4 В ток J сначала начинает отставать, и кривая ВАХ имеет больший угол наклона, чем у линейного резистора (участок ВС), а затем резко падает (участок CD), что отражает сложные физические процессы внутри ННК.

Произведем оценку концентрации электронов проводимости в ННК Si электронного типа при 300 К, если удельное сопротивление его составляет $5 \cdot 10^{-3}$ Ом·м. Поскольку $\rho = 1/\sigma$, то $n_n = 1/(e\mu_n \rho) = 1/(1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,14 \cdot 5 \cdot 10^{-3}) = 8,93 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} = 8,93 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Полученное значение n_n существенно превышает собственную концентрацию носителей заряда в кремнии n_i при 300 К, равную $1,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3} = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Превышение концентрации электронов в Si над собственной концентрацией носителей заряда может свидетельствовать о наличии примесей в ННК.

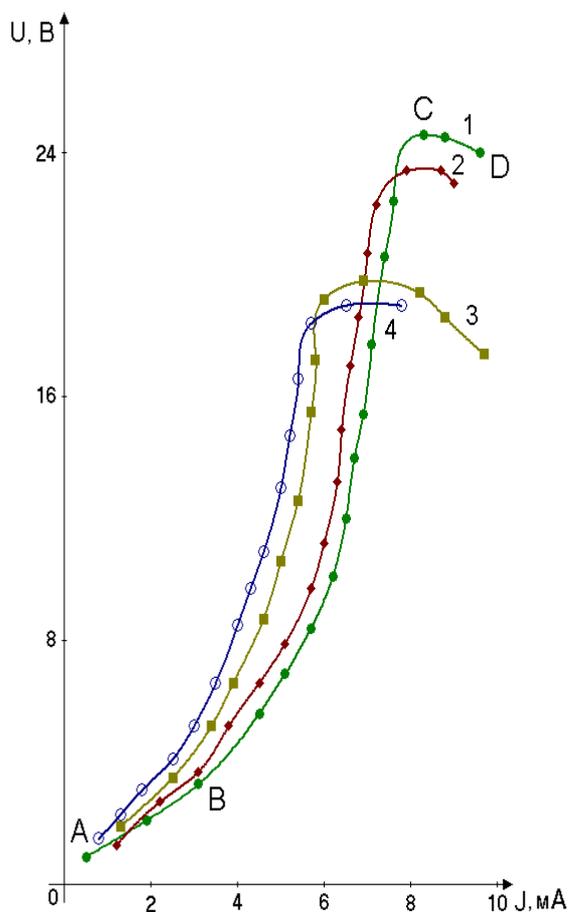


Рис. 6. ВАХ ННК Si при различных температурах окружающей среды:
1 – 298 К, 2 – 323 К, 3 – 348 К, 4 – 373 К.

Так как ВАХ ННК представляет собой зависимость, полученную в условиях теплового равновесия кристалла с окружающей средой, то увеличение тока приводит к росту рассеиваемой мощности и нагреву ННК джоулевым теплом до температуры, превышающей температуру окружающей среды T_0 . В результате его сопротивление резко возрастает, что отражается на кривых ВАХ. При определенной величине тока напряжение на кристалле достигает пикового значения U_{\max} , формируя максимум по напряжению на ВАХ (точка С). Здесь увеличение тока сопровождается уменьшением сопротивления в равной степени. Это приводит к тому, что напряжение на терморезисторе стабилизируется и достигает своего максимального уровня. Дальнейшее повышение тока через кристалл влечет за собой снижение падения напряжения (третий участок ВАХ,

кривая СД), что соответствует проявлению отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), определяемого как $R = dU/dI$.

На участке с ОДС уменьшение сопротивления оказывается столь сильным, что напряжение на терморезисторе уменьшается. Это возможно, когда протекающий ток разогревает устройство до температуры, соответствующей температуре примесного истощения. В таком случае дальнейшее повышение температуры не будет сопровождаться ростом проводимости ННК, и напряжение начнёт расти с увеличением силы тока.

При комнатной температуре заметный разогрев ННК на воздухе наблюдается уже при силах тока порядка единиц миллиампер (табл. 1).

Сопоставляя ВАХ (рис. 6) и зависимости $R = f(T)$ (рис. 5), можно заметить, что участок ВС на ВАХ совпадает с участком квазилинейной характеристики $R(T)$. При высоких токах происходит интенсивный нагрев ННК Si, проводимость ННК растёт и полупроводник переходит в область собственной проводимости (участок СД на ВАХ).

Таблица 1

Температура разогрева ННК в зависимости от величины протекающего через кристалл тока

Сила тока, мА	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	15,0
Температура ННК, К	330	350	380	450	700	1000

Снижение номинального сопротивления ННК R вызывает смещение точки максимума на ВАХ (точки С) в сторону меньших напряжений и больших токов, а также уменьшает крутизну участка отрицательного дифференциального сопротивления (СД). Данный факт можно объяснить тем, что при нагревании полупроводниковых материалов происходит их насыщение носителями заряда (электронами и дырками), вследствие чего проводимость материала увеличивается, и, следовательно, сопротивление уменьшается. С ростом электрического тока терморезистор разогревается, и его сопротивление уменьшается.

Повышение температурного коэффициента B при постоянных значениях R , T_0 и коэффициента рассеяния полупроводника H (мощности, рассеиваемой

на терморезисторе при разнице температур терморезистора и окружающей среды в 1 K , $\text{мВт}\cdot\text{K}^{-1}$) приводит к сдвигу минимума ВАХ в область больших напряжений и увеличивает крутизну участка ОДС. С ростом T_0 ВАХ смещается в сторону осей координат, а точка С приближается к началу координат. Это происходит потому, что увеличение коэффициента температурной чувствительности приводит к смещению максимума характеристики в сторону меньших мощностей, а крутизна падающего участка возрастает.

Уменьшение N приводит к снижению рассеиваемой мощности преобразователя, что, в свою очередь, смещает максимум по напряжению ВАХ в область меньших напряжений и токов. Это указывает на то, что большая часть работы электрического тока, проходящего через кристалл, выходит в форме теплоты. Следовательно, температура, соответствующая точке С на ВАХ, достигается при меньшей мощности рассеяния.

Высоколегированные ННК Si демонстрируют малую величину ТКС (рис. 5, кривая 2). Снижение уровня легирования приводит к росту величины ТКС (кривая 1), но одновременно возрастает и нелинейность характеристики $R = f(T)$. Вид ВАХ зависит также от размеров ННК. Для более коротких по длине ННК точка перегиба на ВАХ (точка С) смещается в область больших токов J и меньших напряжений. Такое изменение ВАХ может быть обусловлено как уменьшением предэкспоненциального множителя A в (1), так и увеличением энергии, рассеиваемой резистором.

Заключение

Применение ННК Si, выращенных в хлоридно-водородной проточной системе, в качестве кристалльной основы чувствительных элементов терморезистивных датчиков температуры позволяет обеспечить малые габаритные размеры, высокие отрицательные (до $-5 \text{ \%}\cdot\text{K}^{-1}$) и достаточно высокие положительные (до $0,5 \text{ \%}\cdot\text{K}^{-1}$) значения ТКС, высокое быстродействие (время, необходимое, чтобы терморезистор принял температуру окружающей среды), высокое номинальное сопротивление (до 10 кОм) и дешевизну при массовом производстве,

что является преимуществом терморезисторов на базе ННК. Вид ВАХ таких терморезистивных измерительных элементов определяется природой, размерами и удельным сопротивлением ННК, а также зависит от T_0 и степени тепловой связи кристалла и окружающей среды. Следовательно, нелинейную температурную характеристику, относительно небольшой диапазон измеряемых температур и невзаимозаменяемость терморезисторов на основе ННК можно отнести к их недостаткам. Но для определенных применений эти недостатки имеют второстепенное значение.

ННК Si дают возможность формировать сверхмалые по габаритам терморезисторные элементы, и поэтому они менее инерционны при изменении температуры. С другой стороны, микроминиатюрные размеры терморезисторов приводят к тому, что для их саморазогрева требуется небольшая величина тока, что увеличивает погрешность измерений. Чтобы снизить нагрев из-за проходящего тока, его интенсивность нужно уменьшать. Но в этом случае соотношение между полезным сигналом и шумом ухудшится, а случайные ошибки в результатах измерений возрастут.

Таким образом, увеличение тока через ННК может быть оправдано только в том случае, когда погрешность, вносимая эффектом саморазогрева, находится в допустимых пределах.

Показано, что слой естественного оксида на поверхности ННК кремния не позволяет сформировать омический контакт без предварительного удаления окисла в плавиковой кислоте.

Мы планируем более детальные теоретические и экспериментальные исследования причин и ростовых факторов, обуславливающих низкое удельное сопротивление ННК Si и электронный тип проводимости, выяснение роли металлов-катализаторов в легировании ННК примесями с глубокими уровнями в свете полученных результатов.

Список литературы

1. Kholmanov R. O. Semiconductor-Based Sensors and their Wide Applications // *American Journal of Engineering, Mechanics and Architecture*. 2024. V.2(6). Pp. 2993 – 2637.
2. Smith J. A., Johnson L. K. Semiconductor-Based Sensors. Technology and Application // *Advanced Sensor Technology*. 2020. V.38(4). Pp. 254-278.
3. Yang P., Yang R., Yan M. Fardy Semiconductor nanowire: What's next? // *Nano Letters*. 2010. V.10(5). Pp.1529 – 1536.
4. Schmidt V., Wittemann J.V., Gösele U. Growth, Thermodynamics, and Electrical Properties of Silicon Nanowires // *Chemical Review*. 2010. V.110. Pp. 361 – 388.
5. Shimanovich K., Mutsafi Z., Shach-Caplan M., Pikhay E., Roizin Y., Rosenwaks Y. Efficient Temperature Sensor Based on SOI Gate-All-Around Electrostatically Formed Nanowire Transistor // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2019. V.66(8). Pp. 3549 – 3553.
6. Nebol'sin V.A., Vorob'ev A.Y., Swaikat N.A New Understanding of the Vapor–Liquid–Solid Mechanism of Nanowire Growth // *Inorganic Materials*. 2020. V.56(4). Pp. 346 – 352.
7. Дрожжин А.И., Антипов С.А., Ермаков А.П. Нитевидные кристаллы полупроводников (Приборы и методики исследования свойств и структуры) // Деп.в ВИНТИ 21.10.87, № 7702-В87. Воронеж: ВПИ. 145 с.
8. Барамзина Е.А., Новокрещенова Е.П., Долгачев А.А. Омические контакты к нитевидным кристаллам кремния // *Межвуз. сборник «Физика и технология материалов электронной техники»*. – Воронеж: ВГТУ. 1992. С. 69 – 73.
9. Дрожжин А.И. Преобразователи на нитевидных кристаллах p-Si{111} // Деп. в ВИНТИ 08.10.84, № 6606-84. Воронеж: ВПИ. 214 с.
10. Shchetinin A.A., Darinskii B.M., Kozenkov O.D., Nebol'sin V.A. Mechanism for early stages of silicon whisker growth // *Inorganic Materials*. 1990. V. 26(7). Pp. 1353 – 1357.

11. Небольсин В.А., Корнеева В.В., Мальцев В.В. Влияние состава газовой фазы на рост нитевидных нанокристаллов кремния в системе Si-H-Cl // Перспективные материалы. 2025. №4. С. 18 – 27.

12. Piton M. R., Hakkarainen T., Hilska J., et al. Optimization of Ohmic Contacts to p-GaAs Nanowires // Nanoscale Research Letters. 2019. V. 14(1). Pp. 344 – 311.

13. Park H., et. al. Geometry- and size-dependence of electrical properties of metal contacts on semiconducting nanowires // J. Appl. Phys. 2010. V.108(9). Pp. 094308 – 094314.

14. Суятин Д.Б., Петерсон Х, Максимов И, и др. Свойства электрических контактов к нитевидным нанокристаллам // Вестник ВГТУ, сер. «Материаловедение», Воронеж, 2007. Т.3(11). С. 67 – 70.

15. Nebol'sin V.A., Spiridonov B.A., Johansson J., Suyatin D.B. Thermodynamics of oxidation and reduction during the growth of metal catalyzed silicon nanowires // Journal of Crystal Growth. 2019. V. 505. Pp. 52 – 58.

16. Nebol'sin V.A., Levchenko E.V., Yuryev V., Swaikat N. Thermodynamics of Silicon Nanowire Growth under Unintended Oxidation of Catalytic Particles // Journal of Nanotechnology. 2023. V. 2023. Pp. 1 – 9.

17. Thorntonn R. L. Schottky-barrier elevation by ion implantation and implant segregation // Electronics Letters. 1981. V. 17(14). Pp. 485 – 486.

References

1. Kholmanov R. O. Semiconductor-Based Sensors and their Wide Applications // American Journal of Engineering, Mechanics and Architecture. 2024. V.2(6). Pp. 2993 – 2637.

2. Smith J. A., Johnson L. K. Semiconductor-Based Sensors. Technology and Application // Advanced Sensor Technology. 2020. V.38(4). Pp. 254 – 278.

3. Yang P., Yang R., Yan M. Fardy Semiconductor nanowire: What's next? // Nano Letters. 2010. V.10(5). Pp.1529 – 1536.

4. Schmidt V., Wittemann J.V., Gösele U. Growth, Thermodynamics, and Electrical Properties of Silicon Nanowires // *Chemical Review*. 2010. V.110. Pp. 361 – 388.

5. Shimanovich K., Mutsafi Z., Shach-Caplan M., Pikhay E., Roizin Y., Rosenwaks Y. Efficient Temperature Sensor Based on SOI Gate-All-Around Electrostatically Formed Nanowire Transistor // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2019. V. 66(8). Pp. 3549 – 3553.

6. Nebol'sin V.A., Vorob'ev A.Y., Swaikat N. A New Understanding of the Vapor–Liquid–Solid Mechanism of Nanowire Growth // *Inorganic Materials*. 2020. V.56(4). Pp. 346 – 352.

7. Drozhzhin A.I., Antipov S.A., Ermakov A.P. Threaded crystals of semiconductors (Devices and methods for studying properties and structure) // *Dep.in VINITI 21.10.87, № 7702-V87*. Voronezh: VPI. 145 p. (in Russian)

8. Baramzina E.A., Novokreschenova E.P., Dolgachev A.A. Ohmic contacts to filamentary silicon crystals // *Interuniversity collection «Physics and technology of materials of electronic engineering»*. – Voronezh: VGTU.1992. Pp. 69 – 73 (in Russian)

9. Drozhzhin A.I. Transducers on the filamentary crystals p-Si{111} // *Dep. in VINITI 08.10.84, № 6606-84*. Voronezh: VPI. 214 p. (in Russian)

10. Shchetinin A.A., Darinskii B.M., Kozenkov O.D., Nebol'sin V.A. Mechanism for early stages of silicon whisker growth // *Inorganic Materials*. 1990. V. 26(7). Pp. 1353 – 1357.

11. Nebolsin V.A., Korneeva V.V., Maltsev V.V. Influence of gas phase composition on the growth of silicon nanowires in the system Si - H - Cl // *Prospective Materials*. 2025. №4. Pp. 18 – 27 (in Russian)

12. Piton M. R., Hakkarainen T., Hilska J., et al. Optimization of Ohmic Contacts to p-GaAs Nanowires // *Nanoscale Research Letters*. 2019. V.14(1). Pp. 344 – 311.

13. Park H., et. al. Geometry- and size-dependence of electrical properties of metal contacts on semiconducting nanowires // J. Appl. Phys. 2010. V.108(9). Pp. 094308 – 094314.

14. Suyatin, D.B., Peterson, H., Maximov, I., et al. Properties of electrical contacts to filamentous nanocrystals // Vestnik VGTU, ser. «Material Science», Voronezh, 2007. V. 3(11). Pp. 67 – 70 (in Russian)

15. Nebol'sin V.A., Spiridonov B.A., Johansson J., Suyatin D.B. Thermodynamics of oxidation and reduction during the growth of metal catalyzed silicon nanowires // Journal of Crystal Growth. 2019. V. 505. Pp. 52 – 58.

18. 16. Nebol'sin V.A., Levchenko E.V., Yuryev V., Swaikat N. Thermodynamics of Silicon Nanowire Growth under Unintended Oxidation of Catalytic Particles // Journal of Nanotechnology. 2023. V. 2023. Pp. 1 – 9.

17. Thornton R. L. Schottky-barrier elevation by ion implantation and implant segregation // Electronics Letters. 1981. V. 17(14). Pp. 485 – 486.

Небольсин Валерий Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Корчагин Владимир Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры математики и естественно-научных дисциплин Воронежского института ФСИИ России

Мальцев Виктор Владимирович – магистр по направлению «Электроника и наноэлектроника», Воронежский государственный технический университет

УДК 624.21, 625.7

ПРИМЕНЕНИЕ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ АСФАЛЬТА НА ДОРОГАХ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

А.В. Ерёмин, О.Б. Кукина, В.П. Волокитин, Е.В. Корнилов, Д.М. Оськин*

*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

**Адрес для переписки: Корнилов Евгений Владимирович, e-mail: jenua8885@gmail.com*

Изучены два способа приготовления самовосстанавливающегося асфальтобетона. Первый – это внедрение в смесь мелкой металлической стружки, которая при индукционном нагреве покрытия будет разогреваться, и трещины на асфальтобетоне будут самозатягиваться за счёт разогретого битума. Второй вариант – это внедрение микрокапсул в асфальтобетонную смесь. При появлении дефектов на покрытии в виде сетки трещин из капсул выпускается рационально подобранная смесь, которая заполняет собой трещины.

Ключевые слова: самовосстанавливающийся асфальтобетон, графен, микрокапсулы, усиление дорожной одежды.

THE USE OF SELF-HEALING ASPHALT ON PUBLIC ROADS

A.V. Eremin, O.B. Kukina, V.P. Volokitin, E.V. Kornilov, D.M. Oskin*

*Voronezh State Technical University, ul. 20-letia Oktabria, 84, Voronezh, 394006,
Russian Federation*

** Corresponding author: Evgeny V. Kornilov, e-mail: jenua8885@gmail.com*

Two methods of preparing self-healing asphalt concrete have been studied. The first is the introduction of fine metal shavings into the mixture, which, when the coating is heated by induction, will heat up and cracks in the asphalt concrete will self-tighten, taking into account the heated

bitumen. The second option is the introduction of microcapsules into the asphalt mix. When defects appear on the coating in the form of a grid of cracks, a rationally selected mixture is released from the capsules, which fills the cracks.

Keywords: self-healing asphalt, graphene, microcapsules, reinforced pavement.

Введение

По мере ускорения урбанизации и усиления воздействия изменения климата на инфраструктуру, потребность в долговечных, экономичных и экологически чистых дорожных материалах стоит очень остро. Самовосстанавливающийся асфальт становится революционным решением, способным продлить срок службы дорог, сократить расходы на обслуживание и минимизировать воздействие на окружающую среду. Самовосстанавливающийся асфальт — это усовершенствованный тип дорожного покрытия, предназначенный для самостоятельного устранения трещин и повреждений. Традиционный асфальт подвержен образованию трещин в связи с повышенными транспортными нагрузками, перепадами температур и факторами окружающей среды. В отличие от него, самовосстанавливающийся асфальт содержит специальные добавки и технологии, которые активируются при определённых условиях для устранения трещин, тем самым продлевая срок службы дорожного покрытия и снижая потребность в частом обслуживании.

Экспериментальная часть.

Одним из более простых вариантов нового материала является внедрение в асфальтобетонную смесь мелкой металлической стружки (рис. 1).

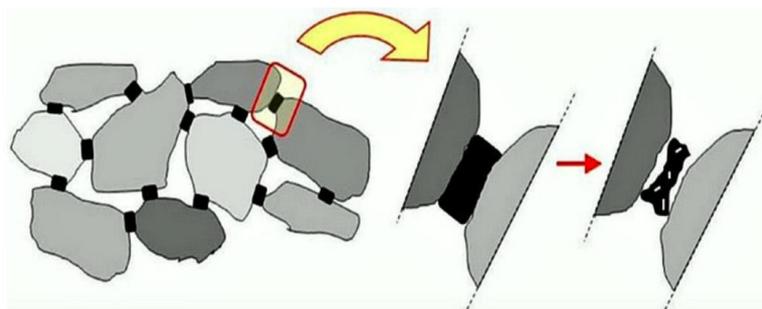


Рис. 1. Схема внедрения в асфальтобетонную смесь металлической стружки.

Суть технологии заключается в индукционном нагреве покрытия. Нагрев предполагает выработку тепла в покрытии путём воздействия переменного электромагнитного поля, которое вызывает вихревые токи в проводящих материалах. При образовании на верхнем слое покрытия трещин, службы содержания применяют индукционную машину, которая осуществляет подходы по повреждённым участкам (рис. 2).



Рис. 2. Принцип действия индукционного нагрева покрытия.

При этом металлические частицы разогреваются, параллельно разогревая битум, и далее нагретый битум заполняет трещины. После охлаждённый битум затвердевает, эффективно заполняя трещины и восстанавливая целостность дорожного покрытия.

Это профилактическое обслуживание позволит не только отложить замену верхнего слоя покрытия, но и внедрить недорогую меру, которая сводит к минимуму время перекрытия автомобильных дорог.

Ещё одним вариантом является внедрение микрокапсул с асфальтобетонную смесь. Суть заключается в том, что при образовании трещин из микрокапсул высвобождаемое вещество проникает в трещины и связывается с окружающей асфальтовой матрицей, эффективно герметизируя трещины и восстанавливая целостность дорожного покрытия. Возможно 2 наполнения капсул: графеном и альгинатом кальция (рис. 3).



Рис. 3. Примеры микрокапсул с графеном и альгинатом кальция.

Результаты и их обсуждение

При внедрении в асфальтобетонную смесь микрокапсул с альгинатом кальция ($C_{12}H_{14}CaO_{12}$), наблюдается заметное увеличение прочности на изгиб и долговечности асфальта. Капсулы, в состав которых входит графен, улучшают реологические свойства и способность асфальта к самовосстановлению. Также увеличивается устойчивость к старению асфальтобетонного покрытия.

К недостаткам всех видов микрокапсул можно отнести то, что при введении их в асфальтобетонную смесь не может быть обеспеченная устойчивость к высоким температурам и механическим воздействиям во время смешивания и укладки асфальтобетонной смеси. В настоящее время ведутся исследования по разработке более прочных материалов для капсул и методов инкапсуляции.

К недостаткам применения металлической стружки можно отнести отсутствие специальной техники, которая позволяла бы нагревать большую площадь покрытия за один проход.

Но, не смотря на все вышеперечисленные недостатки, предварительные расчёты подтверждают, что срок службы дороги можно продлить более чем на 30 % с помощью самовосстановления в сочетании с другими мерами по уходу.

Заключение

Из полученного материала можно сделать вывод, что самовосстанавливающийся асфальт — это революционное решение для современного дорожно-

го строительства, которое обеспечивает повышенную прочность, снижение затрат на обслуживание и экологическую устойчивость. Благодаря использованию передовых технологий, таких как микрокапсулы, индукционный нагрев, самовосстанавливающийся асфальт обеспечивает потребительские свойства на всём сроке эксплуатации.

Список литературы

1. Асфальт, восстанавливающийся без ремонта. [Электронный ресурс] <https://www.ixbt.com> (дата обращения: 04.05.2025).
2. Самовосстанавливающийся асфальт. [Электронный ресурс] <https://www.petronaftco.com> (дата обращения: 04.05.2025).
3. Микрокапсулы для самовосстанавливающегося асфальта. [Электронный ресурс] <https://healroad.eu> (дата обращения: 04.05.2025).

References

1. Asphalt that is being restored without repair. [Electronic resource] <https://www.ixbt.com> (date of request: 05/04/2025)
2. Self-healing asphalt. [Electronic resource] <https://www.petronaftco.com> (date of request: 05/04/2025).
3. Microcapsules for self-healing asphalt. [Electronic resource] <https://healroad.eu> (date of request: 05/04/2025).

Ерёмин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Кукина Ольга Борисовна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Волокитин Владимир Павлович – канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Корнилов Евгений Владимирович – студент группы САС-191 Воронежского государственного технического университета

Оськин Даниил Максимович – студент группы САС-221 Воронежского государственного технического университета

УДК 666.974

ГЕОПОЛИМЕРНЫЙ БЕТОН

*В.Н. Жуковская, Е.И. Мелехова, А.В. Левченко**

*Воронежский государственный технический университет
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

**Адрес для переписки: Левченко Артем Владимирович, e-mail: Alevchenko@cchgeu.ru*

Статья посвящена инновационному материалу – геополимерному бетону. В работе рассмотрены виды геополимерного вяжущего, этапы получения геополимеров, основные преимущества и свойства геополимерного бетона.

Ключевые слова: геополимерное вяжущее, геополимеры, геополимерный бетон, портландцемент.

GEOPOLYMER CONCRETE

*V.N. Zhukovskaya, E.I. Melekhova, A.V. Levchenko**

*Voronezh State Technical University, Russian Federation
394006, Voronezh, 20th Anniversary of October str., 84*

**Corresponding author: Levchenko Artem Vladimirovich, e-mail: Alevchenko@cchgeu.ru*

The article is devoted to an innovative material – geopolymer concrete. The paper considers the types of geopolymer binders, the stages of obtaining geopolymers, the main advantages and properties of geopolymer concrete.

Keywords: geopolymer binder, geopolymers, geopolymer concrete, portland cement.

Введение

В настоящее время общество часто сталкивается с проблемами, которые напрямую связаны с истощением природных ресурсов, экологической устойчивостью, а также с необходимостью создания новых, экологически чистых и более эффективных материалов.

В связи с этими проблемами, геополимеры привлекают большое внимание инженеров и исследователей, как перспективная альтернатива традиционным материалам.

Геополимеры – это неорганические полимерные материалы, получаемые путем щелочной активации алюмосиликатных источников, таких как метакаолин, доменный шлак, летучая зола и др. [1].

Геополимерное вяжущее. Виды

Классификация геополимерных вяжущих осуществляется по основному сырьевому компоненту [1]. Исходя из этого, выделяют геополимерные вяжущие на основе: золы-уноса (геополимерное вяжущее на основе активированной щелочью золы уноса и геополимерное вяжущее на основе золы-уноса и шлака), шлака, горных пород и ферросилатов.

Геополимерное вяжущее перед портландцементом имеет ряд преимуществ. Эти преимущества заключаются в экологичности, долговечности, в высокой стойкости к воздействию тяжелых металлов и в низком выделении углекислого газа при производстве геополимерного вяжущего.

Этапы протекания реакции получения геополимеров

Геополимерные материалы получают в процессе реакции геополимеризации алюмосиликатных соединений в условиях высокой щелочной среде [1].

Данный процесс состоит из трех главных этапов: 1) растворение оксидов кремния и алюминия в концентрированном растворе NaOH или KOH (щелочная среда); 2) расщепление сложных природных полимерных структур на более простые мономерные составляющие; 3) полимеризация мономеров. В результа-

те этого происходит схватывание и уплотнение, а затем формируется конечный полимерный материал [1].

Геополимерный бетон. Основные сведения

Бетон является основным конструкционным материалом для всех видов строительства. Геополимерный бетон – это инновационный строительный материал. Благодаря своим уникальным свойствам и преимуществам, он получил широкое применение в строительстве. Геополимерный бетон обладает высокими прочностными характеристиками и экологической безопасностью [2].

Таблица 1

Состав геополимерного бетона с процентными соотношениями

Компонент	Содержание (вес. %)	Роль в геополимерном бетоне
Зольная пыль (метакаолин, пепел и т.д.)	20-35	Основной источник алюмосиликатов; активирует процесс геополимеризации.
Вода	15-20	Гидратация компонентов; образование специального раствора для активации геополимеризации.
Гидроксид калия	5-10	Обеспечивает щелочную среду, необходимую для активации реакции между зольной пылью и жидким стеклом, что приводит к образованию полимерных связей.
Жидкое стекло (натриевое или калиевое)	30-40	Связующий агент; обеспечивает структурную интеграцию материала.
Шлак (при наличии)	5-15	Улучшение свойств (прочность, устойчивость); не является обязательным компонентом.

Геополимерный бетон был впервые представлен французским ученым Джозефом Давидовичем в 1978 году. Инновационная идея современного строительного материала заключалась в замене портландцемента геополимерами, такими как силикаты и алюмосиликаты, активированные щелочи.

В зависимости от назначения и дизайна, геополимерный бетон имеет различный внешний вид: форма, текстура, цвет.

Компоненты, входящие в состав геополимерного бетона с приблизительными процентными соотношениями представлены в таблице 1.

Свойства геополимерного бетона

Основные свойства геополимерного бетона и портландцемента приведены в таблице 2.

Таблица 2

Свойства геополимерного бетона и портландцемента

Свойство	Геополимерный бетон	Портландцементный бетон
Прочность на сжатие (МПа)	50-80	20-40
Прочность на изгиб (МПа)	8-12	3-5
Предел огнестойкости (часы)	4	1.5
Выбросы CO ₂ (относительно ПЦ)	-60 % до -80 %	100%

Проанализировав сравнительные характеристики из таблицы 2, можно сделать вывод, что геополимерный бетон значительно превосходит портландцементный бетон по прочности на сжатие и на изгиб. А также геополимерный бетон обладает более высокой огнестойкостью. Производство геополимерного бетона характеризуется меньшими выбросами CO₂.

Основные положения

Геополимерный бетон, изготавливаемый с использованием зольной пыли (ранее не применявшейся в этой роли), демонстрирует улучшенные эксплуатационные характеристики. Его свойства исследуются в соответствии со стандартами, разработанными для бетонов на основе портландцемента [3].

В отличие от портландцемента, геополимерный бетон характеризуется меньшей усадкой и улучшенной сжимаемой прочностью.

Эти характеристики напрямую связаны с составом и соотношением применяемых исходных материалов.

Исследования подтвердили, что наибольшая прочность наблюдается при применении раствора гидроксида натрия с повышенной концентрацией.

Рост концентрации гидроксида натрия способствует усилению сжимаемой прочности геополлимерного бетона [4].

Для повышения удобоукладываемости бетонной смеси целесообразно использовать суперпластификатор на основе нафталинового сульфоната. Рекомендуемая дозировка составляет 2 % от массы золы-уноса, обеспечивая хорошую удобоукладываемость без ущерба для прочности. При увеличении дозировки до 4% наблюдается снижение прочностных характеристик.

Ключевым соотношением воды к твердым веществам в геополлимерном вяжущем влияет на свойства геополлимерного бетона. При расчете водоотнесения учитывается вода, содержащаяся в компонентах вяжущего (силикате натрия, гидроксиде натрия и собственно воде). К твердым веществам относятся суммарное количество твердых частиц гидроксида натрия и силиката натрия. Для достижения повышенной прочности бетонных изделий целесообразно увеличить время термообработки до 24 часов и больше. Ускоренное затвердевание под воздействием тепла возможно как в среде с низкой влажностью, так и при ее наличии. Эксперименты продемонстрировали, что отверждение в сухой среде приводит к увеличению прочности на сжатие на 15% по сравнению с обработкой паром в автоклаве. Данный подход дает возможность уменьшить температурный режим, необходимый для твердения бетона. в сухих условиях на 30 °С. В условиях тропического климата возможно твердение в естественной среде [5].

Преимущества геополлимерного бетона.

Экологичность: Значительное снижение (до 90%) выбросов парниковых газов.

Устойчивость: Повышенная устойчивость к воздействию кислот и высоких температур (до 1300 °С), превосходящая характеристики портландцемента.

Низкая проницаемость: Практически равна проницаемости гранита.

Утилизация отходов: Использование золы-уноса, побочного продукта промышленных предприятий, способствует решению экологических проблем.

Простота применения:

Геополимерный бетон по своей структуре напоминает натуральный камень и обладает улучшенными свойствами по сравнению с обычным бетоном, что упрощает процесс строительства [2].

Преимущества перед обычным бетоном

1. В отличие от обычного бетона, геополлимер демонстрирует более быстрое схватывание и набор прочности, что является важным преимуществом при строительстве. Для достижения аналогичной прочности геополлимеру требуется всего 10 дней, в то время как бетону – 30. В отличие от обычного бетона, геополлимер демонстрирует ускоренное твердение и набор прочности, достигая оптимальных показателей в три раза быстрее.

2. Экологичность.

Геополимер – экологически безопасный материал, созданный на основе природных компонентов, что делает его безвредным для здоровья человека и окружающей среды. Благодаря своему природному составу, геополлимер является экологически чистым строительным материалом, не оказывающим негативного воздействия на окружающую среду и здоровье людей [6].

3. Долговечность и устойчивость к внешним воздействиям.

Геополимер отличается высокой долговечностью и устойчивостью к экстремальным температурам, выдерживая нагрев до 1300 градусов. Этот материал обладает исключительной стойкостью к внешним факторам и способен сохранять свои свойства даже при воздействии высоких температур (до 1300 градусов), обеспечивая долговечность конструкций.

4. Морозостойкость.

Геополимер обладает высокой морозостойкостью и не подвержен разрушению при резких колебаниях температуры. Благодаря своей морозостойкости,

геополимер идеально подходит для использования в условиях сурового климата, где наблюдаются частые перепады температур.

5. Низкая теплопроводность.

Геополимер обладает низкой теплопроводностью, что позволяет эффективно сохранять тепло внутри помещений, снижая затраты на отопление. Низкая теплопроводность геополимера обеспечивает отличную теплоизоляцию, предотвращая утечку тепла из здания и способствуя созданию комфортного микроклимата.

6. Высокая прочность.

По прочности геополимер не уступает граниту, что позволяет использовать его для строительства многоэтажных зданий. Геополимер – это высокопрочный материал, сопоставимый с гранитом, что делает его надежным выбором для возведения высотных сооружений.

7. Удобство в строительстве.

Геополимер удобен в использовании благодаря малой усадке и быстрому затвердеванию, что упрощает и ускоряет строительные работы.

Быстрое затвердевание и минимальная усадка делают геополимер практичным и удобным материалом для строительства, сокращая сроки выполнения работ.

Состав геополимеров

Состав геополимеров рассмотрим на примере терморезактивных композиционных материалов.

Терморезактивные полимерные связующие представляют собой двух- или многокомпонентные системы, включающие синтетическую смолу (полимерную или олигомерную часть) и отвердители либо инициаторы, катализаторы, ускорители процесса отверждения [7].

Часто в составе терморезактивных полимерных связующих также присутствуют пассивные или активные растворители (разбавители), пигменты и красители, пластификаторы, стабилизаторы и прочие компоненты, добавляемые с

целью придания связующим и полимерному композиционному материалу требуемых технологических и эксплуатационных характеристик.

Состав связующего определяется механизмом протекания реакции отверждения и необходимыми механическими характеристиками затвердевшего продукта [3].

Для создания композиционных материалов обычно применяют полиэфирные, эпоксидные или фенолоформальдегидные связующие, как наиболее эффективные варианты, обладающие достаточно высокими показателями прочности в затвердевшем состоянии и не выделяющие значительного количества вредных веществ. Полиэфирмалеаты (полиэфирные смолы) — вязкие жидкости или твердые вещества в зависимости от состава, химической структуры и молекулярной массы. Температура и скорость отверждения определяются выбором типа инициатора и ускорителя. Для низкотемпературного отверждения чаще всего используют перекись бензоила или гидроперекись изопропилбензола (гипериз), а для высокотемпературного — трет-бутилпербензоат. [8].

К эффективным ускорителям, используемым вместе с перекисью бензоила, относятся третичные амины, такие как диметиламин, диэтиламин и диэтиламин. В сочетании с гидроперекисями применяются кобальтовые соли нафтенных и других кислот, к примеру, нафтенат кобальта, который выпускается в виде стирольного раствора под наименованием «ускоритель НК». [9].

Неотвержденные эпоксидные смолы [10] представляют собой вязкие жидкости или хрупкие твердые вещества, которые легко растворяются и плавятся. Они обладают высокой адгезией к различным материалам и минимальной усадкой во время процесса отверждения. [11, 12]

Отвердители для эпоксидных смол могут быть представлены аминами, такими как полиэтиленполиамин, гексаметилендиамин и пиридин, которые относятся к отвердителям холодного отверждения. Также существуют кислотные отвердители, например, малеиновый и фталевый ангидриды, которые используются в процессе горячего отверждения. Неотвержденные фенолоформальдегидные смолы имеют форму вязкой жидкости или твердой хрупкой прозрачной

аморфной массы, которая при температурах в диапазоне от 60 до 120 градусов Цельсия легко переходит в жидкое состояние. [13].

Подготовка термореактивного связующего в лабораторных условиях и расчет массы компонентов. Процесс изготовления полимерного связующего в лаборатории включает в себя точное дозирование массы каждого компонента, что является ключевым фактором для получения качественного продукта.

Связующее, как правило, представляет собой многокомпонентную систему, включающую смолу, отвердитель, катализатор, пластификатор и другие добавки. Оптимальный состав связующего может быть определен как путем экспериментальных исследований, так и с помощью расчётных методов. Важно строго соблюдать рецептуру и пропорции компонентов, указанные в технологической документации. [3, 9].

Общая необходимая масса компонентов, принимая во внимание возможные потери (приблизительно 10%), определяется как сумма массовых долей всех ингредиентов. Пропорции компонентов вычисляются с использованием соответствующих математических соотношений.

Процесс смешивания компонентов со смолой должен быть постепенным. Необходимо тщательно перемешивать смесь до достижения однородности, избегая при этом образования воздушных пузырьков. Отвердитель добавляется в последнюю очередь.

Если используется смола высокой вязкости, её предварительно нагревают до 80 °С, а затем вводят пластификатор или разбавитель [14].

При работе со связующим следует соблюдать меры предосторожности, так как в процессе отверждения возможно значительное повышение температуры смеси (до 200 °С).

Заключение

Многочисленные исследования геополимерных вяжущих материалов показывают, что их технология и свойства отличаются от традиционно используемого портландцемента. Геополимерный бетон представляет собой перспек-

тивную альтернативу портландцементу для устойчивого строительства. Геополимерный бетон, благодаря своим высоким техническим характеристикам, экологической безопасности и возможности использования промышленных отходов, может сыграть важную роль в создании более долговечного и устойчивого будущего.

Список литературы

1. Ерошкина Н.А., Коровкин М.Ю. Геополимерные строительные материалы на основе промышленных отходов: моногр. Пенза: ПГУАС, 2014. 128 с.
2. Дудников А.Г., Дудников М.С., Реджани А. Геополимерный бетон и его применение // Технологии. Строительные, материалы, оборудование, технологии XXI века. Краснодар, 2018. С. 38 – 45.
3. Корнеев В.И., Брыков А.С. Перспективы развития общестроительных вяжущих веществ. Геополимер и их отличительные особенности // Наука и производство. Цемент и его применение. Санкт-Петербург: СПбГТИ (ТУ), 2010. С. 51 – 55.
4. Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications. 3rd eddition. France, Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 2011. 614 p.
5. Davidovits J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs // Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia.
6. Davidovits J. Geopolymers and geopolymeric materials // Journal of Thermal Analysis. 1989. V. 35. Pp. 429 – 441.
7. Davidovits J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials // Journal of Materials Education. 1994. V. 16 (2,3). Pp. 91–138.
8. Горбатская Л.В., Гамалеев Н.А., Котов В.Д. Геополимерные материалы в строительстве: свойства, применение, перспективы. Москва: Наука, 2012.
9. Любин Дж. Справочник по композиционным материалам: в 2 т. / под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1989. 2 т.

10. Прокопьев А.Н., Султанов А.А., Громов В.П. Геополимерные материалы в строительстве: научно-технический справочник. Москва: Техносфера, 2020.
11. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Тымчук Е.И. Структурообразование геополимеров // Молодой ученый. 2015. №7. С. 123126.
12. Кулезнев В.Н., Власов С.В., Кандырин Л.Б., и др. Основы технологии переработки пластмасс: учеб. для вузов. М.: Химия, 2004. 600 с.
13. Дерягин Б.В., Кротова Н. А., Адгезия, М.— Л., 1949. 244 с.
14. Берлин А.А., Басин В.Е., Основы адгезии полимеров. М., 1969. 319 с.

References

1. Eroshkina N.A., Korovkin M.Y. Geopolymer building materials based on industrial waste: monographs. Penza: PGUAS, 2014. 128 p. (in Russian)
2. Dudnikov A.G., Dudnikov M.S., Rejani A. Geopolymer concrete and its application // Technologies. Construction, materials, equipment, technologies of the XXI century. Krasnodar, 2018. Pp. 38 – 45. (in Russian)
3. Korneev V.I., Brykov A.S. Prospects for the development of general building binders. Geopolymer and their distinctive features // Science and production. Cement and its application. Saint Petersburg: SPbGTI (TU), 2010. Pp. 51 – 55. (in Russian)
4. Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications. 3rd edition. France, Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 2011. 614 p.
5. Davidovits J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs // Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia.
6. Davidovits J. Geopolymers and geopolymeric materials // Journal of Thermal Analysis. 1989. V. 35. Pp. 429 – 441.
7. Davidovits J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials // Journal of Materials Education. 1994. V. 16 (2,3). Pp. 91 – 138.
8. Gorbatskaya L.V., Gamaleev N.A., Kotov V.D. Geopolymer materials in construction: properties, application, prospects. Moscow: Nauka, 2012. (in Russian)

9. Lyubin J. Handbook of composite materials: in 2 volumes. M.: Mashinostroenie, 1989. 2 vol. (in Russian)
10. Prokopiev A.N., Sultanov A.A., Gromov V.P. Geopolymer materials in construction: a scientific and technical reference book. Moscow: Technosphere, 2020. (in Russian)
11. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Tymchuk E.I. Structure formation of geopolymers // Young scientist. 2015. No. 7. Pp. 123126. (in Russian)
12. Kuleznev V.N., Vlasov S.V., Kandyrin L.B., and others. Fundamentals of plastic recycling technology: textbook. for universities. M.: Chemistry, 2004. 600 p. (in Russian)
13. Deryagin B.V., Krotov N.A., Adhesion, M. – L, 1949. 244 p. (in Russian)
14. Berlin A.A., Basin V.E., Fundamentals of polymer adhesion. Moscow, 1969. 319 p. (in Russian)

Жуковская Валентина Николаевна – студент 1 курса, Воронежский государственный технический университет

Мелехова Евангелина Игоревна – студент 1 курса, Воронежский государственный технический университет

Левченко Артем Владимирович – доцент, кандидат технических наук, Воронежский государственный технический университет

УДК 691, 625.7

**ОБРАБОТКА ПОКРЫТИЯ И ОСНОВАНИЯ ИЗ КАМЕННЫХ
МАТЕРИАЛОВ СОСТАВОМ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ
С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

А.В. Ерёмин, О.Б. Кукина, О.А. Волокитина, Е.В. Корнилов, Д.М. Оськин*

*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

**Адрес для переписки: Корнилов Евгений Владимирович, e-mail: jenua8885@gmail.com*

Изучено влияние пропитки на основе диоксида кремния на гранитный, шлаковый и известняковый щебень. Экспериментально доказано, что после применения пропитки каменный материал приобрёл гидрофобные свойства. Благодаря этому увеличился показатель морозостойкости. Так же отмечено, что применение пропитки способствует меньшему пылеобразованию, что доказывает пригодность данной жидкости для обеспыливания дорожного покрытия из каменного материала, необработанного вяжущим.

Ключевые слова: щебёночное основание и покрытие, диоксид титана, диоксид кремния, строительство дорожной одежды.

**TREATMENT OF COATINGS AND BASES MADE OF STONE MATERIALS WITH A
COMPOSITION BASED ON SILICON DIOXIDE IN ORDER TO INCREASE PHYSICAL
AND MECHANICAL PROPERTIES**

A.V. Eremin, O.B. Kukina, O.A. Volokitina, E.V. Kornilov, D.M. Oskin*

*Voronezh State Technical University, ul. 20-letia Oktjabria, 84, Voronezh, 394006,
Russian Federation*

** Corresponding author: Evgeny V. Kornilov, e-mail: jenua8885@gmail.com*

The effect of silicon dioxide-based impregnation on granite, slag and limestone rubble has been studied. It has been experimentally proven that after the application of impregnation, the stone material acquired hydrophobic properties. Due to this, the frost resistance index has increased. It was also noted that the use of impregnation contributes to less dust formation, which proves the suitability of this liquid for dedusting pavement made of stone material untreated with a binder.

Keywords: crushed stone base and coating, titanium dioxide, silicon dioxide, road surface construction.

Введение

Щебень – это наиболее распространённый материал для строительства слоя основания дорожной одежды. Так же из щебня устраивают слои покрытия на дорогах, которые не рассчитаны на постоянные нагрузки, к примеру, дороги в частном секторе или временные дороги. Дорожно-строительный материал должен обладать перечнем важных требований таких как: прочность, морозостойкость, истираемость, обладать заданными формой и размерами. Но не всегда есть возможность применять нужный материал ввиду его отсутствия, ведь очень весомую долю в сметной стоимости составляет доставка нужного материала на трассу. Для увеличения физико-механических свойств исходного материала можно применить специальные пропитки. В данной статье рассмотрим один из вариантов пропитки на основе диоксида кремния.

Экспериментальная часть.

Диоксид кремния (SiO_2) – это химическое соединение кремния и кислорода. Он довольно распространён в природе (рис. 1). Его содержание в земной коре составляет 12% от массы. Диоксид кремния применяют в различных сферах жизнедеятельности, в том числе и строительстве. Например, SiO_2 основной элемент при производстве стёкол и бетонных конструкций. Он позволяет снизить расслаиваемость бетонной смеси и ускоряет гидратационные процессы. Основные свойства диоксида кремния как химического элемента, это нерастворимость в воде и химическая стабильность.

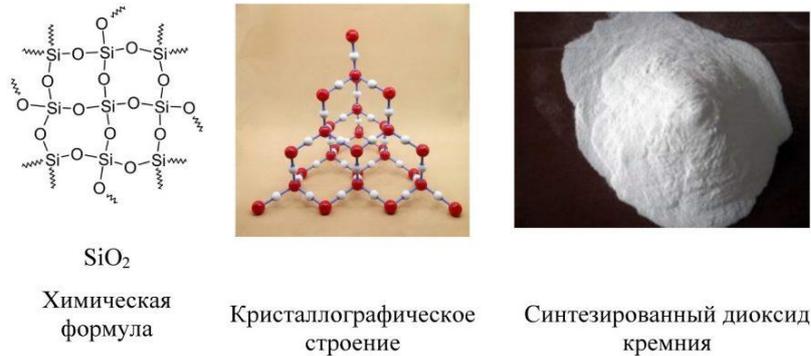


Рис. 1. Строение диоксида кремния (SiO₂)

В нашем составе диоксид кремния отвечает за придание материалу гидрофобных свойств, что позволяет получать меньший вред от зимнего реагента (рис. 2).



Рис. 2. Пример работы состава на поверхности каменного материала

Так же диоксид кремния увеличивает прочность дорожно-строительных материалов.

Для получения максимального эффекта от пропитки в составе можно применить диоксид титана (TiO₂). Его функция – обеспечить максимальную адгезию состава с дорожно-строительным материалом. Так же для увеличения стойкости и физико-механических свойств допускается добавление в состав полимеров или графена для обеспечения максимального срока служба и гидрофобных свойств.

Для объединения всех компонентов состава необходимо применять органической кремниевой растворитель. Это необходимо для придания ДСМ антистатических свойств и минимизации пылеобразования на покрытии (рис. 3).

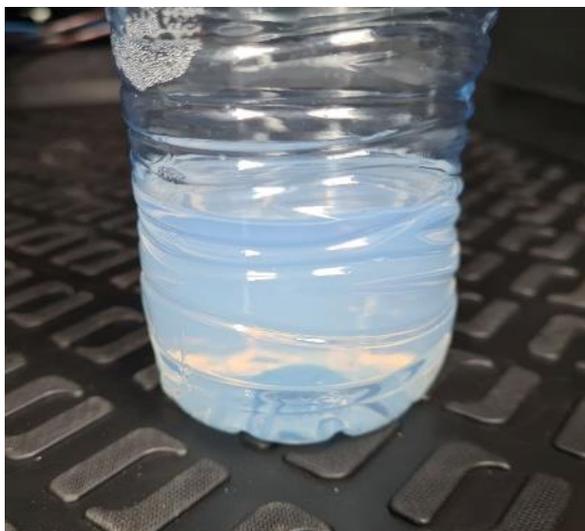


Рис. 3. Состав на основе диоксида кремния (SiO_2)

Результаты и их обсуждение

Пропитка на основе диоксида кремния при смешивании с щебёночным материалом показала хорошую адгезию. В результате испытаний по морозостойкости было определено, что обработанный материал выдерживает на 15-20% больше циклов, чем необработанный. Этому способствует свойство гидрофобности. Так же отмечено, что при испытании на определение марки по прочности, материал показывает более лучший результат. Пропитка на основе диоксида кремния позволяет применять в качестве покрытия и основания материал, который по физико-механическим показателям не проходил по требованиям нормативной документации.

Заключение

На основе полученных исследований можно сделать вывод, что пропитка на основе диоксида кремния позволяет расширить область применения щебня, физико-механические свойства которого по тем или иным причинам не подхо-

дили для устройства слоёв дорожной одежды. Так же данный состав позволяет поддерживать дороги из щебня в обеспыленном состоянии и уменьшить период обработки щебёночных покрытий.

Список литературы

1. ГОСТ 10834-76 Жидкость гидрофобизирующая. Технические условия. М., 1976. 16 с. (Система стандартов по информ., библи. и изд. делу).
2. ГОСТ 32703-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования. М., 2014. 15 с. (Система стандартов по информ., библи. и изд. делу).
3. ГОСТ 9428-73 Реактивы. Кремний (IV) оксид. Технические условия. М., 1973. 15 с. (Система стандартов по информ., библи. и изд. делу).

References

1. GOST 10834-76 Hydrophobic liquid. Technical specifications. Moscow, 1976. 16 pages . (The system of standards for inform., Bibl. and ed. to the case)
2. GOST 32703-2014 Public roads. Crushed stone and gravel from rocks. Technical requirements. Moscow, 2014. 15 p. (The system of standards for inform., Bibl. and ed. to the case).
3. 3. GOST 9428-73 Reagents. Silicon (IV) oxide. Technical specifications. Moscow, 1973. 15 p . (The system of standards for inform., Bibl. and ed. to the case).

Ерёмин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Кукина Ольга Борисовна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Волокитина Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета

Корнилов Евгений Владимирович – студент группы САС-191 Воронежского государственного технического университета

Оськин Даниил Максимович – студент группы САС-221 Воронежского государственного технического университета

УДК 691

**РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ МОДИФИЦИРОВАННОГО
ДОБАВКАМИ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА
ДЛЯ МОНОЛИТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

Ю.В. Макушина, Н.А. Белькова, П.В. Полегенько

*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

**Адрес для переписки: Белькова Наталья Анатольевна, e-mail: verlnata@mail.ru*

В работе приведены результаты разработки составов модифицированного тяжелого бетона для монолитного строительства, обеспечивающих твердение и набор прочности конструкций в широком диапазоне температур (от 30 до 5 °С). Это позволяет ускорить процесс возведения зданий и сооружений за счет быстрого достижения распалубочной прочности бетона. На данном этапе в работе приведены результаты исследований процессов раннего структурообразования и кинетики твердения цементных систем и бетонов, модифицированных двумя добавками: «Sika® Antifreeze LS» (производство фирмы «Sika», Швейцария) и «Оптим Гранд Т.30». Полученные составы могут найти применение не только для возведения монолитных сооружений, но и в условиях заводского производства железобетонных конструкций.

Ключевые слова: монолитный бетон, добавки-ускорители твердения, прочность при сжатии, кинетика твердения.

**DEVELOPMENT OF MODIFIED HEAVY CONCRETE
ADDITIVES FOR CAST-IN-SITU CONSTRUCTION**

Yu.V. Makushina, N.A. Bel'kova, P.V. Polegenko

**Corresponding author: Belkova Natalya Anatolyevna, e-mail: verlnata@mail.ru*

The paper presents the results of the development of compositions of modified heavy concrete for monolithic construction, providing hardening and strength gain of structures in a wide temperature range (from 30 to 5 °C). This makes it possible to speed up the process of erecting buildings and structures by quickly achieving the stripping strength of concrete. At this stage, the work presents the results of studies of the processes of early structure formation and kinetics of hardening of cement systems and concretes modified with two additives: Sika® Antifreeze LS (manufactured by Sika, Switzerland) and Optima Grand T. 30. The obtained compositions can be used not only for the construction of monolithic weapons, but also in the conditions of factory production of reinforced concrete structures.

Keywords: monolithic concrete, hardening accelerator additives, compression strength, hardening kinetics.

Введение

Монолитный бетон – универсальный строительный материал, объемы производства которого из года в год растут. Монолитные конструкции отличаются высокой прочностью, способны обеспечить достаточную тепло-, звуко-, гидроизоляцию зданий и сооружений [1, 2]. Область применения монолитного бетона достаточно широкий: начиная от возведения зданий (жилых и общественных), хозпостроек, создания малых архитектурных форм. Однако процесс изготовления монолитных конструкций весьма длителен, трудоемок и дорог. Так выделяют два основных периода (в зависимости от величины температуры окружающей среды): летний (при температурах выше +10 °C) и зимний (при среднесуточной температуре ниже +5 °C). Обеспечение высоких темпов строительства, повышение качества и снижение себестоимости производства бетонных работ в зимних условиях требует от строителей совершенствования старых методов зимнего бетонирования и разработки новых, с более высокими экономическими показателями.

Основной проблемой является обеспечение качества монолитного бетона, а также увеличение темпов строительства. Помимо этого, проблемой является обеспечение заданных сроков возведения объекта за счет интенсификации процессов твердения. Самым распространенным методом ускорения набора прочности бетона является метод тепловой обработки, который используется как при производстве сборных железобетонных конструкций, так и при монолитном строительстве. В современных условиях использование тепловой обработки является дорогостоящим. Достаточно актуальными становятся способы ускорения твердения за счет использования добавок, с помощью которых возможно сокращение или отказ от тепловой обработки [3 – 7].

Другой способ интенсификации твердения бетона заключается в использовании различных химических добавок, вводимых в бетонную смесь. Введение химических добавок в состав бетона – это простой и доступный способ совершенствования его свойств. При этом модифицирование бетона химическими добавками позволяет снизить затраты на изготовление продукции, а также повысить их качество как при монолитном, так и сборном изготовлении конструкций.

В настоящее время в строительстве широко используются комплексные добавки, действие которых направлено на придание бетону или бетонной смеси дополнительных свойств совместно с базовыми в зависимости от поставленной цели. Современные модификаторы представляют собой комплекс «пластификатор + ускоритель твердения» [8 – 11]. Механизм действия добавок-ускорителей схватывания цемента и твердения бетона заключается в активизации процесса гидратации цемента [9]. Ускоряющий компонент добавок обеспечивает ускоренное образование субмикрочастиц гидратации (гидросиликатов кальция и алюминия), обладающих высокой прочностью и скрепляющих бетонную смесь в единый композит. Пластифицирующий компонент комплексных добавок проявляет эффект снижения расхода воды при сохранении неизменной подвижности смеси, что позволяет снизить время предварительной выдержки, что тоже вкладывает свою лепту в процессы твердения. При

этом существенно облегчается процесс формования бетонных изделий. Все эти моменты особенно существенны при монолитном способе возведения зданий.

Цель исследований: оптимизация составов модифицированного добавками цементного бетона для монолитного строительства.

Исследования проводились в несколько этапов:

- на первом этапе исследования проводились на модельной системе (цементно-водной дисперсии) на ранней стадии структурообразования;

- на втором этапе исследования проводились на системе тяжелый бетон на этапе твердения и набора прочности (исследовалось влияние вида и расхода добавок на свойства материала и кинетику твердения).

Экспериментальная часть

Вязущем веществом в экспериментальных исследованиях являлся цемент ЦЕМ I 42,5Н от компании ООО «ЦЕМРОС». В качестве заполнителей использовались: песок кварцевый с модулем крупности 2,2 и щебень гранитный фракции 5...20 мм. В качестве добавок-модификаторов использовались: комплексная пластифицирующая добавка на основе комплексного поликарбоксилатного эфира – «Оптима-гранд Т.30» и комплексная пластифицирующая и водоредуцирующая добавка-ускоритель твердения для бетонов и растворов, обладающая противоморозным эффектом – «Sika® Antifreeze LS».

Изучение влияния количества воды, вида и расхода добавок на процесс формирования ранней структуры свободноуложенной цементно-водной системы осуществлялся путем построения кривой плотности системы «цемент-вода-добавка» при В/Ц-отношениях от 0,02 до 0,6. Шаг по В/Ц-отношению составлял 0,03. Далее проводилась оценка водоредуцирующей способности добавок. Для выбранных оптимальных дозировок добавок изготавливались образцы их тяжелого бетона при проектируемом классе В25 и подвижности бетонной смеси ПЗ. На лабораторных образцах определялись: предел прочности при сжатии, средняя плотность.

Прочностные характеристики образцов оценивались через 1, 3, 7 и 28 суток их твердения в нормальных температурно-влажностных условиях на электромеханической испытательной системе INSTRON 5982 с автоматической обработкой данных в «Bluehill Elements» (программное обеспечение, построенное на платформе Bluehill, отвечает требованиям испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, срез и сдвиг).

Результаты и их обсуждение

Исследования начинались с изучения влияния В/Ц-отношения на процессы структурообразования цементно-водной дисперсии с различным количеством добавок на ранней стадии – стадии приготовления смеси и ее схватывания (рис. 1). Установлено, что кривая плотности цементно-водной системы с добавками повторяет кривую для эталона: так же наблюдаются участки разуплотнения и уплотнения дисперсии от действия внутренних сил. Введение добавок-пластификаторов приводит к частичному высвобождению части воды затворения из сольватных оболочек и переводу ее в капиллярное состояние. Все это позволяет проявиться максимуму капиллярного эффекта при более низких значениях В/Ц-отношений. Увеличение расхода добавки до 1 % приводит к снижению максимального значения плотности, что говорит о достижении точки критической концентрации мицеллообразования (ККМ). Это подтверждает и ранее проведенными (в том числе и нами) исследованиями [12, 13].

Водоредуцирующий эффект добавок оценен также по снижению В/Ц-отношения, соответствующего нормальной густоте цементного теста (рис. 2). Установлено, что добавка «Оптима-гранд Т.30» является более эффективной, чем добавка «Sika[®] Antifreeze LS». По полученным данным видно, что введение добавки «Оптима-гранд Т.30» снижает значение В/Ц-отношения, соответствующее нормальной густоте с 0,32 до 0,22 (примерно на 30%). Для системы с добавкой «Sika[®] Antifreeze LS» снижение В/Ц-отношения составило всего 20 % при больших расходах добавки.

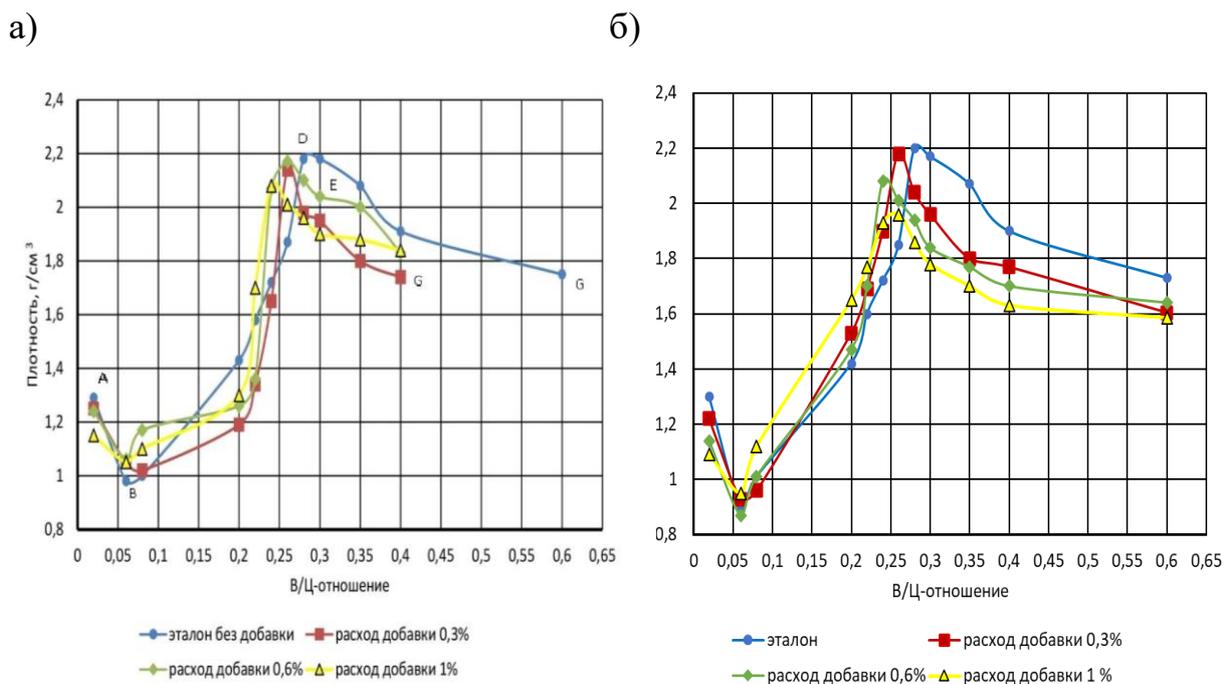


Рис. 1. Кривые плотности цементно-водной дисперсии
а) с добавкой «Оптима-гранд Т.30»; б) с добавкой «Sika® Antifreeze LS».

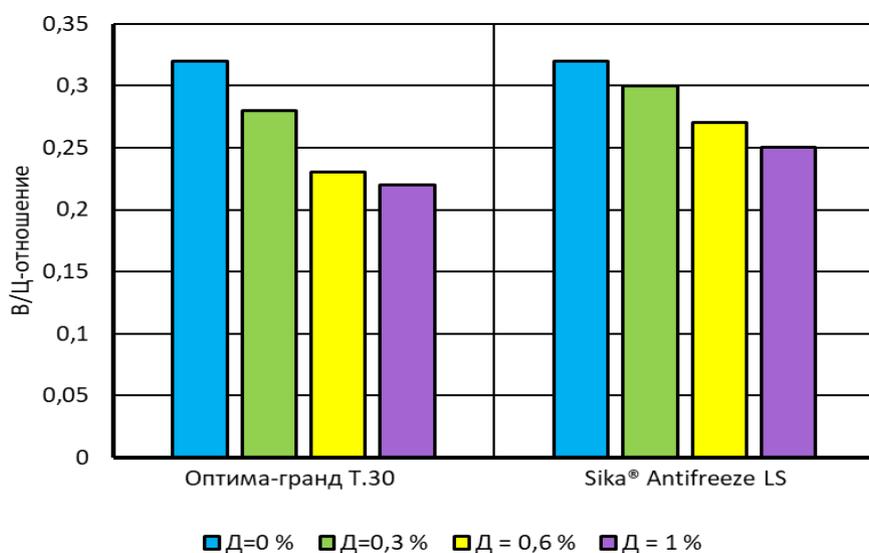


Рис. 2. Влияние вида и расхода добавки на В/Ц-отношение
нормальной густоты цементного теста.

Далее были проведены исследования влияния вида и расхода добавки на процессы набора прочности бетоном (рис. 3).

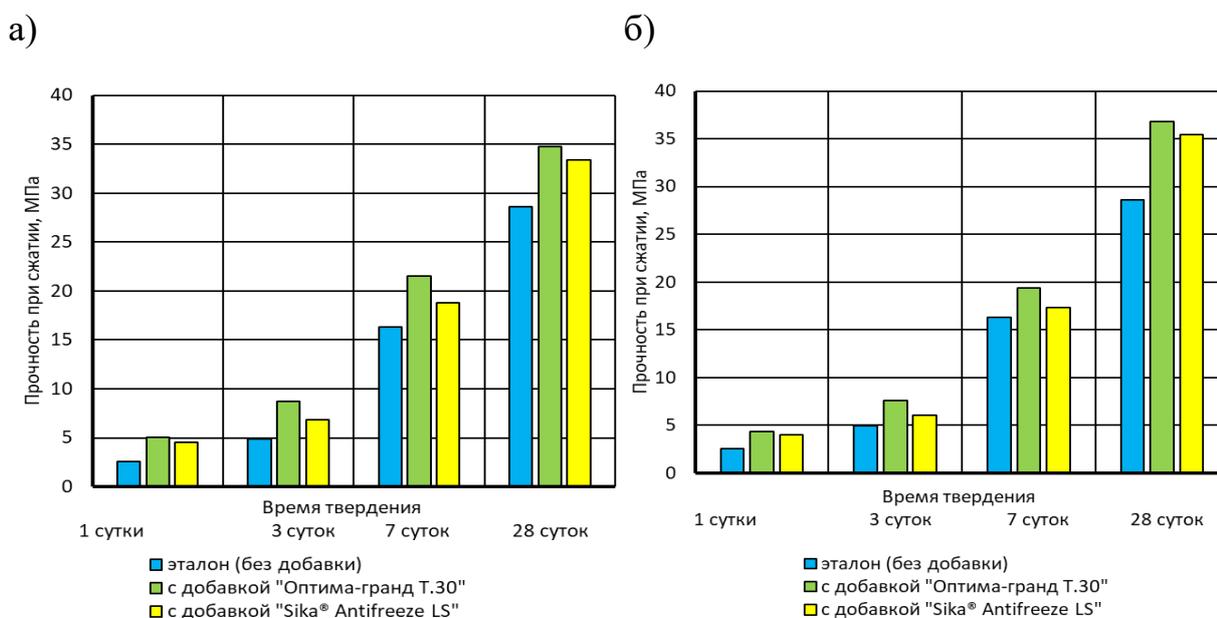


Рис. 3. Зависимости прочности бетона от вида и расхода добавок и сроков твердения: а) расход добавок 0,6 %; б) расход добавок 1 %.

Установлено, что в первые сутки твердения прочность повышается с 2,56 МПа до 4,32 МПа (для Оптима-гранд Т.30) и 3,98 МПа (для «Sika® Antifreeze LS») при расходе добавки 0,6%, то есть на примерно в полтора раза. При повышении расхода добавок до 1 % прочность повышается примерно в два раза. То есть наблюдается явное ускорение твердения бетона. В возрасте 3 и 7 суток наблюдается также повышение прочности бетона с добавками по сравнению с эталоном. При этом увеличение расхода добавок до 1 % относительно мало сказывается на ускорении процессов гидратации и твердения цемента. Так, прочность бетона в возрасте 3 суток с добавкой «Оптима-гранд Т.30» при расходе 0,6 % составила 8,7 МПа, а при расходе 1 % - 7,63 МПа, что составляет около 10 % и не превышает ошибки опыта. То есть подтверждаются наши результаты о достижении точки КKM при этом расходе за счет действия поверхностно-активного компонента добавок и ее замедляющем твердение действии.

В возрасте 28 суток прочность бетона с добавками превышает прочность эталона примерно на 20...25 % (например, прочность бетона с добавкой «Оптима-гранд Т.30» в количестве 0,6 % составила 34,8 МПа, а у эталона 28,6 МПа). То есть можно говорить о повышении класса бетона с заявленного в рас-

четах В25 до В30. Это объясняется снижением В/Ц-отношения, так как в исследованиях использовались равноподвижные бетонные смеси. С экономической точки зрения это говорит о возможности сокращения расхода цемента.

Заключение

В целом можно сказать, что наиболее эффективной как с точки зрения проявления пластифицирующего эффекта, так и в качестве ускорителя твердения бетона является добавка «Оптима-гранд Т.30». При этом оптимальной дозировкой для обеих добавок можно считать расход 0,6% от массы цемента. Определено направление дальнейших исследований: изучение влияния добавок-модификаторов на процессы твердения при пониженных температурах.

Список литературы

1. Кармаза М.В., Мотылев Р.В. Зимнее бетонирование и ускорение твердения бетона // Аллея науки. 2018. Т. 2, № 5(21). С. 460 – 465.
2. Лазаренко Д.Ю. О способах ускорения процесса твердения монолитного бетона при возведении многоэтажных каркасных зданий // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук : Сборник докладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 года. Том Часть 6. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. С. 192 – 196.
3. Кармаза М.В., Мотылев Р.В. Совершенствование технологий зимнего бетонирования при устройстве монолитных конструкций // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XIX Международной научно-практической конференции: в 2 ч., Пенза, 15 января 2019 года. Том Часть 1. Пенза: «Наука и Просвещение», 2019. С. 192 – 195.
4. Харун М.И., Коротеев Д.Д., Левицкая А.Ю., и др. Термическая обработка бетона в монолитном строительстве // Инновации в науке и практике:

сборник статей по материалам XV международной научно-практической конференции, Барнаул, 21 марта 2019 года. Том Часть 1(2). Барнаул: Общество с ограниченной ответственностью Дендра, 2019. С. 36 – 44.

5. Салманов В.Н. Методы ускорения твердения бетона в условиях низких температур // Современные научные исследования и разработки. 2018. № 10(27). С. 781 – 783.

6. Зеленковская Ж.Л., Ковшар С.Н. Назначение и обоснование традиционных режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 2. С. 150 – 157.

7. Зверева А.И., Швец В.А., Овчаренко Г.И., и др. Ускорение твердения бетона паллетного производства плит зданий КПД // Ползуновский альманах. 2022. № 2-2. С. 60 – 61.

8. Белов В.В., Смирнов М.А. Влияние химической добавки ЦМИД-4 на водоредуцирование и кинетику твердения цементных систем // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2019. № 2(2). С. 13 – 18.

9. Bullard J.W., Jennings H.M., Livingston R.A. et al. Mechanisms of cement hydration // Cement and Concrete Research. 2011. № 41. P. 1208 – 1223.

10. Воронин В.В., Шувалова Е.А., Одинцов А.А., и др. Применение добавок для ускорения набора прочности как альтернатива тепловлажностной обработке бетона // Транспортные сооружения. 2018. Т. 5. № 2. С. 10.

11. Лешканов А.Ю., Добшиц Л.М., Анисимов С.Н., и др. Структурообразование пластифицированных цементных систем в условиях тепловлажностной обработки // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2022. № 3. С. 7 – 17.

12. Артамонова О.В., Верлина Н.А., Кретинина В.Н. Изучение процессов раннего структурообразования модифицированного цементного камня // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2016. № 1(12). С. 3 – 8.

13. Костылева А.С. О возможностях использования наномодифицирующих добавок при отрицательных температурах // Международный студенческий строительный форум-2017: Сборник докладов: в 2 томах. Том 2. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. С. 288 – 291.

Reference

1. Karmaza M.V., Motylev R.V. Winter concreting and acceleration of concrete hardening // *Alley of Science*. 2018. V. 2. No. 5 (21). Pp. 460 – 465. (in Russian)

2. Lazarenko D. Yu. On ways to accelerate the process of hardening monolithic concrete during the construction of multi-storey frame buildings // *International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V.G. Shuhova, dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences: Collection of reports of the National Conference with international participation, Belgorod, May 18-20 2022. Volume Part 6. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2022. Pp. 192 – 196. (in Russian)*

3. Karmaza M.V., Motylev R.V. Improvement of winter concreting technologies in the construction of monolithic structures // *Fundamental and applied scientific research: topical issues, achievements and innovations: collection of articles of the XIX International Scientific and Practical Conference: at 2 o'clock, Penza, January 15, 2019. Volume Part 1. Penza: «Science and Pro-Lighting», 2019. Pp. 192 – 195. (in Russian)*

4. Harun M.I., Koroteev D.D., Levitskaya A.Yu., et al. Heat treatment of concrete in monolithic construction // *Innovations in science and practice: a collection of articles based on materials from the XV international scientific and practical conference, Barnaul, March 21, 2019. Volume Part 1 (2). Barnaul: Dendra Limited Liability Society, 2019. Pp. 36 – 44. (in Russian)*

5. Salmanov V.N. Methods for accelerating concrete hardening at low temperatures // Modern scientific research and development. 2018. No. 10(27). Pp. 781 – 783. (in Russian)
6. Zelenkovskaya Zh. L., Kovshar S.N. Purpose and justification of traditional modes of heat treatment of concrete and reinforced concrete products // Science and Technology. 2023. V. 22. No. 2. Pp. 150 – 157. (in Russian)
7. Zverev A.I., Shvets V.A., Ovcharenko G.I., et al. Acceleration of concrete hardening of pallet production of slabs of KPD // Polzunovsky almanah. 2022. No. 2-2. Pp. 60 – 61. (in Russian)
8. Belov V.V., Smirnov M.A. The influence of the chemical additive TsMID-4 on the water reduction and kinetics of hardening of cement systems // Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical and Chemical Engineering. 2019. No. 2(2). Pp. 13 – 18. (in Russian)
9. Bullard J.W., Jennings H.M., Livingston R.A., et al. Mechanisms of cement hydration // Cement and Concrete Research. 2011. No. 41. Pp. 1208 – 1223.
10. Voronin V.V., Shuvalova E.A., Odintsov A.A., et al. The use of additives to accelerate the gain of strength as an alternative to heat and moisture treatment of concrete // Transport structures. 2018. V. 5. No. 2. P. 10. (in Russian)
11. Leshkanov A.Yu., Dobshits L.M., Anisimov S.N., et al. Structure formation of plasticized cement systems under conditions of heat and moisture treatment // Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technology. 2022. No. 3. Pp. 7 – 17. (in Russian)
12. Artamonova O.V., Verlina N.A., Kretinina V.N. Study of the processes of early structure formation of modified cement stone // Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physical and chemical problems and high technologies of construction materials science. 2016. No. 1(12). Pp. 3 – 8. (in Russian)
13. Kostyleva A.S. On the possibilities of using nanomodifying additives at negative temperatures // International Student Construction Forum-2017: Collection

of reports: in 2 volumes. Volume 2. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2017. Pp. 288 – 291. (in Russian)

Макушина Юлия Валерьевна – преподаватель кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

Белькова Наталья Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

Полегенько Полина Владимировна – магистрант группы мЭКСМ-231 Воронежского государственного технического университета

УДК 542.8

МЕТОД КАПИЛЛЯРНОГО ЭЛЕКТРОФОРЕЗА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИОННОГО СОСТАВА ВОДЫ В ПРОЦЕССЕ ВОДОПОДГОТОВКИ

Н.В. Шелехова¹, О.Б. Рудаков^{2}, Артыщенко С.В.²*

¹Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Российская Федерация, 109240, г. Москва, Устьинский проезд, 2/14

² Воронежский государственный технический университет, Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

**Адрес для переписки: Рудаков Олег Борисович, e-mail: robi57@mail.ru*

В статье представлены результаты исследования динамики качественного и количественного состава микроэлементов в образцах технологической воды. Подтверждена перспективность применения метода капиллярного электрофореза для определения ионного состава воды на примере контроля технологического процесса водоподготовки при производстве алкогольной продукции. Показано, что метод капиллярного электрофореза позволяет контролировать ионный состав воды на всех этапах водоподготовки при производстве алкогольной продукции. Анализ полученных результатов подтвердил, что в результате обработки воды в процессе водоподготовки полностью удалены сульфаты, формиаты, фториды, содержание хлоридов, кальция, натрия, магния снизилось более, чем в 10 раз. На основании полученных результатов по содержанию кальция и магния в исследованных образцах, рассчитана общая жесткость воды. Установлено, что в результате технологического процесса водоподготовки, жесткость воды снизилась с 0,22 °Ж до 0,02 °Ж. Использование метода капиллярного электрофореза в контроле качества алкогольной продукции позволяет проводить мониторинг процесса водоподготовки в целях получения воды с заданными характеристиками.

Ключевые слова: капиллярный электрофорез, водоподготовка, вода, катионы, анионы, ионный состав.

CAPILLARY ELECTROPHORESIS METHOD FOR MONITORING THE IONIC COMPOSITION OF WATER DURING WATER TREATMENT

Shelekhova N.V.¹, Rudakov O.B.¹, Artyshchenko S.V.¹

¹*Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Ustinsky proezd, 2/14, Moscow, 109240, Russian Federation*

²*Voronezh State Technical University, ul. 20-letia Oktabria, 84, Voronezh, 394006, Russian Federation*

**Correspondence address: Rudakov Oleg Borisovich, e-mail: robi57@mail.ru*

The article presents the results of a study of the dynamics of the qualitative and quantitative composition of trace elements in process water samples. The prospects of using the capillary electrophoresis method to determine the ionic composition of water are confirmed using the example of monitoring the technological process of water treatment in the production of alcoholic beverages. It has been shown that the capillary electrophoresis method makes it possible to control the ionic composition of water at all stages of water treatment in the production of alcoholic beverages. Analysis of the results confirmed that as a result of water treatment, sulfates, formates, fluorides were completely removed, and the content of chlorides, calcium, sodium, and magnesium decreased by more than 10 times. Based on the results obtained on the content of calcium and magnesium in the studied samples, the total water hardness was calculated. It was found that as a result of the technological process of water treatment, the water hardness decreased from 0.22 to 0.02 units of rigidity. The use of capillary electrophoresis in alcohol quality control makes it possible to monitor the water treatment process in order to obtain water with specified characteristics.

Key words: capillary electrophoresis, water treatment, water, cations, anions. ionic composition.

Введение

Вода играет ключевую роль в различных сферах человеческой деятельности. Водоподготовка – это комплекс мероприятий, направленных на приведение качества воды в соответствие с требованиями различных потребителей, включающий физико-химические, биологические и механические методы обработки [1]. Цель водоподготовки - удаление загрязнений, улучшение органолептических

свойств и обеспечение микробиологической безопасности воды. Процесс водоподготовки заключается в изменении ее физико-химических свойств в зависимости от назначения и предъявляемых требований к качеству воды, используемой для технологических целей и хозяйственно-питьевых нужд [2].

Для контроля ионного состава воды широкое применение нашли инструментальные методы анализа, среди которых необходимо выделить метод капиллярного электрофореза [3 – 7]. Капиллярный электрофорез (КЭ) - относительно молодой метод анализа, основанный на разделении компонентов сложной смеси в кварцевом капилляре под действием приложенного электрического поля. Основные закономерности электрофореза были известны еще в конце XX века. Метод КЭ обладает рядом значительных преимуществ, которые делают его привлекательным для различных областей науки и техники: высокая разрешающая способность, экспрессность, высокая чувствительность и универсальность, минимальный объем пробы, возможность использования различных типов детекторов и их комбинаций [8 – 10]. Кроме того, КЭ является относительно недорогим методом по сравнению с другими аналитическими технологиями.

Обширная область применения делает капиллярный электрофорез одним из наиболее высокоточных и востребованных методов анализа. Метод КЭ широко используется в экологическом мониторинге объектов окружающей среды, в ветеринарии для анализа кормов и комбикормового сырья, в фарминдустрии для контроля фармацевтических ингредиентов и лекарственных средств, в медицине для анализа биологических объектов, в криминалистике для выявления наркотических и взрывчатых веществ, в пищевой индустрии для контроля качества, подлинности и безопасности продуктов питания и спиртных напитков [12 – 14].

Важно отметить, что метод КЭ продолжает развиваться, предлагая новые возможности для анализа ионного состава воды. Совершенствование детекторов, разработка новых буферных растворов и капилляров, а также интеграция с другими аналитическими методами, такими как масс-спектрометрия, позволяют повысить чувствительность, селективность и скорость анализа. Таким обра-

зом, КЭ становится все более востребованным инструментом для мониторинга качества воды, контроля загрязнений и изучения водных экосистем.

Ликероводочное производство является активным потребителем воды, значительная часть которой используется для приготовления сортировок - водно-спиртовых растворов, крепостью 40,0-56,0%, предназначенных для приготовления алкогольных напитков. Проблема водоподготовки на предприятиях, производящих алкогольную продукцию, актуальна и имеет большое значение [1, 15]. Важно отметить, что процесс водоподготовки является существенной частью производства алкогольной продукции. В соответствии с ГОСТ 12712-2013 «Водки и водки особые. Общие технические условия» для приготовления водок используют исправленную воду. Согласно ГОСТ Р 52190-2003 «Напитки спиртные. Термины и определения», исправленная вода – это вода с содержанием минеральных и органических веществ, установленных нормативными документами на производство спиртных напитков, приготовленная способами: умягчения, деминерализации, дезодорации, обессоливания, обезжелезивания и/или фильтрования питьевой воды [16]. В зависимости от качества исходной воды водоподготовка может включать следующие этапы: очистка от взвешенных частиц, обезжелезивание, удаление органических соединений (осветление, дезодорация), умягчение, обессоливание, обеззараживание, исправление состава [17].

Контроль качества и безопасности алкогольной продукции с применением метода КЭ становится все более востребованным в современной аналитической практике промышленных предприятий. Внедрение метода КЭ в контроль качества и безопасности алкогольной продукции будет способствовать повышению ее конкурентоспособности, защите потребителей от фальсификата и обеспечению соответствия международным стандартам.

Цель работы – с применением метода капиллярного электрофореза исследовать изменение ионного состава воды в ходе технологического процесса водоподготовки на примере ликероводочного производства.

Экспериментальная часть

Материалы и методы. В качестве объектов исследования использовали образцы воды, полученные в производственных условиях: образец №1 – вода из артезианской скважины, №2 – вода после песочного фильтра, №3 – вода после угольного фильтра, №4 – вода после обработки на установке обратного осмоса. Электрофоретический анализ проводили на системе капиллярного электрофореза Agilent 7100 (Agilent Technologies, США). Рабочий электролит для определения ионного состава содержал гистидин 25 – 35 мМоль/л, 2-морфолиноэтансульфоновую кислоту 100 – 140 мМоль/л, краун-эфир 1,5 – 2,5 мМоль/л, тритон X-100 0,2-0,50 мМоль/л, остальное – деионизованная вода. Условия анализа: напряжение плюс 30 кВ, температура капилляра + 20 °С, ввод пробы гидродинамический 40 мБар в течении 25 с, время анализа 20 – 25 мин. Границы относительной погрешности измерения не более 20 % [18].

Обсуждение результатов

Наиболее часто на ликероводочных заводах используют воду из муниципальных или подземных источников водоснабжения. На каждом ликероводочном предприятии разрабатывается уникальная система водоподготовки, адаптированная к специфическим условиям производства, учитывающая химический состав исходной воды. Для очистки подземных вод от взвешенных частиц используют песочные фильтры, технические характеристики которых подбирают индивидуально в зависимости от параметров очищаемой воды. Для снижения жёсткости воды применяют установки натрий-катионирования, либо используют угольные фильтры. Натрий-катионирование – процесс умягчения воды, при котором из неё извлекают ионы жёсткости (кальций и магний) и заменяют их на ионы натрия. В качестве ионоулавливающих фильтров выступают ионообменные смолы, насыщенные солями натрия. Обратный осмос - технология очистки воды, при которой жидкость под давлением проходит через синтетическую мембрану, задерживающую около 98 % загрязняющих веществ, солей

и примесей [15,17]. Принципиальная схема водоподготовки ликёро-водочного завода представлена на рисунке 1.

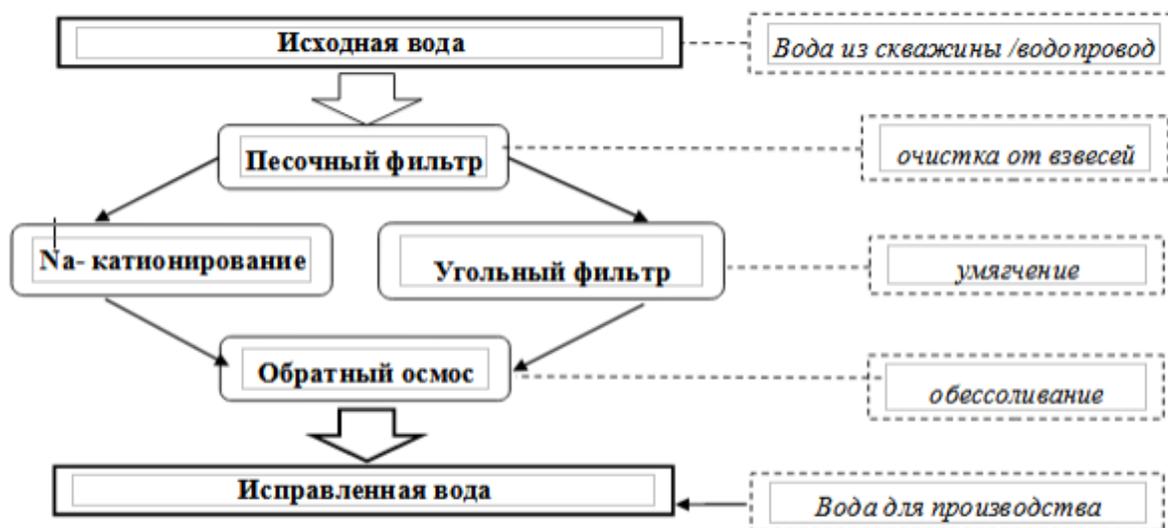


Рис. 1. Принципиальная схема водоподготовки ликёро-водочного завода.

В производственных условиях ликероводочного завода исследовано изменение ионного состава воды в ходе технологического процесса водоподготовки. На рисунке 2 представлены электрофореграммы исследованных образцов воды.

Необходимо подчеркнуть, что в исходной воде из артезианской скважины зафиксированы предельно низкие концентрации катионов, которые обуславливают жёсткость воды. Показано, что после фильтрации исходной воды через песочный фильтр ее ионный состав не изменился (рис. 2 а, б). Это связано с тем, что песочный фильтр предназначен для удаления взвешенных частиц и не оказывает влияния на ионный состав напитка, за исключением, случаев несвоевременной регенерации фильтра.

Активный уголь – высокопористый материал органического происхождения, получаемый из древесины березы, бука, дуба. Пористая поверхность позволяет адсорбировать широкий спектр молекул, включая вещества, придающие нежелательные запахи и привкусы [16].

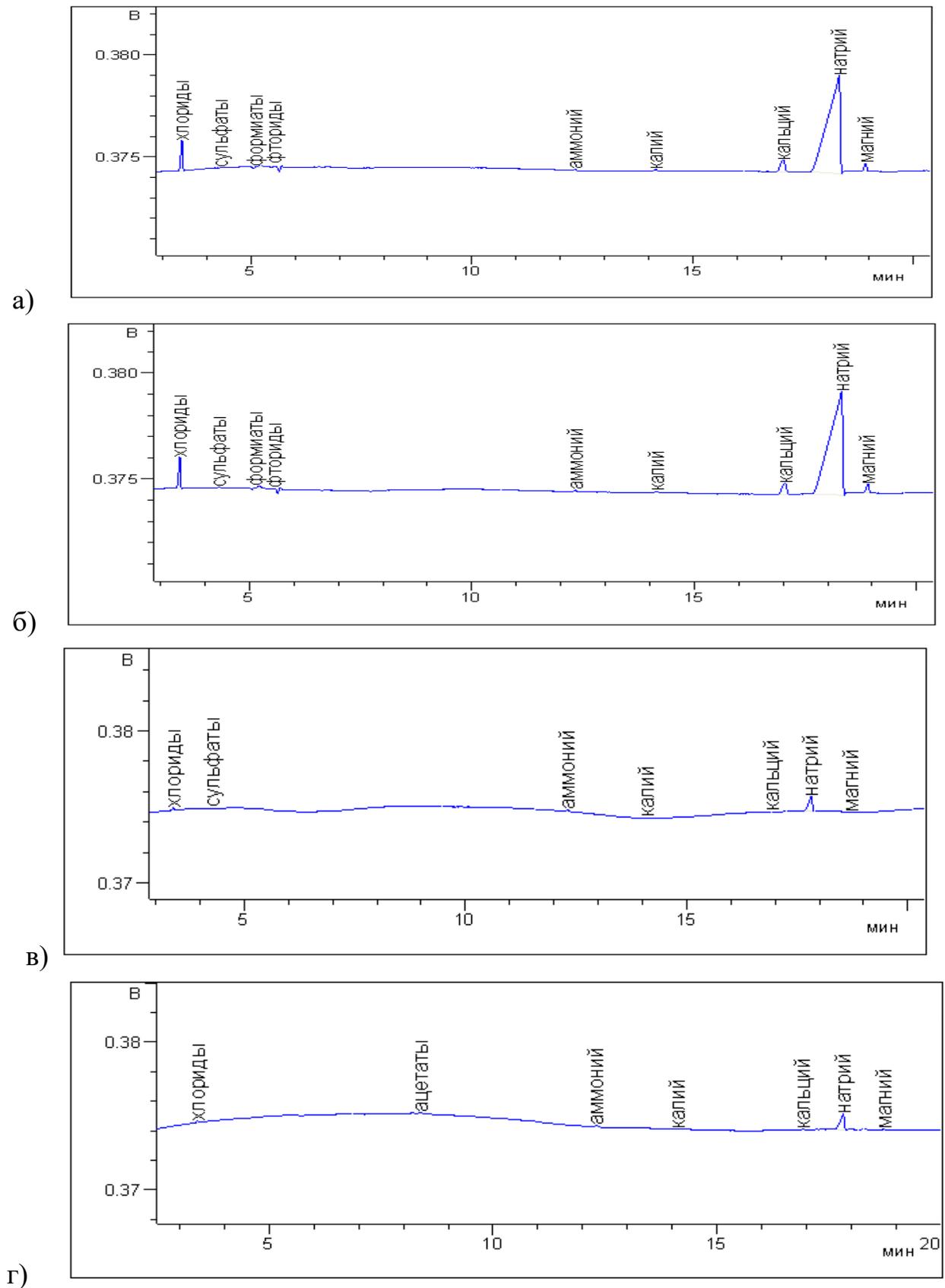


Рис. 2. Электрофореграмма воды а) вода из артезианской скважины; б) вода после песочного фильтра; в) вода после угольного фильтра; г) вода после обратного осмоса

В результате фильтрации через угольный фильтр в разы снизились концентрации сульфатов, калия, кальция, натрия и полностью сорбированы формиаты и фториды.

Целесообразность использования установки обратного осмоса для корректировки ионного состава остается под вопросом. Зарегистрированы незначительные изменения массовых концентраций идентифицированных примесей, которые не превышают погрешности методики определения. Присутствие ацетат-ионов массовой концентрацией менее 0,10 мг/дм³ можно объяснить недостаточной промывкой мембранной установки после ее регенерации.

Следует отметить, что ацетаты не является желательной примесью технологической воды, так как при приготовлении сортировки (водно-спиртового раствора) уксусная кислота может вступить в реакцию этерификации с этиловым спиртом с образованием этилацетата. В целом, в результате проведенной водоподготовки, получена технологическая вода, по своим характеристикам, соответствующая параметрам, регламентируемым нормативной документацией и пригодная для производства водок.

Важно отметить, что от ионного состава воды зависят органолептические свойства будущего напитка и его стабильность при хранении. Известно, что хлориды Cl⁻ при концентрациях не более 30 мг/дм³, создают мягкие тона послевкусия, сульфаты SO₄²⁻ при содержании более 30 мг/дм³ придают напиткам горький вкус и могут стать причиной осадкообразования. Нитраты NO₃⁻ массовой концентрацией более 4 мг/дм³ придают горьковатый вяжущий вкус, нитриты NO₂⁻ более 0,1 мг/дм³ – горечь. Фосфаты – могут придавать напитку кислый вкус, либо мыльный оттенок. Калий K⁺ при содержании свыше 10,0 мг/дм³, придают водкам горьковатый вкус, кальций Ca²⁺ свыше 2,7 мг/дм³ может стать причиной осадкообразования, марганец Mg²⁺ отрицательно воздействует на вкус напитка. Магний Mn²⁺ в концентрации менее 0,8 мг/дм³ подчеркивает вкус напитка, а больших концентрациях – придает горечь [19 – 23].

Результаты исследования динамики ионного состава воды в процессе водоподготовки приведены в таблице 1.

Динамика ионного состава воды в процессе водоподготовки

Целевой анализ, мг/дм ³	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
	Вода из артезианской скважины (исходная вода)	Вода после песочного фильтра (очистка)	Вода после угольного фильтра (умягчение)	Вода после обратного осмоса (обессоливание)
хлориды	4,10±0,82	4,05±0,81	0,33±0,07	0,33±0,07
нитриты	н/о	н/о	н/о	н/о
нитраты	н/о	н/о	н/о	н/о
радониды	н/о	н/о	н/о	н/о
сульфаты	0,13±0,03	0,14±0,03	менее 0,10	н/о
оксалаты	н/о	н/о	н/о	н/о
формиаты	0,53±0,11	0,58±0,12	н/о	н/о
фториды	0,33±0,07	0,47±0,09	н/о	н/о
фумараты	н/о	н/о	н/о	н/о
тарtrato	н/о	н/о	н/о	н/о
малаты	н/о	н/о	н/о	н/о
цитраты	н/о	н/о	н/о	н/о
сукцинаты	н/о	н/о	н/о	н/о
гликоляты	н/о	н/о	н/о	н/о
ацетаты	н/о	н/о	н/о	менее 0,10
лактаты	н/о	н/о	н/о	н/о
фосфаты	н/о	н/о	н/о	н/о
бензоаты	н/о	н/о	н/о	н/о
аммоний	0,12±0,02	0,10±0,02	0,17±0,03	0,22±0,04
калий	0,30±0,06	0,27±0,05	0,10±0,02	0,10±0,02
кальций	3,13±0,63	3,06±0,60	0,16±0,03	0,14±0,03
натрий	71,29±14,26	74,24±14,82	4,68±0,94	5,07±1,01
магний	0,81±0,16	0,90±0,18	0,12±0,02	0,10±0,02
марганец	н/о	н/о	н/о	н/о
стронций	н/о	н/о	н/о	н/о
этанол-мин	н/о	н/о	н/о	н/о
пропила-мин	н/о	н/о	н/о	н/о
литий	н/о	н/о	н/о	н/о
барий	н/о	н/о	н/о	н/о

н/о – не обнаружено

Анализ полученных результатов показал, что в результате обработки воды в процессе водоподготовки полностью удалены сульфаты, формиаты, фториды, содержание хлоридов, кальция, натрия, магния снизилось более, чем в 10 раз.

Одним из наиболее важных показателей для питьевой воды является жесткость. Сумму ионов кальция, магния, бария, стронция, содержащихся в воде, называют общей жесткостью. В соответствии с требованиями СанПиН 2.1.4.1074-01. «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества», общая жесткость воды, подаваемой водопроводами для хозяйственно-питьевых нужд, не должна превышать 7 мг-экв/л.

Жесткость воды $Ж$ при раздельном количественном определении ионов щелочноземельных элементов вычисляют по формуле[18]:

$$^{\circ}Ж = \sum (C_i / C_{i0}), \quad (1)$$

где C_i – массовая концентрация щелочноземельного элемента в пробе воды, мг/дм³, C_{i0} – массовая концентрация щелочноземельного элемента, численно равная 1/2 его моля, мг/дм³.

Допускается не учитывать содержание стронция и бария при расчете жесткости воды, если их суммарное содержание составляет менее 10 % общего содержания щелочноземельных элементов в пробе.

На основе данных, полученных в результате проведенного исследования (табл. 1), рассчитана жесткость воды (рис. 3).

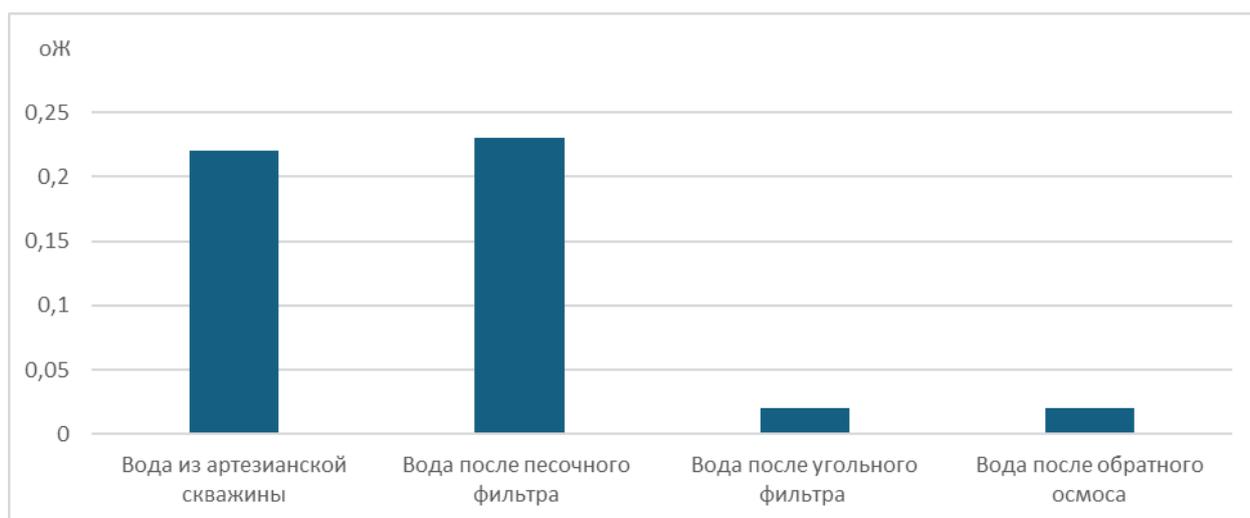


Рис. 3. Динамика общей жесткости воды в процессе водоподготовки.

Анализ полученных результатов показал, что в результате технологического процесса водоподготовки, жёсткость воды снизилась с 0,22 °Ж до 0,02 °Ж.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований экспериментально подтверждена целесообразность использования метода капиллярного электрофореза для определения ионного состава воды. Показано, что применение метода КЭ в контроле качества алкогольной продукции позволит проводить мониторинг процесса водоподготовки в целях получения воды с заданными качественными характеристиками.

Список литературы

1. Агафонов Г.В. Инновационные решения в технологии производства алкогольной продукции // В сб.: Мат. VI отчетной научн. конф. препод. и научных сотрудников ВГУИТ за 2017 г. Часть 1. 2018. С. 59.
2. Бурачевский И.И., Федоренко В.И. Подготовка технологической воды и ее влияние на качество водок // Ликероводочное производство и виноделие. 2003. № 8. С. 20 – 23.
3. Никитина С.Ю., Шахов С.В., Пыльный Д.В., Рудаков О.Б. Аналитический контроль качества ректификованного этанола, водок и спиртовых дистиллятов// Пищевая промышленность. 2018. № 6. С. 56 – 60.
4. Бёккер Ю. Хроматография. Инструментальная аналитика: методы хроматографии и капиллярного электрофореза. Москва. Техносфера. 2009. 458 с.
5. Шелехова Н.В., Поляков В.А. Применение метода капиллярного электрофореза для контроля качества и безопасности спиртных напитков // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 11. С. 39 – 42.
6. Езерская А.А., Пивовар М.Л. Капиллярный электрофорез: основные принципы, применение в фармацевтическом анализе // Вестник фармации. 2019. №1 (83). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kapillyarnyy-elektroforez>

osnovnyye-printsipy-primenenie-v-farmatsevticheskom-analize (дата обращения: 10.04.2025).

7. Yamamoto S., Fujiwara H., Maruyama K., et al. Simultaneous Determination of Inorganic Anions and Cations in Water and Biological Samples by Capillary Electrophoresis with a Capacitive Coupled Contactless Conductivity Detector Using Capillary Filling Method // *Analytical Sciences*. 2019.V. 35(3). Pp. 295 – 300.

8. Krebs F., Zagst H., Stein M., et al. Strategies for capillary electrophoresis: Method development and validation for pharmaceutical and biological applications-Updated and completely revised edition // *Electrophoresis*. 2023. V. 44 (17-18). Pp. 1279-1341.

9. Przybylska A., Gackowski M., Koba M. Application of capillary electrophoresis to the analysis of bioactive compounds in herbal raw materials // *Molecules*. 2021. V. 26(8). Pp. 2135.

10. Ильина М.Б., Сергунова Е.В. Применение метода капиллярного электрофореза в анализе водорастворимых витаминов представителей рода *Rubus L* // *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2025. Вып. 14(1). С. 274 – 283. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2025-14-1-1946>

11. Шелехова Н.В. Экспресс метод определения анионов в алкогольных напитках на основе сочетания КЭ-КД // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23. №2. С. 199 – 215. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11144>

12. Li Z., Wu Q., Zhang X., Chen G. Advances in the Applications of Capillary Electrophoresis to Tobacco Analysis // *Current Analytical Chemistry*. 2023. V. 19(1). Pp. 77 – 99. <https://doi.org/10.2174/1573411018666220927094137>.

13. Gackowski M., Przybylska A., Kruszewski S., et al. Recent applications of capillary electrophoresis in the determination of active compounds in medicinal plants and pharmaceutical formulations // *Molecules*. 2021. V. 26(14). Pp. 4141. <https://doi.org/10.3390/molecules26144141>.

14. Шелехова Н.В., Поляков В.А., Римарева Л.В. Капиллярный электрофорез - высокоэффективный аналитический метод исследования состава сложных биологических сред // Пиво и напитки. 2017. №2. С. 34 – 38.
15. Бурачевский И.И., Воробьева Е.В., Зенина Г.П., Морозова С.С. и др. Технология ликероводочного производства. М.: Пищевая промышленность. 2010. 360 с.
16. Поляков В.А., Бурачевский И.И., Морозова С.С., Макеева А.Н., Устинова Е.В. Физико-химический и микроэлементный состав технологической воды и водок // Производство спирта и ликероводочных изделий. 2006. № 2. С. 21 – 24.
17. Польшалина Г.В. Аналитический контроль производства водок и ликероводочных изделий. М.: ДеЛи принт. 2006. 464 с
18. Шелехова Н.В. Научно-практические основы комплексной системы контроля и регулирования технологических процессов производства этилового спирта и спиртных напитков: дис. ... д-ра тех. наук: 05.18.07., 2017. 310 с.
19. Ющенко Г.И., Бурачевская В.Ю., Устинова Е.В. Источники и причины образования осадков в водках // Производство спирта и ликероводочных изделий. 2010. № 3. С. 30 – 31.
20. Бурачевский И.И. Проблема стабильности и качества ликероводочных изделий // Производство спирта и ликероводочных изделий. 2001. № 2. С. 11 – 12.
21. Морозова С.С., Бурачевский И.И. Влияние катионного и анионного состава водок на их устойчивость // Ферментативная и спиртовая промышленность. 1983. № 8. С. 25 – 26.
22. Польшалина Г.В., Бурачевский И.И. Основы дегустации и сертификации водок и ликеро-водочных изделий. М.: Колос, 1999. 48 с.
23. Дубинина Е.В., Севостьянова Е.М., Крикунова Л.Н., Ободеева О.Н. Влияние минерального состава умягченной воды на качественные показатели спиртных напитков из растительного сырья // Ползуновский вестник. 2021 № 1 С. 11 – 19. doi:10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.002.

References

1. Agafonov G.V. Innovative solutions in alcohol production technology] // In the collection: Mat. VI reporting scientific conference of the professor and VGUIT researchers, 2017. Part 1. 2018. P. 59. (in Russian)
2. Burachevskij I.I., Fedorenko V.I. Process water treatment and its impact on vodka quality // Distillery and winemaking. 2003. No. 8. Pp. 20 – 23. (in Russian)
3. Nikitina S.Yu., Shahov S.V., Pyl'nyj D.V., Rudakov O.B. Analytical quality control of rectified ethanol, vodkas and alcoholic distillates // Food industry. 2018. No. 6. Pp. 56 – 60. (in Russian)
4. Byokker Yu. Hromatografiya. Chromatography. Instrumental analysis: chromatography and capillary electrophoresis methods. Moskva. Tekhnosfera. 2009. 458 s. (in Russian)
5. Shelekhova N.V., Polyakov V.A. The use of capillary electrophoresis for quality and safety control of alcoholic beverages // Storage and processing of agricultural raw materials. 2015. No. 11. Pp. 39 – 42. (in Russian)
6. Ezerskaya A. A., Pivovar M. L. Capillary electrophoresis: basic principles, application in pharmaceutical analysis // Bulletin of Pharmacy. 2019. №1 (83). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kapillyarnyy-elektroforez-osnovnye-printsipy-primenenie-v-farmatsevticheskom-analize> (data obrashcheniya: 10.04.2025). (in Russian)
7. Yamamoto S., Fujiwara H., Maruyama K., et al. Simultaneous Determination of Inorganic Anions and Cations in Water and Biological Samples by Capillary Electrophoresis with a Capacitive Coupled Contactless Conductivity Detector Using Capillary Filling Method // Analytical Sciences. 2019.V. 35(3). Pp. 295 – 300.
8. Krebs F., Zagst H., Stein M., et al. Strategies for capillary electrophoresis: Method development and validation for pharmaceutical and biological applications- Updated and completely revised edition // Electrophoresis. 2023. V. 44 (17-18). Pp. 1279-1341.

9. Przybylska A., Gackowski M., Koba M. Application of capillary electrophoresis to the analysis of bioactive compounds in herbal raw materials // *Molecules*. 2021. V. 26(8). Pp. 2135.
10. Il'ina M.B., Sergunova E.V. Application of the capillary electrophoresis method in the analysis of water-soluble vitamins of representatives of the genus *Rubus L* // *Development and registration of medicines*. 2025. V. 14(1). Pp. 274 – 283. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2025-14-1-1946> (in Russian)
11. Shelekhova N.V. An express method for the determination of anions in alcoholic beverages based on a combination of CE-CD // *Sorption and chromatographic processes*. 2023. V. 23. No. 2. Pp. 199–215. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11144> (in Russian)
12. Li Z., Wu Q., Zhang X., Chen G. Advances in the Applications of Capillary Electrophoresis to Tobacco Analysis // *Current Analytical Chemistry*. 2023. V. 19(1). Pp. 77 – 99. <https://doi.org/10.2174/1573411018666220927094137>.
13. Gackowski M., Przybylska A., Kruszewski S., et al. Recent applications of capillary electrophoresis in the determination of active compounds in medicinal plants and pharmaceutical formulations // *Molecules*. 2021. V. 26(14). Pp. 4141. <https://doi.org/10.3390/molecules26144141>
14. Shelekhova N.V., Polyakov V.A., Rimareva L.V. Capillary electrophoresis is a highly effective analytical method for studying the composition of complex biological media // *Beer and Beverages*. 2017. No. 2. Pp. 34 – 38. (in Russian)
15. Burachevskij I.I., Vorob'va E.V., Zenina G.P., et al. The technology of distillery production. M.: Pishchevaya promyshlennost'. 2010. 360 p. (in Russian)
16. Polyakov V.A., Burachevskij I.I., Morozova S.S., et al. Physico-chemical and microelement composition of process water and vodkas // *Production of alcohol and alcoholic beverages*. 2006. No. 2. Pp. 21 – 24. (in Russian)
17. Polygalina G.V. Analytical control of vodka and distillery production. M.: DeLi print. 2006. 464 p. (in Russian)

18. Shelekhova N.V. Scientific and practical foundations of an integrated system of control and regulation of technological processes for the production of ethyl alcohol and alcoholic beverages: dis. d-ra tekhn. nauk: 05.18.07., 2017. 310 p. (in Russian)

19. Yushchenko G.I., Burachevskaya V.Yu., Ustinova E.V. Sources and causes of precipitation in vodka // Production of alcohol and alcoholic beverages. 2010. No. 3. Pp. 30 – 31. (in Russian)

20. Burachevskij I.I. The problem of stability and quality of alcoholic beverages // Production of alcohol and alcoholic beverages. 2001. No. 2. Pp.11 – 12. (in Russian)

21. Morozova S.S., Burachevskij I.I. The influence of the cationic and anionic composition of vodkas on their stability // Enzymatic and alcohol industry. 1983. No. 8. Pp. 25 – 26. (in Russian)

22. Polygalina G.V., Burachevskij I.I. Fundamentals of tasting and certification of vodka and distillery products. M.: Kolos, 1999. 48 p. (in Russian)

23. Dubinina E.V., Sevost'yanova E.M., Krikunova L.N., Obodeeva O.N. The influence of the mineral composition of softened water on the quality of alcoholic beverages from vegetable raw materials // Polzunovsky bulletin. 2021. No. 1 Pp. 11–19. doi:10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.002 (in Russian)

Шелехова Наталия Викторовна — д-р техн. наук, зав. лаб. хроматографии, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи

Рудаков Олег Борисович — д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов, Воронежский государственный технический университет

Артыщенко Степан Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры инноватики и строительной физики имени профессора И.С. Суровцева, Воронежский государственный технический университет

УДК 691

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Н.А. Белькова*, Д.В. Ищенко, В.В. Хасанов

*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

**Адрес для переписки: Белькова Наталья Анатольевна, e-mail: verlnata@mail.ru*

Повсеместное внедрение информационных технологий моделирования объектов строительства ведет к тому, что системы качества производства железобетонных конструкций должны охватывать не только этап их производства, но и этапы проектирования и эксплуатации. В связи с этим создание единой базы свойств сырьевых материалов является достаточно актуальной. В работе представлены результаты оценки стабильности свойств сырьевых материалов для тяжелых бетонов (цемента, песка и щебня) по результатам, полученным на двух предприятиях: ООО «АБС Бетон» и АО «Завод ЖБК». Установлено, что не все свойства материалов стабильны (это некоторые показатели щебня и песка). В целом имеется согласованность в получаемых при испытаниях результатах.

Ключевые слова: системы качества, контроль, сырьевые материалы, активность цемента, модуль крупности песка, содержание глинистых и пылевидных частиц, щебень.

MANUFACTURING QUALITY ASSESSMENT REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

N.A. Bel'kova*, D.V. Ishchenko, V.V. Hasanov

*Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Octyabrya, 84, Voronezh, 394006
Russian Federation*

**Corresponding author: Belkova Natalya Anatolyevna, e-mail: verlnata@mail.ru*

The widespread introduction of information technologies for modeling construction facilities leads to the fact that the quality systems for the production of reinforced concrete structures must cover not only the stage of their production, but also the stages of design and operation. In this regard, the creation of a unified database of raw material properties is quite relevant. The paper presents the results of assessing the stability of the properties of raw materials for heavy concrete (cement, sand and crushed stone) based on the results obtained at two enterprises: ABS Concrete LLC and Zavod ZhBK JSC. It has been established that not all properties of materials are stable (these are some indicators of crushed stone and sand). In general, there is consistency in the test results.

Keywords: quality systems, control, raw materials, cement activity, sizing modulus, clay and dust content, crushed stone.

Введение

Особое место в системе управления качеством строительной продукции занимает контроль (входной, операционный и приемочный). От степени совершенства контроля качества на предприятии, его оснащения средствами измерений и организации во многом зависит эффективность производства и конкурентоспособность продукции [1, 2].

Понятие обеспечение качества продукции включает в себя целые комплекс мероприятий и элементов:

- процесс обеспечения – это систематический процесс, охватывающий всю организационную структуру предприятия;
- вопросы качества включают не только цикла производства продукции, но и этапы маркетинга, разработки, применения и обслуживания;
- уровень качества задается потребителем, а не изготовителем;
- для повышения качества продукции необходимо проводить совершенствование всех технологии производства, включая автоматизацию контроля качества как сырьевых материалов, так и готовой продукции [3 – 5].

Обеспечение заданного уровня качества бетонных и железобетонных изделий осложняется тем, что для их производства используются многокомпонентные смеси и их качество напрямую зависит от свойств составляющих ее материалов. В рамках повсеместного внедрения системы управления качеством

интересным является вопрос о сопоставимости показателей качества сырьевых материалов одинаковых поставщиков, полученных в рамках входного контроля на различных предприятиях-производителях. Для решения подобной задачи могут использоваться статистические методы, которые являются очень важным и широко применяемым инструментом в промышленности.

Статистические методы управления качеством – это совокупность различных методов обнаружения особых факторов, позволяющая распознать стабильность процесса и корректировать его [6 – 8]. К основным инструментам (методам) относятся: контрольный листок, причинно-следственная диаграмма (диаграмма Исикавы), гистограмма распределения, контрольные карты.

Целью данной работы является оценка качества сырьевых материалов, используемых для производства продукции на двух предприятиях Воронежской области: ООО «АБС Бетон» и АО «Завод ЖБК».

Анализ качества сырьевых материалов статистическими методами

В работе для оценки свойств сырьевых материалов (цемента производства компании «ЦЕМРОС», Оскольского филиала; песка ООО «Транс»; щебня ООО «ПавловсНеруд») использовались различные инструменты качества: контрольные карты и гистограммы распределения, индекс воспроизводимости процесса C_p [7, 8]. Данные для их построения были получены из журналов входного контроля на рассматриваемых предприятиях. Для полученных данных анализируемый период составил 3 месяца. Для цемента проводилась оценка стабильности качества по показателю прочности при сжатии. Для песка – по показателям модуля крупности и содержания глинистых и пылевидных частиц; для щебня - по показателям содержания зерен пластинчатой формы и глинистых и пылевидных частиц.

Как видно по результатам, представленным на рисунке 1, можно сделать вывод, что показатель модуля крупности песка имеет значения, близкие к нижней границе допуска (2,0 единицы) независимо от того, на каком предприятии были получены данные. При этом, согласно результатам, полученным по дан-

ным ООО «АБС Бетон» имеются результаты, превышающие значение 2,2 и наблюдается большой разброс данных, что подтверждается низким значением индекса воспроизводимости ($C_p = 0,96 < 1$ – процесс находится в нестабильном состоянии). Для результатов, полученных на АО «Завод ЖБК» индекс $C_p = 1,35 > 1,33$ – процесс находится в управляемом состоянии. Такое отличие в полученных данных можно объяснять возможным объединением в одну выборку данных для песка разных поставщиков из-за недосмотра персонала.

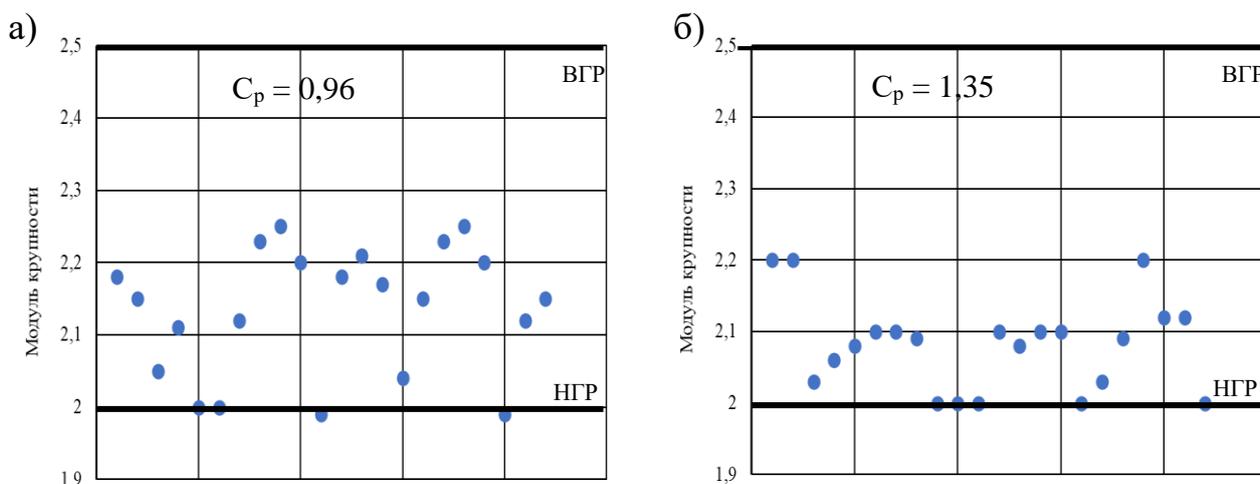


Рис. 1. Контрольная карта показателя модуля крупности песка

а) ООО «АБС Бетон»; б) АО «Завод ЖБК».

Высказанное выше предположение частично подтверждается тем, что для показателя содержания глинистых частиц значения индекса воспроизводимости в обоих случаях выше значения 1,33 (рис. 2). При этом в обоих случаях значения показателя не выходят за границы допуска. Однако для результатов, полученных на ООО «АБС Бетон», границы разброса находятся в пределах 0,4...1 %, а для АО «Завод ЖБК» - 0,...1,6 %. То есть опять наблюдается некоторое несоответствие.

В результате анализа контрольных карт, представленных на рисунке 3 установлено, что результаты, полученные на ООО «АБС Бетон», более стабильные: как показатель содержания пластинчатых частиц, так и содержания глинистых и пылевидных частиц находятся в границах допуска. При этом ин-

декс воспроизводимости более 1,33 (1,96 и 1,98 соответственно для каждого показателя). То есть свойства щебня находятся в стабильном и управляемом состоянии.

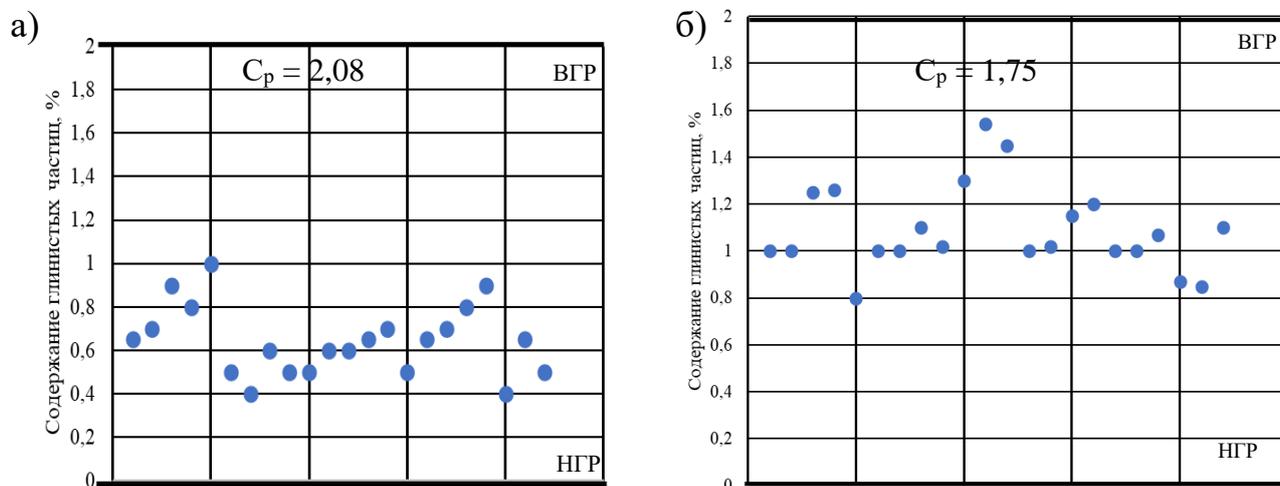


Рис. 2. Контрольная карта показателя содержания глинистых и илистых частиц для песка: а) ООО «АБС Бетон»; б) АО «Завод ЖБК»

Далее рассмотрим результаты, касающиеся показателей щебня (рис. 3 и 4).

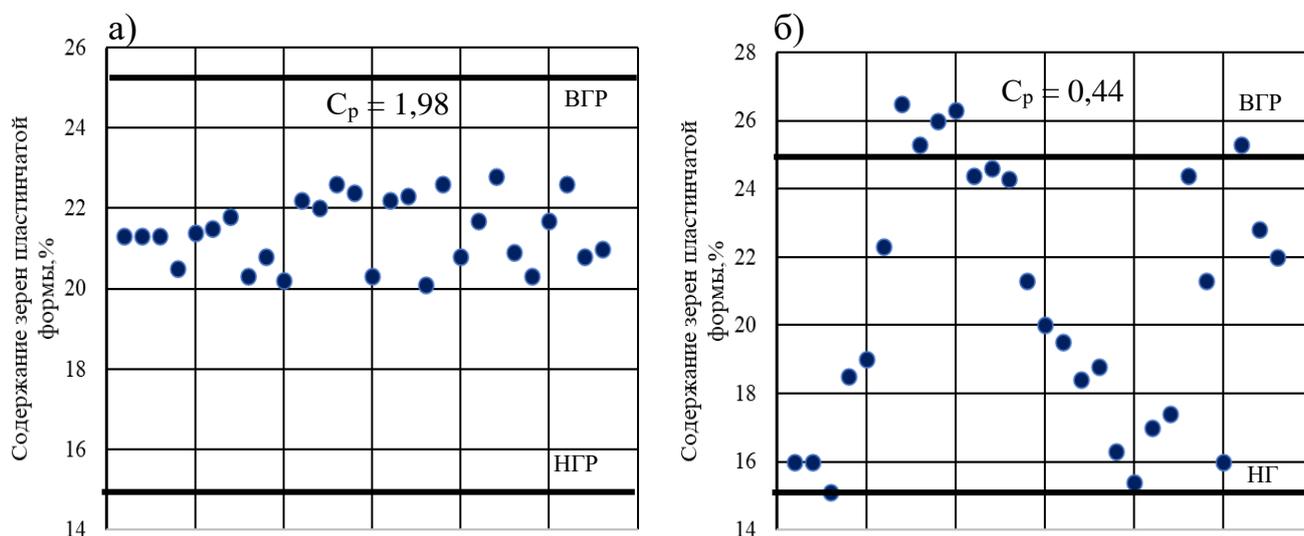


Рис. 3. Контрольная карта показателя содержания зерен пластинчатой формы для щебня: а) ООО «АБС Бетон»; б) АО «Завод ЖБК».

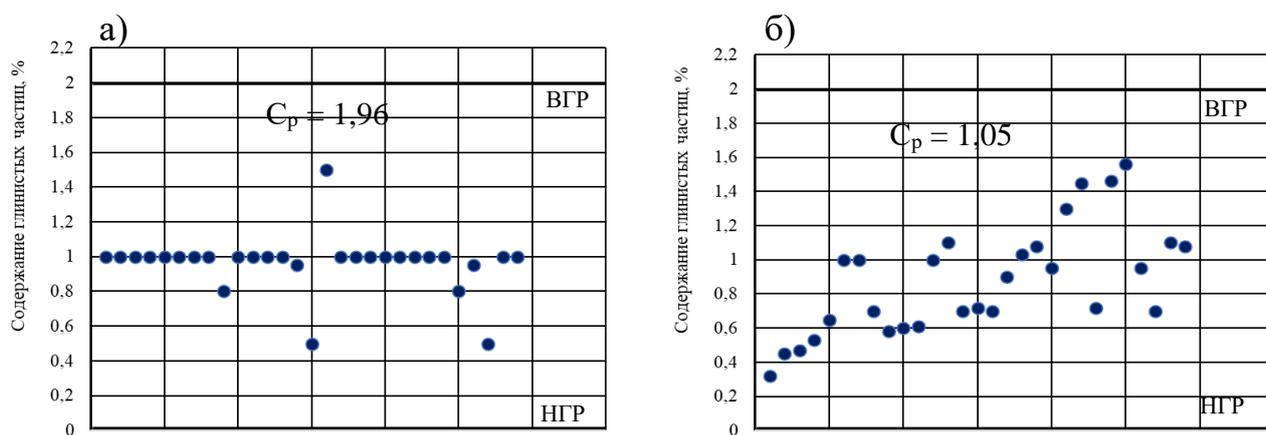


Рис. 4. Контрольная карта показателя содержания глинистых и илистых частиц в щебне: а) ООО «АБС Бетон»; б) АО «Завод ЖБК».

Эти же показатели по результатам, полученным на АО «Завод ЖБК», имеют гораздо больший разброс: так значения содержания зерен пластинчатой формы выходят как за верхнюю границу допуска – 25 %, так и приближаются к нижней границе – 15 % (что соответствует 3 группе щебня по требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями N 1-4)»). Индекс воспроизводимости для этого показателя составил 0,44, что значительно ниже минимальной границы (1,0), обозначающей стабильное течение процесса. Для показателя содержания глинистых и пылевидных частиц хотя и не наблюдается выхода данных за границы допуска (ВГР = 2 %), однако индекс воспроизводимости составляет 1,05, что ниже минимального, обозначающего стабильность процесса, значения $C_p = 1,33$.

Одним из более наглядных инструментов оценки качества является гистограмма распределения результатов, представленная на рис. 5 – для показателя активности цемента (по пределу прочности при сжатии).

Необходимо отметить, что, согласно ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия», установлены достаточно широкие границы допуска (от 42,5 МПа до 62,5 МПа), центральная граница допуска соответствует 52,5 МПа. Такие широкие границы позволяют производителям цемента работать с достаточно большими разбросами по активности, однако для потребителей это приносит определенные трудности, связанные с перерасходом це-

мента. Поэтому постоянный контроль за реальной активностью полученной партии цемента является залогом обеспечения стабильности технологического процесса без завышения себестоимости продукции.

Согласно полученным данным, гистограммы активности цемента у обоих рассмотренных предприятий являются нормально распределенным и не выходят границы допуска. При этом, в обоих случаях, гистограммы смещены в сторону нижней границы и не достигают центральной линии (52,5 МПа).

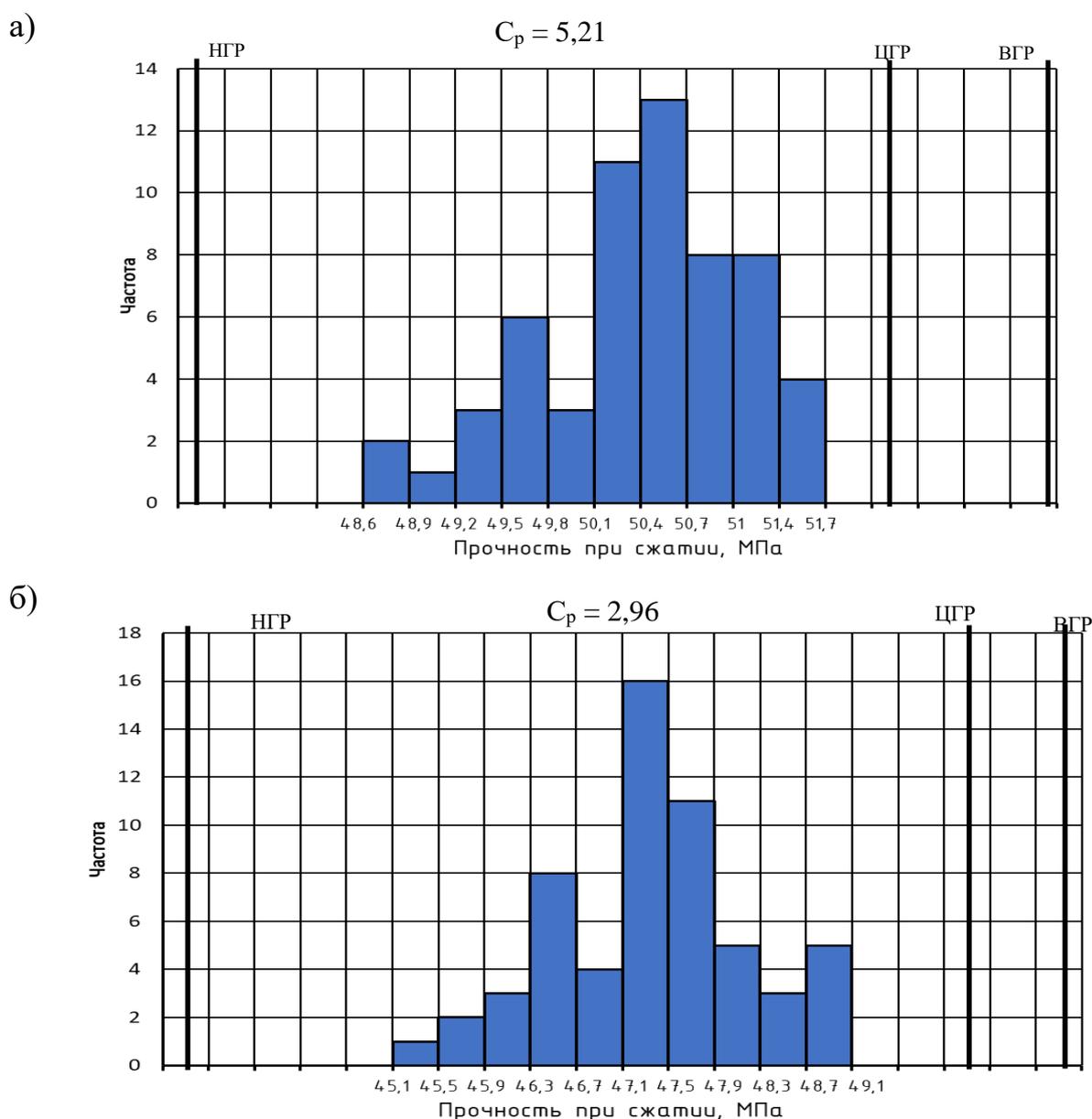


Рис. 5. Гистограмма прочности на сжатие для цемента, МПа:

а) ООО «АБС Бетон»; б) АО «Завод ЖБК»

На обеих гистограммах наблюдается «провал» по частоте появления значений рядом с максимальными интервалами. То есть имеется согласованность результатов испытаний на обоих предприятиях. Средние значения активности цемента равны: для ООО «АБС Бетон» - 50,5 МПа, для АО «Завод ЖБК» - 48,2 МПа. Такое разночтение в результатах можно объяснить использованием для испытаний разных средств измерений, которые, не смотря на постоянную метрологическую поверку, могут иметь свои погрешности (не выходящие за предусмотренные нормативами). При этом значения индексов воспроизводимости составляют более 1,33 (рисунок 5), то есть процесс стабилен и управляем.

Заключение

В ходе экспертизы был проведен анализ показателей качества сырьевых материалов, полученных на двух предприятиях, производящих железобетонные изделия, статистическими методами. В ходе анализа установлено, что не все показатели соответствуют нормативным требованиям.

Так, в результате анализа контрольных карт для показателя содержания зерен пластинчатой формы в щебне, установлено, что по результатам, полученным на АО «Завод ЖБК», имеются выбросы, выходящие за верхнюю границу допуска.

Так же установлено, что не все показатели свойств сырьевых материалов (песка и щебня) находятся в стабильно управляемом состоянии: значения индекса воспроизводимости C_p ниже значения 1,0: для модуля крупности песка (по данным ООО «АБС Бетон») и содержания зерен пластинчатой формы для щебня (по данным АО «Завод ЖБК»).

В целом можно сказать, что имеется согласованность поучаемых результатов входного контроля материалов между двух рассмотренных предприятий. Некоторые разночтения могут быть связаны, во-первых, с использованием средств измерений с отличающимися метрологическими характеристиками (значениями погрешности измерений); и, во-вторых, на значения полученных результатов в большой мере влияет, так называемый, «человеческий фактор»:

на различных предприятиях испытания осуществляют сотрудники с разным опытом и уровнем квалификации. Полученные результаты исследований, так же, говорят о том, что имеется возможность создания единой базы данных для повсеместного внедрения и развития современных заводов, включенных в систему ВИМ-моделирования.

Дальнейшие исследования в данной области будут направлены на анализ результатов по всем показателям качества сырьевых материалов на большем количестве предприятий Воронежской и соседних областях.

Список литературы

1. Чурпанова А. Б., Соловьева О.Н. Контроль и обеспечение качества железобетонных изделий // Наука молодых - будущее России: сборник научных статей международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых: в 3 томах, Юго-Западный государственный университет, 15–16 декабря 2016 года / Юго-Западный государственный университет. Том 3. – Юго-Западный государственный университет: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2016. С. 100-103.

2. Жакишев Д.К., Темербаева Ж.А. Отечественный и зарубежный опыт контроля производства изделий из железобетона // Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки. 2023. № 4(107). С. 20 – 24.

3. Мамонов А.Н. Вопросы контроля качества железобетонных изделий, производимых на линиях безопалубочного формования // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии : сборник статей, Самара, 26–30 октября 2020 года / Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2020. С. 149-153.

4. Сидоров Д.П. К вопросу о необходимости применения статистических методов на производственном предприятии // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: теория, методология, практика: Сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конфе-

ренции, Уфа, 24 марта 2023 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2023. С. 202-208.

5. Гинзбург А.В., Кожевникова С.Т. Совершенствование организации строительства за счет альтернативного анализа поставщиков бетонных смесей // Строительные и дорожные машины. 2018. № 5. С. 3-7.

6. Васильев Ю.Э., Полянский В.Г., Соколова Е.Р., и др. Статистические методы контроля качества при производстве цементобетона и цементобетонных смесей // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 101.

7. Смирнов В.А., Антонова И.И. Статистические методы в управлении качеством: Учебник. 1-е изд. Москва: Издательство Юрайт, 2024. 245 с.

8. Беликова Е.А. Статистические методы управления качества // Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса: Сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции, Курск, 05 июня 2024 года. Курск: ЗАО "Университетская книга", 2024. С. 19 – 22.

Reference

1. Churpanova A.B, Solovyova O.N. Control and Quality Assurance of Reinforced Concrete Publications // Science of the Young - the Future of Russia: a collection of scientific articles of the international scientific conference of promising young scientists: in 3 volumes, Southwestern State University, December 15 – 16, 2016 /Southwestern State University. Volume 3. Southwestern State University: University Book Closed Joint Stock Company, 2016. Pp. 100 – 103.

2. Zhakishev D.K., Temerbaeva Zh.A. Domestic and foreign experience in controlling the production of reinforced concrete products // Eurasian Union of Scientists. Series: technical and physical-mathematical sciences. 2023. No. 4(107). Pp. 20 – 24.

3. Mamonov A.N. Issues of quality control of reinforced concrete products produced on formless molding lines // Traditions and innovations in construction and architecture. Construction technologies: collection of articles, Samara, October 26-30, 2020. Samara: Samara State Technical University, 2020. Pp. 149 – 153.

4. Sidorov D.P. On the need to apply statistical methods at a manufacturing enterprise // Theoretical and practical aspects of the development of modern science: theory, methodology, practice: Collection of scientific articles based on materials from the X International Scientific and Practical Conference, Ufa, March 24, 2023. Ufa: Limited Liability Company "Scientific and Publishing Center" Bulletin of Science, "2023. Pp. 202 – 208.

5. Ginzburg A. V., Kozhevnikova S.T. Improving the organization of construction through alternative analysis of suppliers of concrete mixtures // Construction and road machines. 2018. No. 5. Pp. 3 – 7.

6. Vasiliev Yu.E., Polyansky V.G., Sokolova E.R., et al. Statistical methods of quality control in the production of cement tone and cement concrete mixtures // Modern problems of science and education. 2012. No. 4. P. 101.

7. Smirnov V.A., Antonova I.I. Statistical methods in quality management: Textbook. 1st ed. Moscow: Yurayt Publishing House, 2024. 245 p.

8. Belikova E.A. Statistical methods of quality management // Technologies, machines and equipment for the agro-industrial complex: Collection of scientific articles of the 2nd All-Russian Scientific and Technical Conference, Kursk, June 05, 2024. Kursk: University Book CJSC, 2024. Pp. 19 – 22.

Белькова Наталья Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

Ищенко Дарья Владимировна – магистрант группы мЭКМС-231 Строительного факультета Воронежского государственного технического университета

Хасанов Виктор Викторович – заместитель директора АО «Завод ЖБК»

УДК 624.011

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ДЕРЕВО-КАУТОНОВЫХ АРМИРОВАННЫХ БАЛОК
ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

***Ф.Ф. Хошимова**, *Д.В. Панфилов*, *А.Э. Поликутин*, *Н.Г. Назаренко*,
*О.Е. Перекальский***

*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

**Адрес для переписки: Хошимова Феруза Фахридиновна, e-mail: feruza-boymatova@mail.ru*

В статье рассматриваются:

- новое конструктивное решение армированной дерево-каутоновой балки;
- используемые материалы для изготовления дерево-каутоновых армированных балок;
- технология изготовления дерево-каутоновых армированных балок;
- физико-механические свойства каутона;
- определены расчетные характеристики материала дерево-каутоновой армированной балки;
- определены геометрические характеристики поперечного сечения, несущая способность дерево-каутоновой армированной балки;
- методика испытаний дерево-каутоновой армированной балки при кратковременном действии нагрузок;
- экспериментальное испытание арматуры А500С.

Ключевые слова: древесина, деревянная балка, арматура, каутон, нагрузка, напряжения, несущая способность, прогиб, деформация.

THEORETICAL STUDY OF THE OPERABILITY OF WOOD-KAUTON REINFORCED BEAMS UNDER STATIC LOADS

F.F. Khoshimova, D.V. Panfilov, A.E. Polikutin, N.G. Nazarenko, O.E. Perekalsky*

*Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Octyabrya, 84, Voronezh, 394006
Russian Federation*

**Corresponding author: Feruza Fakhridinovna Khoshimova, e-mail: feruza-boymatova@mail.ru*

The article discusses:

- a new constructive solution for reinforced wood-kautonic beams;
- materials used for the manufacture of wood-cauton reinforced beams;
- manufacturing technology of wood-kauton reinforced beams;
- physico-chemical properties of caouton;
- the design characteristics of the wood-kauton reinforced beam material have been determined;
- the geometric characteristics of the cross-section and the bearing capacity of the reinforced wood-kauton beam are determined;
- test procedure for wood-kauton reinforced beams under short-term loads;
- experimental testing of A500C fittings.

Keywords: wood, wooden beam, reinforcement, caouton, load, stresses, bearing capacity, deflection, deformations.

Введение

Одним из эффективных строительных материалов является древесина, которые используется ещё с давних времён для строительства как жилых, так и промышленных зданий, и сооружений.

Древесина с большими габаритами дефицитны в настоящее время и такие материалы применяются для изготовления мостовых деревянных балок.

При проектировании деревянных несущих конструкций, часто стоит проблема по уменьшению рабочей высоты сечения элемента или по техническому заданию ограничивается размер поперечного сечения балки, а армирование позволяет повысить несущую способность в наиболее напряженных зонах сечения

деревянной балки. Таким образом, направление работы, связано с теоретическим исследованием армирования растянутой зоны деревянных балок [5].

В нашей работе используется в качестве армирования каучук, который способствует повышению надежности и долговечности строительных конструкций. Эффективность применения дерево-каучуновых балок может быть повышена за счет армирования.

Целью работы является теоретическое исследование работоспособности дерево-каучуновых армированных балок при статических нагрузках, а также анализ причин возможных отклонений.

Используемые материалы для изготовления дерево-каучуновых армированных балок

Для изготовления дерево-каучуновых армированных балок были использованы следующие материалы, см. рис.1 и 2:

- древесина - сосна 2 сорта;
- каучон [6, 7];
- арматура класса А-500 и В500 [3].



Рис. 1. Образцы каучона для получения расчетной характеристики.



Рис. 2. Образец дерево-каучоновых армированных балок.

Состав каутона:

- цис-бутадиеновый низкомолекулярный каучук марки СКДН-Н;
- сера техническая;
- ускоритель вулканизации;
- активатор вулканизации – оксид цинка ZnO (цинковые белила марки М-1);
- оксид кальция CaO;
- цемент М500 Д0;
- песок сеянный Тамбовского карьера.

Физические свойства песка и щебня приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физические свойства песка

Заполнитель	Размер фракций, мм	Плотность, г/см ³	Насыпная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, см ² /г	Пустотность, %
Кварцевый песок	0,63...1	2,65	1,61	33	39,1
	0,8...2.0				

Также используется продольная арматура класса А500С диаметром 12 мм (ГОСТ Р 52544-06) и поперечная класса В-500 диаметром 6 мм, см. таблицу 2 и 3.

Компонентный состав выбран на основе имеющихся данных по оптимизации компонентного состава каутона. Использование этого состава обеспечивает получение каутона с высокими прочностными характеристиками, а также рациональное дозирование компонентов, таблица 4.

Таблица 2

Технические характеристики

Поз. Зак.	Плавка	Партия	Марка	Профиль, размер.мм	Длина	Кол-во	Масса Нетто,т	Масса брутто.т.
10	172471	1012501/01	A500C	12	11700	4	16500	16540

Таблица 3

Химический состав

№ пп	C %	Si %	Mn %	S %	P %	Cu %	N %	C экв
1	0,19	0,17	0,57	0,032	0,03	0,207	0,009	0,33

Таблица 4

Состав полимерцементной защиты

Наименование	Содержание компонентов, масса. %
Низкомолекулярный каучук марки СКДН-Н	17,27
Сера техническая	8,64
Тиурам-Д	0,86
Оксид цинка	3,11
Окись кальция	1,04
Цемент	69,08

Испытание арматуры A500C

Для определения фактических характеристик стальной арматуры выполнялись испытания двух образцов на растяжение до разрыва. Испытания осуществляли на разрывной машине INSTRON Satec 1500HDX. Измерения продольных деформаций выполняли фольговыми тензорезисторами с базой 20 мм при помощи прибора MGCplus.

По результатам испытания была построена диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ » для арматуры А500С (рис. 3).

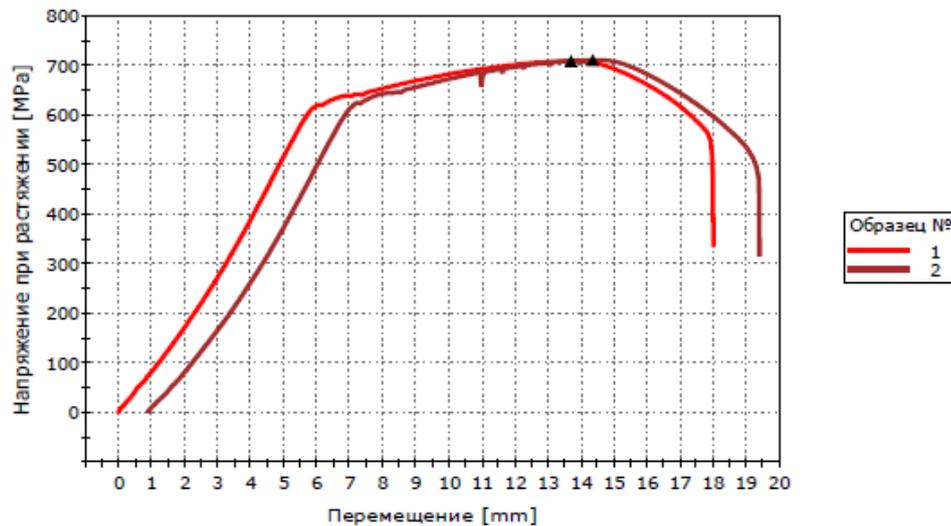


Рис. 3. График зависимости напряжения от деформации образцов арматуры А500С.

Результаты сведены в таблицу 5.

Таблица 5

Результаты испытания двух образцов арматуры А500С

	Метка образца	Длина [мм]	Площадь [мм ²]	Максимум Нагрузки [кН]	Временное сопротивление [МПа]
1	2	400,00	113,10	80,21	709,16
2	2	400,00	113,10	80,43	711,16

Технология изготовления дерево-каучоновых армированных балок

Вначале изготавливали деревянные образцы размерами 100x99x1600 мм с арматурным каркасом (продольная арматура класса А500С диаметром 12мм и поперечная арматура (нагель) класса В500 диаметром 6), а потом залили каучоном до полного высыхания (рис. 4 – 6).

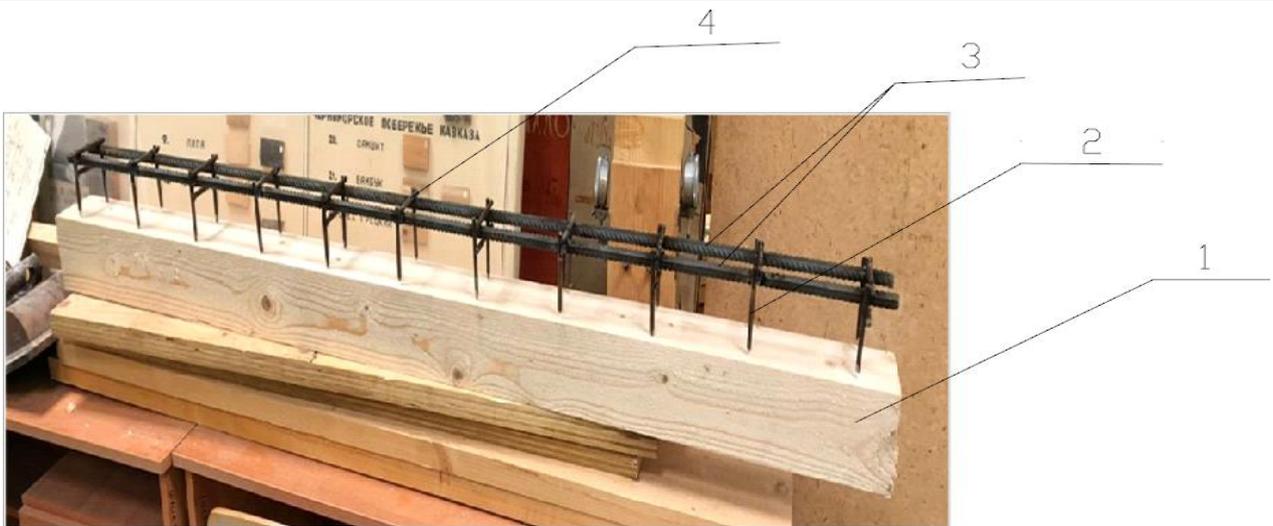


Рис. 4. Деревянная балка и арматурный каркас (1-деревянная балка; 2-стальные нагели; 3-продольная рабочая арматура; 4-шпильки).



Рис. 5. Способы изготовления дерево-каученовых армированных балок.



Рис. 6. Дерево-каученовая армированная балка.

Определение фактических размеров дерево-каучоновых армированных балок

Для изготовления дерево-каучоновых армированных составных мостовых брусьев были использованы следующие материалы:

- древесина: сосна 2 сорта;
- каучон;
- арматура класса: А-300.

Исходные данные:

- влажность древесины: 20%;
- высота поперечного сечения дерево-каучонового армированного составного мостового бруса: $h=120$ мм;
- ширина поперечного сечения дерево-каучонового армированного составного мостового бруса: $b=100$ мм;
- высота поперечного сечения 1-го слоя из древесины: $h_d=90$ мм;
- высота поперечного сечения 2-го слоя из каучона: $h_k=30$ мм;
- длина балки: $l=1600$ мм;
- расчётный пролёт балки: $l_p=1100$ мм.

Определение расчетных характеристик материала дерево-каучонового армированного балки

Расчетное сопротивление древесины при изгибе рассчитывается по формуле 1:

$$R^p = R^A \cdot m_{дл} \cdot \Pi m_i, \quad (1)$$

где

$R^A = 24$ МПа, расчетное сопротивление древесины, МПа, приведенное в таблице 3 [18];

влажностью 12% для режима нагружения А, согласно таблице 4 [18];

$m_{дл} = 0,66$, коэффициент длительной прочности, соответствующий режиму длительности загрузки (таблица 4) [2];

$\Pi m_i = 1$, произведение коэффициентов условий работы [18].

Отсюда, $R^p = 24 \cdot 0,66 \cdot 1,0 = 15,84$ МПа.

Определение геометрических характеристик поперечного сечения дерево-каучонового армированного балки

Приведенная площадь поперечного сечения дерево-каучонового армированного балки определяется по формуле 2:

$$F_{пр} = F_d + F_k \cdot n_k + n_s \cdot A_s, \quad (2)$$

где F_d - площадь поперечного сечения 1-го слоя дерево-каучонового армированного балки из древесины: $F_d = b \cdot h_d = 0,1 \cdot 0,090 = 0,009$ м²;

F_k - площадь поперечного сечения 2-го слоя дерево-каучонового армированного балки из каучона: $F_k = b \cdot h_k = 0,1 \cdot 0,030 = 0,003$ м²;

n_k - коэффициент, учитывающий соотношения модуля упругости каучона с деревом: $n_k = E_k/E_d = 19500/10000 = 1,95$;

n_s - коэффициент учитывающий соотношение модуля упругости арматуры с деревом: $n_s = E_s/E_d = 240000/10000 = 24$;

A_s - площадь поперечного сечения арматуры: $A_s = 0,000308$ м².

Отсюда, $F_{пр} = 0,009 + 0,003 \cdot 1,95 + 24 \cdot 0,000308 = 0,0151$ м².

Приведенный статический момент дерево-каучонового армированного балки определяется по формуле 3:

$$S_{пр} = S_d + A_k \cdot z_{c2} \cdot n_k + n_s \cdot A_s \cdot z_{c3} \quad (3)$$

где S_d - статический момент 1 -го слоя: $S_d = b \cdot \frac{h_d^2}{8} = 0,1 \cdot \frac{0,09^2}{8} = 0,00010$ м³;

z_{c2} - расстояние от центра тяжести 1 слоя древесины до центра тяжести каучонового слоя: $z_{c2} = \frac{h_d}{2} + \frac{h_k}{2} = \frac{90}{2} + \frac{30}{2} = 60$ мм = 0,06 м;

z_{c3} - расстояния от центра тяжести 1 слой древесины до центра тяжести арматуры: $z_{c3} = \frac{h_d}{2} + h_k - a = \frac{90}{2} + 30 - 20 = 55$ мм = 0,055 м.

Отсюда, $S_{пр} = 0,000101 + 0,000351 + 0,000406 = 0,000858$ м³.

Приведенный момент инерции дерево-каучонового армированного балки, определяется по формуле 4:

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{д}} + I_{\text{к}} + A_{\text{к}} \cdot z_{\text{с2}}^2 \cdot n_{\text{к}} + n_{\text{с}} \cdot A_{\text{с}} \cdot z_{\text{с3}}^2 \quad (4)$$

где $I_{\text{д}}$ – момент инерции 1-го слоя балки:

$$I_{\text{д}} = b \cdot \frac{h_{\text{д}}^3}{12} = 0,1 \cdot \frac{0,090^3}{12} = 0,0000607 \text{ м}^4.$$

Отсюда,

$$I_{\text{пр}} = 0,0000607 + 0,000000225 + 0,0000052 + 0,0000055 = 0,000017 \text{ м}^4.$$

Приведенный момент сопротивления дерево-каучонового армированного балки определяется по формуле 5:

$$W_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot I_{\text{пр}}}{h} \quad (5)$$

$$\text{Отсюда, } W_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot 0,000017}{0,12} = 0,00028 \text{ м}^3.$$

Определение несущей способности дерево-каучонового армированного балки

Несущая способность дерево-каучонового армированного составного мостового бруса:

а) по расчётным нормальным напряжениям при изгибе определяется по формуле 6:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{P \cdot 0,140}{2 \cdot W_{\text{пр}}} \leq R_{\text{у}}, \quad (6)$$

где $M = \frac{P}{2} \cdot 0,140$;

P - расчетная нагрузка.

Из формулы (6) будем считать, что напряжение равно расчетному сопротивлению и определяем расчетную нагрузку по формуле 7:

$$P = \frac{R_{\text{у}} \cdot 2 \cdot W_{\text{пр}}}{0,140} \quad (7)$$

$$\text{Отсюда, } P = \frac{15,84 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 0,00028}{0,140} = 63,36 \text{ кН}$$

б) по расчётным касательным напряжениям при изгибе определяется по формуле 8:

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot h} = \frac{3Q}{2F} \leq R_{\text{ск}} , \quad (8)$$

где $Q = \frac{P}{2}$, тогда $\tau = \frac{3P}{4F} \leq R_{\text{ск}}$

Из формулы (8) будем считать, что касательное напряжение равно расчетному сопротивлению при скалывании и определяем расчетную нагрузку по формуле 9:

$$P = \frac{4F \cdot R_{\text{ск}}}{3} \quad (9)$$

$$\text{Отсюда, } P = \frac{4 \cdot 0,151 \cdot 1,78 \cdot 1000}{3} = 35,83 \text{ кН}$$

с) из условия жесткости нормативный прогиб бруса равен 1/170 пролета, отсюда:

$$\frac{f}{l} = \frac{P \cdot a^3 \cdot I_p}{24 \cdot E_d \cdot I_{\text{пр}} \cdot \gamma_f} \cdot \left(3 \cdot \frac{l_p^2}{a^2} - 4 \right), \quad (10)$$

где $\gamma_f = 1,1$ - коэффициент надежности.

$$\text{Отсюда, } P = \frac{48 \cdot E_d \cdot I_{\text{пр}} \cdot \gamma_f \cdot I_p}{\left(3 \cdot \frac{l_p^2}{a^2} - 4 \right) \cdot a^3} = \frac{48 \cdot 10^7 \cdot 0,000017 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1,1}{\left(\frac{3 \cdot 1,1^2}{0,140^2} - 4 \right) \cdot 170 \cdot (0,140)^3} = 32,50 \text{ кН.}$$

Разрушающая нагрузка определяется умножением значения расчетной нагрузки на коэффициент надежности по материалу $\gamma_M = 1,15$, см. формулу 11:

$$P_{\text{раз.р}} = P \cdot \gamma_M \quad (11)$$

$$\text{Отсюда, } P_{\text{раз.р}} = P \cdot \gamma_M = 32,50 \cdot 1,15 = 37,38 \text{ кН}$$

Заключение

1. Получены расчётные данные для дальнейшего сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов.
2. Разработана методика расчета дерево-каучоновых армированных балок.
3. Изучены физико-механические свойства каутона.

Список литературы

1. Грибанов А.С., Рощина С.И., Лукина А.В., и др. Восстановление деревянных конструкций импрегнированием полимерной композицией на при-

мере промышленных зданий легкой и текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 5(365). С. 76-80.

2. Заикин А. Е. Полимерные композиционные материалы: учебное пособие. Казань: КНИТУ, 2018. 292 с.

3. Иванова Ж.В. Исследование сейсмостойкости каркасных деревянных зданий с учетом нелинейно-упругих и диссипативных свойств материала элементов: дис. канд. техн. наук. СПб.: ПГУПС. 2000. 217 с.

4. Иванова Ж.В. Обеспечение надежности и безопасности деревянных зданий, применяемых для строительства в сейсмоактивных районах // Известия Петербургского Университета Путей Сообщения. 2005. № 3. С. 23 – 28.

5. Ключев С.В. Усиление и восстановление конструкций с использованием композитов на основе углеволокна // Бетон и железобетон. 2012. № 3. С. 23 – 26.

6. Ключев А.В. Усиление изгибаемых конструкций композитами на основе углеволокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 38 – 41.

7. Крицин А.В., Тихонов А.В., Лобов Д.М. Исследование деревянных элементов, усиленных углеродным волокном, при статическом изгибе // Приволжский научный журнал. Н.Новгород, ННГАСУ. 2012. №4(24). С. 55 – 60.

8. Крицин А.В., Лихачева С.Ю., Лобов Д.М., Тихонов А.В. Экспериментальные исследования деревянных балок, усиленных углеродной лентой // Приволжский научный журнал. Н.Новгород, ННГАСУ. 2015. №3(35). С. 103 – 109.

9. Крицин А.В., Лихачева С.Ю., Лобов Д.М., Тихонов А.В. Анализ методов расчета деревянных изгибаемых элементов усиленных углеродным волокном // Региональная архитектура и строительство. Пенза, ПГУАС. 2014. № 4(21). С. 97 – 104.

10. Корчинский И.Л. Расчет строительных конструкций на вибрационную нагрузку. М.: Стройиздат. 1948. 133 с.

11. Павлов А.П. Деревянные конструкции и сооружения: Учеб. пособие для лесоинж. фак. лесотехн. вузов. 2-е изд., перераб. Москва; Ленинград: Гослесбумиздат. 1959. 444 с.

12. Хошимова Ф.Ф., Бойматов Ф.Б. Прочность и деформативность деревянных мостовых брусьев, армированных углеродным волокном // ФГБОУ ВО «Воронежский Государственный Технический Университет». 2020. № 1(12). С. 73 – 78.
13. Brandner R. Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: Testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products // *Engineering Structures*. 2018. (171). Pp. 944 – 960.
14. Caniato M., et al. Acoustic of lightweight timber buildings: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 80. P. 585 – 596.
15. Kollman F. Technologie des Hozes of Wood // *Products Engineering*. 1946. V.17. Pp. 21 – 28.
16. Moradpour P., et al. Laminated strand lumber (LSL) reinforced by GFRP; mechanical and physical properties // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 158. Pp. 236 – 242.
17. Lewis W.C. Fatigue strength of Wood // *Products Engineering*. 1946. V.17. No. 12. Pp. 21 – 28.
18. Lewis W.C. Fatigue of Wood and Ylued Joimts Used in Laminated Construction // *Eorest Frod. Res. Soc*. 1951. No. 5. P. 221 – 229.

References

1. Griбанov A.S., Roshchina S.I., Lukina A.V., et al. Restoration of wooden structures by impregnation with a polymer composition on the example of industrial buildings of the light and textile industries // *News of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2016. No. 5 (365). P. 76 – 80. (in Russian)
2. Zaikin A.E. Polymer composite materials: a tutorial. Kazan': KNITU, 2018. 292 p. (in Russian)
3. Ivanova Zh.V. Study of seismic resistance of frame wooden buildings taking into account the nonlinear elastic and dissipative properties of the material of the elements: dis. cand. tech. sciences. St. Petersburg: PGUPS. 2000. 217 p. (in Russian)

4. Ivanova Zh.V. Ensuring the reliability and safety of wooden buildings used for construction in seismically active areas // Bulletin of the Petersburg University of Railway Engineering. 2005. No. 3. Pp. 23 – 28. (in Russian)
5. Klyuev S.V. Strengthening and restoring structures using carbon fiber-based composites // Concrete and reinforced concrete. 2012. No. 3. Pp. 23 – 26. (in Russian)
6. Klyuev A.V. Strengthening bending structures with carbon fiber-based composites // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2011. No. 3. Ph. 38 – 41. (in Russian)
7. Kritsin A.V., Tikhonov A.V., Lobov D.M. Study of wooden elements reinforced with carbon fiber under static bending // Privolzhsky Scientific Journal. N. Novgorod, NNGASU. 2012. No. 4(24). P. 55 – 60. (in Russian)
8. Kritsin A.V., Likhacheva S.Yu., Lobov D.M., Tikhonov A.V. Experimental studies of wooden beams reinforced with carbon tape // Privolzhsky Scientific Journal. N. Novgorod, NNGASU. 2015. No. 3(35). Pp. 103 – 109. (in Russian)
9. Kritsin A.V., Likhacheva S.Yu., Lobov D.M., Tikhonov A.V. Analysis of calculation methods for wooden bending elements reinforced with carbon fiber // Regional architecture and construction. Penza, PSUAS. 2014. No. 4(21). Pp. 97 – 104. (in Russian)
10. Korchinsky I.L. Calculation of building structures for vibration load. Moscow: Stroyizdat. 1948. 133 p. (in Russian)
11. Pavlov A.P. Wooden structures and constructions: Textbook for forestry departments of forestry universities. 2nd ed., revised. Moscow; Leningrad: Goslesbumizdat. 1959. 444 p. (in Russian)
12. Khoshimova F.F., Boymatov F.B. Strength and deformability of carbon fiber-reinforced wooden bridge beams // Voronezh State Technical University. 2020. No. 1(12). Pp. 73 – 78. (in Russian)
13. Brandner R. Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: Testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products // Engineering Structures. 2018. V. 171. Pp. 944 – 960.

14. Caniato M., et al. Acoustic of lightweight timber buildings: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V. 80. Pp. 585 – 596.
15. Kollman F. Technologie des Hozes of Wood // Products Engineering. 1946. V.17. Pp. 21 – 28.
16. Moradpour P. Laminated strand lumber (LSL) reinforced by GFRP; mechanical and physical properties // Construction and Building Materials. 2018. V. 158. P. 236 – 242.
17. Lewis W.C. Fatigue strength of Wood // Products Engineering. 1946. V.17. No. 12. Pp. 21 – 28.
18. Lewis W.C. Fatigue of Wood and Ylued Joimts Used in Laminated Construction //Eorest Prod. Res. Soc. 1951. No. 5. P. 221 – 229.

Хошимова Феруза Фахридиновна – преподаватель Воронежского государственного технического университета

Панфилов Дмитрий Вячеславович – канд. техн. наук, зав. кафедрой строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета

Поликутин Алексей Эдуардович – канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета

Назаренко Николай Григорьевич – старший преподаватель кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета

Перекальский Олег Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета

УДК 004.8:620.18

**ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ИССЛЕДОВАНИИ
СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ: ОТ МИКРО- ДО НАНОУРОВНЯ**

***А.И. Отченашенко^{1*}, В.В. Корнеева², И.С. Чернышев³,
У.В. Алексеенко⁴***

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Московский инженерно-физический институт), Российская Федерация,
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31*

² *Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84*

³ *Воронежский государственный университет, Российская Федерация, 394018,
г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1*

⁴ *Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана,
Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5*

**Адрес для переписки: Отченашенко Александр Иванович, e-mail: alot.zte@gmail.com*

Данная статья представляет обзор современных достижений в области применения искусственного интеллекта (ИИ) для исследования структуры материалов на различных масштабных уровнях. Рассматриваются методы нейронных сетей и машинного обучения для автоматизированного анализа микроструктуры, прогнозирования свойств материалов и оптимизации процессов получения. Особое внимание уделяется интеграции компьютерного моделирования и для установления сложных взаимосвязей между атомарной структурой и функциональными свойствами материалов. Результаты исследований демонстрируют высокую эффективность алгоритмов ИИ при сегментации и классификации элементов микроструктуры, прогнозировании механических и термических свойств, а также при мультимас-

штабном моделировании атомарных структур. Практическое применение рассмотренных методов открывает широкие перспективы для разработки новых материалов с заданными свойствами и оптимизации существующих технологических процессов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, структура материалов, микроструктурный анализ, нейронные сети, мультимасштабное моделирование, прогнозирование свойств материалов.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MATERIAL STRUCTURE RESEARCH: FROM MICRO- TO NANOSCALE

A.I. Otchenashenko^{1}, V.V. Korneeva², I.S. Chernyshev³,
U.V. Alekseenko⁴*

¹*National Research Nuclear University "MEPhI" (Moscow Engineering Physics Institute),
Russian Federation, 115409, Moscow, Kashirskoe sh., 31*

²*Voronezh State Technical University, Russian Federation, 394006, Voronezh,
ul. 20-letia Oktabria, 84*

³*Voronezh State University, Russian Federation, 394018, Voronezh,
Universitetskaya Square, 1*

⁴*Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation, 105005, Moscow,
2nd Baumanskaya str., 5*

**Corresponding author: Alexander I. Otchenashenko, e-mail: alot.zte@gmail.com*

This article provides an overview of current advances in the application of artificial intelligence (AI) to study the structure of materials at various scale levels. The methods of neural networks and machine learning for automated microstructure analysis, prediction of material properties and optimization of production processes are considered. Special attention is paid to the integration of computer modeling and to establish complex relationships between the atomic structure and functional properties of materials. The research results demonstrate the high efficiency of AI algorithms in segmentation and classification of microstructural elements, prediction of mechanical and thermal properties, as well as in multiscale modeling of atomic structures. The practical application of the considered methods opens up broad prospects for the development of new materials with specified properties and optimization of existing technological processes.

Key words: 3D artificial intelligence, machine learning, material structure, microstructural analysis, neural networks, multiscale modeling, prediction of material properties.

Введение

Современные достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) кардинально трансформируют подходы к изучению и проектированию материалов. На стыке компьютерного моделирования и прогнозной аналитики нейронные сети и алгоритмы машинного обучения становятся незаменимыми инструментами для описания сложных взаимосвязей между атомарной структурой, синтетическими параметрами и функциональными свойствами материалов.

От автоматизированного анализа микроскопических изображений до предсказания фазовых диаграмм в многокомпонентных системах – ИИ предлагает исследователям беспрецедентные возможности для ускорения открытий в материаловедении. Настоящая статья представляет обзор ключевых направлений применения искусственного интеллекта в исследовании структуры материалов на различных масштабных уровнях – от микроскопического до наномасштаба.

За последнее десятилетие методы искусственного интеллекта и машинного обучения продемонстрировали значительный потенциал в решении сложных задач материаловедения. Применение этих методов позволяет не только автоматизировать рутинные процессы анализа структуры материалов, но и выявлять неочевидные закономерности экспериментальных данных, что способствует ускоренному созданию материалов с заданными свойствами [1]. Научная новизна данного исследования заключается в комплексном анализе современных подходов к применению ИИ в материаловедении с фокусом на мультимасштабность исследуемых структур и интеграцию различных методов анализа.

Методы ИИ в микроструктурном анализе

Применение сверточных нейронных сетей (CNN) кардинально преобразовало обработку данных электронной микроскопии. В работе

Соболевой Н.Н. [2] продемонстрировано, что U-Net архитектуры эффективно выделяют границы зерен в низкоуглеродистых сталях с точностью до 94 %, сопоставимой с ручным анализом экспертов. Алгоритмы семантической сегментации обучаются на аннотированных наборах данных, содержащих тысячи изображений с размеченными структурными компонентами – перлитом, аустенитом, мартенситом.

Глубокое обучение с подкреплением (Deep RL) позволяет автоматизировать процесс идентификации различных дефектов кристаллической решетки. В исследованиях [3] рекуррентные нейронные сети (RNN) в комбинации с attention-механизмами достигают 98 % точности в определении дислокаций и вакансий даже в «зашумленных» условиях. Ключевым преимуществом становится способность моделей выделять скрытые зоны в дифракционных картинах, которые остаются незамеченными при традиционном анализе.

Для оценки эффективности алгоритмов сегментации используются различные метрики, такие как точность классификации, коэффициент Dice (показатель пересечения над объединением для оценки точности сегментации) и матрица ошибок. Точность классификации для современных алгоритмов достигает 94 – 98 % в зависимости от типа исследуемого материала и качества изображений. Это сравнимо с ручным анализом экспертов, но при значительно меньших временных затратах.

Графовые нейронные сети (GNN) открывают новые перспективы для трехмерной реконструкции микроструктур. В работе Botifoll et al. [4] предложен метод, сочетающий томографические данные STEM с GNN, позволяющий рассчитывать распределение напряжений в объеме материала с пространственным разрешением 2 нм. Алгоритмы регрессии на основе Random Forest предсказывают средний размер зерна с погрешностью менее 5% по гистограммам площадей сегментированных областей [5].

Применение метода главных компонент (PCA) для анализа микроструктурных данных позволяет выделять наиболее информативные

признаки и снижать размерность данных для последующего анализа. Кластерный анализ с использованием алгоритмов K-means и иерархической кластеризации эффективно группирует схожие микроструктуры, что особенно полезно при анализе больших массивов данных материаловедческих исследований.

Количественные метрики, такие как средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE), позволяют объективно оценивать качество предсказательных моделей. Для современных методов анализа морфологических параметров микроструктуры MAE обычно находится в пределах 3 – 7 %, что является приемлемым показателем для большинства практических задач материаловедения.

Прогнозирование механических и термических свойств

Методы трансферного обучения (transfer learning) позволяют использовать предобученные модели на DFT-расчетах (теория функционала плотности (англ. density functional theory, DFT)) для оценки модуля Юнга и коэффициента Пуассона. В исследованиях [6] продемонстрировано, что многослойные перцептроны (MLP), обученные на 50,000 симуляциях, предсказывают упругие константы карбидов титана с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0.91$. Особенность подхода – использование абстракций для описания кристаллической структуры (SOAP, ACSF) локального окружения конкретного атома.

Точность прогнозирования упругих свойств материалов с помощью моделей машинного обучения оценивается с использованием коэффициента детерминации (R^2), который для современных моделей достигает значений 0.90 – 0.95, что свидетельствует о высокой корреляции между предсказанными и фактическими значениями. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) при прогнозировании модуля Юнга обычно составляет 5 – 10 ГПа (гигапаскалей), что является приемлемым показателем для большинства инженерных приложений.

Активное обучение (active learning) применяется для поиска материалов с экстремальными значениями коэффициента термического расширения (СТЕ). В исследовании [4] комбинация Gaussian Process Regression и генетических алгоритмов идентифицировала 17 новых керамик с $СТЕ < 8 \text{ ppm/K}$, пригодных для термобарьерных покрытий. Модели учитывают корреляции между энергией образования вакансий и термической стабильностью.

Методы Байесовской оптимизации особенно эффективны при поиске материалов с заданными термическими свойствами, поскольку позволяют минимизировать количество необходимых экспериментов при максимальной информативности каждого нового исследования. Для оценки качества прогнозирования термических свойств используются метрики, аналогичные тем, что применяются для механических свойств, с RMSE для коэффициента термического расширения на уровне $0.5 - 1.0 \text{ ppm/K}$.

Интеллектуальное управление синтезом композитных материалов

В экспериментах по самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС) методы Байесовской оптимизации снизили энергозатраты на 40 % при синтезе TiC-TiB₂ композитов [6]. Нейросетевые модели, обученные на 1200 экспериментальных точках, предсказывают скорость фронта горения в зависимости от начального давления ($0.1 - 5 \text{ MPa}$) и температуры предварительного нагрева ($300 - 800 \text{ °C}$) с MAE $\approx 12 \text{ см/с}$.

Эффективность предсказательных моделей для СВС-процессов оценивается по их способности точно прогнозировать скорость фронта горения, температуру и состав продуктов реакции. Коэффициент детерминации (R^2) для этих параметров обычно находится в пределах $0.85 - 0.92$, что указывает на высокую надежность прогнозов. Средняя абсолютная ошибка (MAE) при предсказании скорости фронта горения составляет около $10-15 \text{ см/с}$, что является приемлемым показателем для практических применений. Генеративные состязательные сети (GAN) используются для проектирования систем с заданными свойствами [7]. В работе [8] предложен алгоритм,

генерирующий структуры Ta/Hf/Ni-керамических интерфейсов с адгезией 200 МПа. Модель учитывает диффузию на границах раздела фаз, предсказывая формирование интерметаллидных слоев толщиной 50 – 200 нм.

Для оценки качества прогнозирования свойств многослойных наноструктур используются как экспериментальные данные, так и результаты компьютерного моделирования [9]. Точность предсказания адгезионной прочности интерфейсов достигает 85 – 90 %, а прогнозирование толщины интерметаллидных слоев осуществляется с погрешностью не более 10 – 15 %.

Мультимасштабное моделирование атомарных структур

В работе [10] предложена архитектура Graph Attention Network (GAT), предсказывающая энергию конфигурационного беспорядка в сплавах с точностью 15 meV/atom. Модель обучалась на 50,000 симуляциях методом Монте-Карло для систем Fe-Cr-Ni, учитывая дальнедействующие упругие взаимодействия. Результаты позволяют рассчитывать температуры порядок-беспорядок переходов с погрешностью 50 К.

Точность предсказания энергии конфигурационного беспорядка в сплавах оценивается средней абсолютной ошибкой (MAE), которая для современных моделей составляет 10 – 20 meV/atom. Коэффициент детерминации (R^2) для предсказания температур фазовых переходов обычно находится в пределах 0.88 – 0.94, что свидетельствует о высокой точности моделей.

Нейросетевые потенциалы (NNP) ускоряют молекулярно-динамическое моделирование мартенситных превращений в 1000 раз по сравнению с DFT. В случае никелида титана модели воспроизводят кинетику образования двойников с точностью 0.01 Å в атомных смещениях. Алгоритмы автоматической дифференциации (autograd) могут рассчитывать тензоры деформации для произвольных кристаллографических ориентаций [11].

Для оценки качества моделирования динамики фазовых превращений используются метрики, характеризующие точность воспроизведения атомных позиций, энергии системы и тензоров деформации. Средняя абсолютная ошибка

(MAE) в предсказании атомных позиций обычно составляет 0.01 – 0.02 Å, а энергии системы – 2 – 5 meV/atom, что сопоставимо с точностью методов *ab initio*.

Биомедицинские нанотехнологии

Глубокие Q-сети (DQN) оптимизируют форму и поверхностный заряд липосом для преодоления гематоэнцефалического барьера. В исследовании алгоритмы глубокого обучения уменьшили нецелевую активность наночастиц на 70% при терапии глиобластомы. Моделирование методом Монте-Карло предсказывает время циркуляции частиц в крови с учетом их гидродинамического диаметра (20 – 150 нм) и коэффициента диффузии [12].

Эффективность наноносителей оценивается по нескольким параметрам, включая селективность доставки (отношение концентрации в целевой ткани к концентрации в нецелевых тканях), время циркуляции в кровотоке и эффективность проникновения через биологические барьеры. Современные модели позволяют достичь увеличения селективности доставки на 60 – 80 % по сравнению с неоптимизированными наноносителями.

Оптические нейронные сети (ONN), интегрированные в темнопольные микроскопы, осуществляют классификацию экзосом в реальном времени с точностью 99.3 % [10]. Алгоритмы на основе ResNet-50 анализируют спектры рассеяния, идентифицируя биомаркеры рака молочной железы HER2 за 0.2 секунды на изображение.

Точность классификации биологических наночастиц с помощью алгоритмов машинного обучения достигает 97 – 99 %, что превосходит традиционные методы анализа. Время обработки одного изображения составляет 0.1-0.3 секунды, что позволяет осуществлять диагностику в режиме реального времени в интересах пациента.

Заключение

Интеграция ИИ в материаловедение переходит от точечных решений к сквозным платформам, объединяющим синтез и моделирование. Перспективы

включают создание автономных лабораторий, где роботизированные системы под управлением ИИ будут проводить тысячи экспериментов параллельно, непрерывно оптимизируя параметры синтеза [13].

Критическим вызовом остается разработка интерпретируемых моделей, раскрывающих физические принципы за "черным ящиком" нейронных сетей. Решение этих задач откроет путь к целенаправленному дизайну материалов с ранее недостижимыми функциональными характеристиками.

Обобщая результаты рассмотренных исследований, можно выделить следующие ключевые достижения в области применения ИИ для исследования структуры материалов:

1. Сверхточные нейронные сети (CNN) демонстрируют высокую эффективность в сегментации и классификации элементов микроструктуры с точностью, сопоставимой с ручным анализом экспертов (94 – 98 %);

2. Гафовые нейронные сети (GNN) позволяют осуществлять трехмерную реконструкцию микроструктур и рассчитывать распределение напряжений с высоким пространственным разрешением (до 2 нм);

3. Методы трансферного обучения и многослойные перцептроны (MLP) эффективно предсказывают упругие константы материалов с высокой точностью ($R^2 \approx 0.91$);

4. Байесовская оптимизация и активное обучение значительно снижают энергозатраты (до 40 %) при синтезе композитных материалов и позволяют идентифицировать материалы с заданными термофизическими свойствами;

5. Нейросетевые потенциалы (NNP) ускоряют молекулярно-динамическое моделирование в 1000 раз по сравнению с DFT, сохраняя высокую точность в предсказании межатомных расстояний (0.01 Å).

6. Развитие методов искусственного интеллекта в материаловедении открывает широкие перспективы для создания новых материалов с заданными свойствами и оптимизации существующих технологических процессов. Будущие исследования в этом направлении будут направлены на разработку интерпретируемых моделей, объединение различных масштабных уровней

моделирования и интеграцию ИИ в автоматизированные системы экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Отченашенко А.И., Корнеева В.В., Торосян М.С. Перспективы открытия новых материалов с помощью искусственного интеллекта // Химия, физика и механика материалов. 2023. №. 4. С. 27 – 36.
2. Соболева Н.Н. Применение нейронных сетей для анализа микроструктуры металла // XXII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых. Екатеринбург, 2023. С. 407 – 411.
3. Отченашенко А.И., Корнеева В.В., Чернышев И.С., Алексеенко У.В. Оптимизация 3D-биопечати с применением машинного обучения: анализ изображений для проектирования скаффолдов и выбора материалов // Химия, физика и механика материалов. 2025. №. 1. С. 131 – 143.
4. Botifoll M., Pinto-Huguet I., Arbiol J. Machine learning in electron microscopy for advanced nanocharacterization: current developments, available tools and future outlook //Nanoscale Horizons. 2022. Т. 7. №. 12. С. 1427 – 1477.
5. Отченашенко А.И., Корнеева В.В., Букша М.С. Обзор современных методов лечения периимплантита с использованием имплантов, имеющих антимикробную модификацию поверхности // Химия, физика и механика материалов. 2023. №. 1. С. 80 – 94.
6. Камынина О.К. и др. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез слоистых композиционных материалов Ti/Hf/Ta/Ni/керамика //Физика горения и взрыва. 2024. Т. 60. №. 1. С. 100 – 109.
7. Отченашенко А.И., Корнеева В.В., Букша М.С. Анализ воздействия электростимуляции на восстановление хрящевой ткани // Химия, физика и механика материалов. 2023. №. 2. С. 121 – 134.

8. Fang Z., Yan Q. Towards accurate prediction of configurational disorder properties in materials using graph neural networks //npj Computational Materials. 2024. Т. 10. №. 1. С. 91.
9. Отченашенко А. И., Корнеева В. В., Букша М. С. Сосудистые сети в биосовместимых гидрогелях //Химия, физика и механика материалов. 2021. №. 4. С. 106 – 123.
10. Oganov A. R. et al. Structure prediction drives materials discovery // Nature Reviews Materials. 2019. Т. 4. №. 5. С. 331 – 348.
11. Отченашенко А.И., Корнеева В.В., Букша М.С. Динамическая электростимуляция зрительной коры как способ вернуть зрение // Химия, физика и механика материалов. 2020. №. 4. С. 94 – 111.
12. Ziatdinov M., et al. Atomic-scale observation of structural and electronic orders in the layered compound α -RuCl₃ // Nature communications. 2016. Т. 7. №. 1. С. 13774.
13. Отченашенко А.И., Корнеева В.В., Букша М.С. Обзор нейрокомпьютерного интерфейса, который считывает сигналы мозга напрямую //Химия, физика и механика материалов. 2019. №. 4. С. 120 – 140.

References

1. Otchenashenko A.I., Korneeva V.V., Torosyan M.S. Prospects for discovering new materials using artificial intelligence // Chemistry, Physics and Mechanics of Materials. 2023. No. 4. Pp. 27-36. (in Russian)
2. Soboleva N.N. Application of neural networks for metal microstructure analysis // XXII International Scientific and Technical Ural School-Seminar of Young Metal Scientists. Ekaterinburg, 2023. Pp. 407-411. (in Russian)
3. Otchenashenko A.I., Korneeva V.V., Chernyshev I.S., Alekseenko U.V. Optimization of 3D bioprinting using machine learning: image analysis for scaffold design and material selection // Chemistry, Physics and Mechanics of Materials. 2025. No. 1. Pp. 131 – 143. (in Russian)

4. Botifoll M., Pinto-Huguet I., Arbiol J. Machine learning in electron microscopy for advanced nanocharacterization: current developments, available tools and future outlook // *Nanoscale Horizons*. 2022. Vol. 7. No. 12. Pp. 1427 – 1477.
5. Otchenashenko A.I., Korneeva V.V., Buksha M.S. Review of modern methods of treating peri-implantitis using implants with antimicrobial surface modification // *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2023. No. 1. Pp. 80 – 94. (in Russian)
6. Kamynina O.K. et al. Self-propagating high-temperature synthesis of layered composite materials Ti/Hf/Ta/Ni/ceramics // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2024. Vol. 60. No. 1. Pp. 100 – 109. (in Russian)
7. Otchenashenko A.I., Korneeva V.V., Buksha M.S. Analysis of the effect of electrical stimulation on cartilage tissue recovery // *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2023. No. 2. Pp. 121 – 134. (in Russian)
8. Fang Z., Yan Q. Towards accurate prediction of configurational disorder properties in materials using graph neural networks // *npj Computational Materials*. 2024. Vol. 10. No. 1. p. 91.
9. Otchenashenko A.I., Korneeva V.V., Buksha M.S. Vascular networks in biocompatible hydrogels // *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2021. No. 4. Pp. 106 – 123. (in Russian)
10. Oganov A.R., Pickard C.J., Zhu Q., Needs R.J. Structure prediction drives materials discovery // *Nature Reviews Materials*. 2019. V. 4. No. 5. Pp. 331 – 348.
11. Otchenashenko A.I., Korneeva V.V., Buksha M.S. Dynamic electrical stimulation of the visual cortex as a way to restore vision // *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2020. No. 4. Pp. 94 – 111.
12. Ziatdinov M., et al. Atomic-scale observation of structural and electronic orders in the layered compound α -RuCl₃ // *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. No. 1. p. 13774.

13. Otchenashenko A.I., Korneeva V.V., Buksha M.S. Review of a neurocomputer interface that reads brain signals directly // Chemistry, Physics and Mechanics of Materials. 2019. No. 4. Pp. 120-140. (in Russian)

Отченашенко Александр Иванович – аспирант кафедры компьютерных медицинских систем Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт)

Корнеева Валерия Владиславовна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Чернышев Илья Сергеевич – магистр кафедры физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета

Алексеев Ульяна Викторовна – магистрант кафедры лазерных и оптико-электронных систем Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана

УДК 004.832

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСТЕЙШИХ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ ПОДБОРА СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ОТ КОРРОЗИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В.С. Коновалова*, Н.А. Ваганов

*ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»,
Российская Федерация, 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21*

**Адрес для переписки: Коновалова Виктория Сергеевна, e-mail: kotprotiv@yandex.ru*

Подбор метода защиты от коррозии железобетона, эксплуатирующегося в морских условиях, проводился с помощью текстовых запросов нейросетевым чат-ботам ChatGPT, Genie, Алиса, DeepSeek и Mistral. Нейросетям был задан сначала простой запрос на подбор метода защиты для морских железобетонных ограждений, затем усложненный, содержащий уточнение дополнение к условиям эксплуатации изделий. На вопрос в простой форме нейросетевые чат-боты дали ответы, содержащие общую информацию о часто используемых методиках защиты от коррозии железобетона, подвергающегося действию морской среды. Их выбор пал на добавки ингибиторов в бетон, катодную защиту стальной арматуры и гидрофобную обработку поверхности бетона. Конкретных технологических режимов выполнения операций по антикоррозионной защите при этом расписано не было. На сложно составленный вопрос нейросети предоставили более полную информацию по режимам гидрофобной обработки поверхности бетона и нанесения полимерных покрытий на арматуру, содержащую названия препаратов и четкую последовательность действий. Для выбранных методов защиты от коррозии нейросети привели обоснования их эффективности с точки зрения защитной способности, изменений эксплуатационных характеристик защищаемых материалов, экономической выгоды. В целом, нейросетевые чат-боты показали себя хорошим инструментом для подбора методов и средств защиты от коррозии, но для работы с ними требуются навыки в части составления запросов сложной структуры для получения корректной, точной и полной информации.

Ключевые слова: защита бетона, защита арматуры, защита от коррозии, нейросетевой поиск, использование нейросетей.

**THE POSSIBILITY OF USING THE SIMPLEST NEURAL NETWORKS TO SELECT
THE TECHNICS AND METHODS OF PROTECTING REINFORCED CONCRETE
FROM CORROSION**

V.S. Konovalova, N.A. Vaganov*

*Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo State Polytechnic
University», av. Sheremetevskiy, 21, Ivanovo, 153000, Russian Federation*

**Corresponding author: Viktoriya S. Konovalova, E-mail: kotprotiv@yandex.ru*

The selection of a corrosion protection method for reinforced concrete used in marine conditions was carried out using text queries to the neural network chatbots ChatGPT, Genie, Alice, DeepSeek and Mistral. At first, neural networks received a simple request for the selection of a protection method for marine reinforced concrete fences, then a complicated one containing a clarification supplement to the operating conditions of the products. Neural network chatbots provided answers to the question in a simple form, containing general information about commonly used corrosion protection techniques for reinforced concrete exposed to the marine environment. Their choice was the addition of inhibitors to concrete, cathodic protection of steel reinforcement and hydrophobic surface treatment of concrete. At the same time, there were no specific technological modes for performing anticorrosive protection operations. In response to a complex question, neural networks provided more complete information on the modes of hydrophobic concrete surface treatment and polymer coating on reinforcement containing the names of drugs and a clear sequence of actions. For the selected methods of corrosion protection, neural networks provided justification for their effectiveness in terms of protective ability, changes in the performance characteristics of the protected materials, and economic benefits. In general, neural network chatbots have proven to be a good tool for selecting methods and means of corrosion protection, but working with them requires skills in making complex queries to obtain correct, accurate and complete information.

Key words: concrete protection, reinforcement protection, corrosion protection, neural network search, use of neural networks.

Введение

Железобетонные изделия, сооружения и конструкции эксплуатируются в разных условиях и испытывают различные химические, физические и механи-

ческие воздействия. В железобетоне сначала подвергается коррозионным действиям бетонное покрытие, технические характеристики которого (плотность, пористость, водопроницаемость) обеспечивают сохранность стальной арматуры в нем. Коррозия арматуры инициируется либо после снижения значения рН порового раствора бетона ниже 11 [1 – 3], либо в случае прямого действия агрессивной среды на поверхность стержней в случае растрескивания бетона или интенсивного поступления через поры и капилляры бетонной структуры [4 – 6].

В научной литературе имеется значительное количество исследований, посвященных изучению степени повреждения железобетона в разных условиях эксплуатации и установлению скорости деструкции бетона и стальной арматуры в различных средах. Накопленные знания о механизмах деградации железобетона используются для разработки и совершенствования методов и технологий защиты бетона и арматуры от коррозионных воздействий. К наиболее часто используемым способам защиты железобетона от коррозии относятся изменение состава и количества компонентов бетона [7 – 9], введение ингибирующих коррозию добавок в бетонную смесь [10 – 12], нанесение защитных покрытий на поверхность бетона и на поверхность арматуры [13 – 16], пропитка бетонной поверхности водоотталкивающими составами [17 – 19]. Выбор метода защиты основывается на условиях эксплуатации железобетона, агрессивности и продолжительности воздействия среды, требуемом сроке службы железобетонных изделий. Накоплено большое количество данных об эффективности разных способов защиты от коррозии на основании экспериментальных исследований и прогнозирования с помощью математических моделей.

Такое разнообразие научных исследований и рекомендаций по применению антикоррозионных мер требует много времени для их анализа. Для ускорения и упрощения поиска эффективного в конкретных условиях эксплуатации железобетона метода защиты от коррозии можно использовать нейросети, которые быстро анализируют информацию. Ранее были установлены проблемы нейросетевого поиска защитного покрытия для стальной арматуры [20], в частности перечисление возможных методов защиты без конкретизации, непонима-

ние нейросетью запроса, требующее дополнительных вопросов и указаний, отсутствие четких технологий нанесения защитных покрытий на арматуру. Решением этих сложностей при работе с нейросетями может быть формулирование запросов с более сложной структурой, что требует определенных навыков.

Нейросети развиваются и совершенствуются, появляются новые ресурсы с чат-ботами на основе искусственного интеллекта, поэтому целесообразно формировать навык работы с разными нейросетевыми программами и возможными вариантами и качеством предоставления ими информации.

Экспериментальная часть

Методика и материалы. Поскольку не всегда подбором методов защиты от коррозии могут заниматься профессионалы, имеющие соответствующую квалификацию в области антикоррозионной защиты, а, например, граждане, строящие для себя самостоятельно жилой дом или иные постройки и сооружения, проведена оценка использования распространенных и доступных нейросетей для поиска способа защиты от коррозии железобетона.

Запросы в текстовой форме для нейросетей формулировались в простом «бытовом» виде, как если бы их задавал рядовой строитель. Также был задан запрос сложной структуры на поиск данных с точки зрения специалиста по антикоррозионной защите.

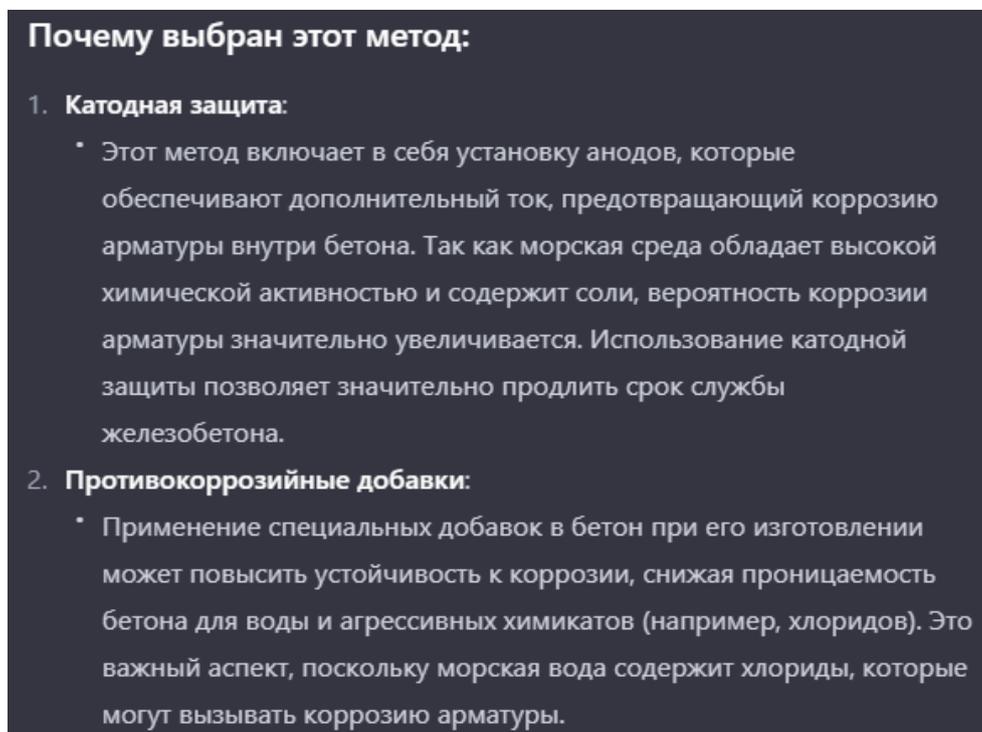
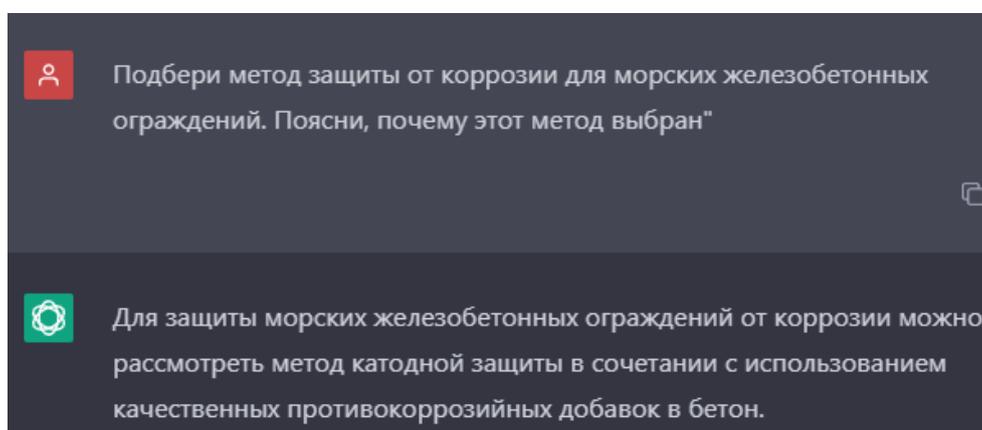
Используемые нейросети ChatGPT, Genie, Алиса, DeepSeek и Mistral представляют собой чат-боты на основе искусственного интеллекта. В основе этих нейросетей лежит генеративный предварительно обученный трансформер (A generative pre-trained transformer GPT) – это разновидность большой языковой модели (LLM) и популярная платформа для генеративного искусственного интеллекта. Это искусственная нейронная сеть, которая используется в обработке естественного языка машинами. Он основан на архитектуре глубокого обучения с использованием трансформеров, предварительно обученных на больших наборах данных без пометок и способных генерировать новый контент, похожий на человеческий.

В ходе исследования проводилась оценка понимания нейросетью запроса, корректности, точности и полноты содержания ответа нейросети, правильности выданной информации.

Результаты исследования

Сначала нейросетям был задан вопрос в простой форме: «Подбери метод защиты от коррозии для морских железобетонных ограждений. Поясни, почему этот метод выбран». Ответы чат-ботов приведены ниже.

1. ChatGPT:



Дополнительные меры:

3. Гидрофобизация поверхности:

- Обработка поверхности бетона гидрофобными составами может помочь уменьшить проницаемость бетона и защитить его от воздействия воды и солей.

4. Регулярный мониторинг:

- Установка систем мониторинга для отслеживания состояния бетона и арматуры позволит вовремя реагировать на потенциальные проблемы.

Таким образом, комбинирование катодной защиты и использования противокоррозионных добавок в бетон — это комплексный подход к защите морских ограждений от коррозии, который учитывает специфические условия эксплуатации в морской среде.

2. Genie:



Подбери метод защиты от коррозии для морских железобетонных ограждений. Поясни, почему этот метод выбран



Для защиты морских железобетонных ограждений от коррозии я бы рекомендовал использование ингибиторов коррозии в сочетании с гидрофобизирующими покрытиями. Вот почему:

1. Ингибиторы коррозии:

- **Что это:** Ингибиторы коррозии – это химические вещества, которые добавляются в бетонную смесь на этапе изготовления или наносятся на уже готовую конструкцию. Они замедляют или останавливают процесс коррозии арматуры внутри бетона.
- **Как работают:** В морской среде основной причиной коррозии является проникновение хлоридов (солей) через поры бетона к стальной арматуре. Ингибиторы коррозии действуют разными способами:
 - **Формирование пассивного слоя:** Некоторые ингибиторы реагируют с металлом, образуя на его поверхности защитную пленку (пассивный слой), которая предотвращает дальнейший контакт с агрессивной средой.
 - **Связывание хлоридов:** Другие ингибиторы связывают проникающие хлориды, делая их менее доступными для металла и снижая их коррозионную активность.
 - **Снижение электрохимической активности:** Некоторые ингибиторы изменяют электрохимический потенциал металла, снижая скорость коррозии.
- **Преимущества для морских ограждений:**
 - **Длительная защита:** Ингибиторы коррозии обеспечивают долговременную защиту арматуры, так как действуют непосредственно внутри бетона.

- **Снижение риска растрескивания бетона:** Предотвращая коррозию арматуры, ингибиторы снижают риск её расширения и растрескивания окружающего бетона. Растрескивание бетона открывает путь для еще большего проникновения хлоридов, ускоряя процесс коррозии.
- **Совместимость с бетоном:** Современные ингибиторы коррозии разработаны таким образом, чтобы быть совместимыми с бетоном, не ухудшая его механические свойства.
- **Выбор ингибитора:** Важно правильно выбрать тип ингибитора коррозии в зависимости от конкретных условий эксплуатации (концентрация хлоридов, температура и т.д.). Наиболее эффективными для морских условий считаются ингибиторы на основе органических аминов и аминокарбоксилатов.

2. Гидрофобизирующие покрытия:

- **Что это:** Гидрофобизирующие покрытия – это специальные составы, которые наносятся на поверхность бетона, делая его водоотталкивающим.
- **Как работают:** Они создают на поверхности бетона тонкий слой, который предотвращает проникновение воды и растворенных в ней хлоридов в поры бетона.
- **Преимущества для морских ограждений:**
 - **Уменьшение проникновения воды и хлоридов:** Основное преимущество – снижение скорости проникновения агрессивных веществ, что замедляет коррозию.
 - **Защита от циклов замораживания-оттаивания:** Вода, замерзающая в порах бетона, расширяется и вызывает его разрушение. Гидрофобизация снижает водонасыщение бетона, защищая его от разрушительного воздействия циклов замораживания-оттаивания. Это особенно важно в регионах с холодным климатом.
 - **Увеличение срока службы:** В совокупности эти факторы значительно увеличивают срок службы железобетонных конструкций в морской среде.
- **Выбор гидрофобизатора:** Для морских условий рекомендуется использовать гидрофобизирующие составы на основе силиконов или силанов. Они обладают хорошей проникающей способностью, устойчивостью к ультрафиолетовому излучению и долговечностью.

Почему комбинация этих методов наиболее эффективна?

- **Двойная защита:** Ингибиторы коррозии защищают арматуру изнутри, а гидрофобизирующие покрытия – снаружи. Это создает многоуровневую систему защиты.
- **Синергетический эффект:** Гидрофобизация замедляет проникновение хлоридов, что снижает нагрузку на ингибиторы коррозии и продлевает срок их действия. В свою очередь, даже если небольшое количество хлоридов все-таки проникнет в бетон, ингибиторы будут готовы предотвратить коррозию арматуры.
- **Снижение затрат на ремонт:** Предотвращение коррозии на ранних стадиях значительно снижает затраты на дорогостоящий ремонт или замену железобетонных конструкций в будущем.

Другие важные факторы:

- **Качество бетона:** Использование высококачественного бетона с низким водоцементным отношением и добавлением минеральных добавок (например, микрокремнезема) значительно снижает проницаемость бетона для хлоридов.
- **Проектирование:** Правильное проектирование железобетонных конструкций с достаточной толщиной защитного слоя бетона над арматурой также играет важную роль в предотвращении коррозии.
- **Регулярный осмотр и обслуживание:** Необходимо регулярно осматривать железобетонные ограждения и своевременно устранять любые трещины или повреждения, чтобы предотвратить проникновение воды и хлоридов к арматуре.

Таким образом, применение ингибиторов коррозии в сочетании с гидрофобизирующими покрытиями является наиболее эффективным методом защиты морских железобетонных ограждений от коррозии, обеспечивая долговременную и надежную защиту арматуры и продлевая срок службы конструкций.

3. Алиса:

Подбери метод защиты от коррозии для морских железобетонных ограждений. Поясни, почему этот метод выбран

Для защиты морских железобетонных ограждений наиболее эффективным методом является использование катодной защиты в сочетании с применением ингибиторов коррозии.

Принцип работы:

- На ограждение устанавливаются катодные заземлители (обычно из алюминия или магния)
- Создается электрический потенциал, при котором железобетон становится катодом
- Заземлители (аноды) растворяются вместо бетона и арматуры
- Дополнительно применяются ингибиторы коррозии, которые замедляют скорость химических реакций

Этот метод выбран по следующим причинам:

1. Высокая эффективность в агрессивной морской среде
2. Возможность защиты конструкций большой площади
3. Длительный срок службы (до 20-25 лет)
4. Минимальное обслуживание после установки
5. Способность защищать конструкции любой формы
6. Эффективность против как химической, так и электрохимической коррозии

Дополнительные преимущества:

- Возможность мониторинга состояния защиты
- Возможность корректировки параметров защиты
- Экологическая безопасность при правильном применении
- Совместимость с другими методами защиты

Этот метод особенно актуален для морских ограждений, так как они подвергаются постоянному воздействию соленой воды, которая является отличным проводником электричества и ускоряет процессы коррозии. Катодная защита создает защитный потенциал на поверхности бетона и арматуры, предотвращая их разрушение.

4. Mistral:

Подбери метод защиты от коррозии для морских железобетонных ограждений. Поясни, почему этот метод выбран



Для защиты морских железобетонных ограждений от коррозии можно использовать метод катодной защиты. Вот почему этот метод является подходящим:

1. **Эффективность в агрессивных средах:** Морская вода содержит высокую концентрацию солей, что ускоряет коррозию металлических элементов в железобетоне. Катодная защита активно предотвращает коррозию, подавляя электрохимические процессы, которые её вызывают.
2. **Долговечность:** Катодная защита обеспечивает длительную защиту, что особенно важно для морских сооружений, которые труднодоступны для регулярного обслуживания.

3. **Минимальные эксплуатационные затраты:** После установки системы катодной защиты, её эксплуатационные расходы относительно низкие по сравнению с другими методами, такими как регулярное нанесение защитных покрытий.
4. **Экологичность:** Современные системы катодной защиты могут быть спроектированы с минимальным воздействием на окружающую среду, что важно для морских экосистем.
5. **Универсальность:** Катодная защита может быть применена как к новым, так и к существующим сооружениям, что делает её гибким решением для различных проектов.

Таким образом, катодная защита является надежным и экономичным методом для защиты морских железобетонных ограждений от коррозии.

5. DeepSeek:



Подбери метод защиты от коррозии для морских железобетонных ограждений. Поясни, почему этот метод выбран



Для защиты морских железобетонных ограждений от коррозии рекомендуется использовать **комбинированный метод защиты, включающий покрытие поверхности гидрофобными материалами и применение ингибиторов коррозии.** Этот метод выбран по следующим причинам:

1. Покрытие гидрофобными материалами

- **Причина выбора:** Морская среда характеризуется высокой влажностью, содержанием солей и агрессивными химическими веществами, которые проникают в бетон и вызывают коррозию арматуры. Гидрофобные покрытия (например, на основе эпоксидных смол, полиуретанов или акриловых составов) создают барьер, предотвращающий проникновение воды и солей в бетон.
- **Преимущества:**
 - Уменьшает водопоглощение бетона.
 - Защищает от воздействия хлоридов и сульфатов.
 - Увеличивает срок службы конструкции.

2. Применение ингибиторов коррозии

- **Причина выбора:** Ингибиторы коррозии (например, нитриты кальция или амины) добавляются в бетонную смесь или наносятся на поверхность. Они замедляют электрохимические процессы коррозии арматуры, что особенно важно в условиях высокой солености.
- **Преимущества:**
 - Защищает арматуру от коррозии даже при наличии микротрещин в бетоне.
 - Эффективен в условиях высокой влажности и солености.

3. Дополнительные меры

- **Катодная защита:** В особо агрессивных условиях может быть использована катодная защита, которая предотвращает коррозию арматуры путем подачи электрического тока.
- **Использование нержавеющей арматуры:** Вместо обычной стальной арматуры можно использовать нержавеющую сталь или арматуру с эпоксидным покрытием, что значительно повышает устойчивость к коррозии.

Почему выбран комбинированный метод?

Морская среда является одной из самых агрессивных для железобетонных конструкций.

Комбинированный метод обеспечивает многоуровневую защиту:

- Гидрофобные покрытия защищают поверхность бетона от проникновения влаги и солей.
- Ингибиторы коррозии предотвращают разрушение арматуры даже в случае проникновения агрессивных веществ.

Такой подход позволяет значительно увеличить срок службы железобетонных ограждений в условиях морского климата.

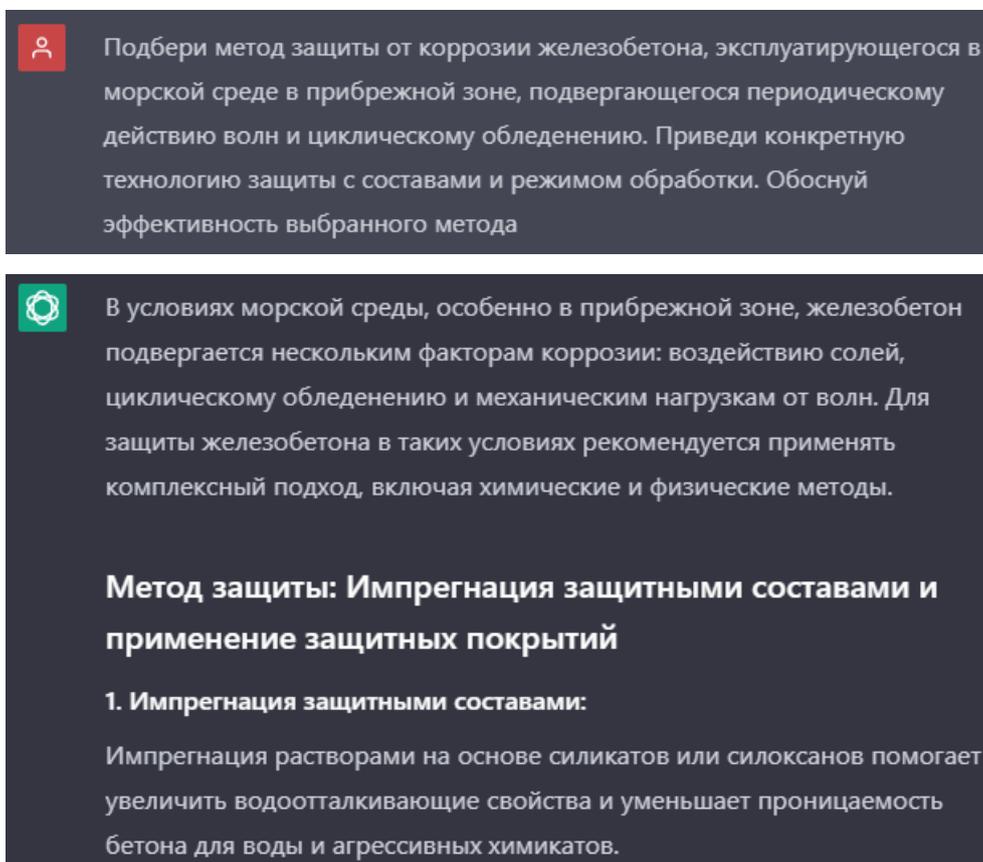
Ответы нейросетей похожи, все они указали комбинированные методы защиты железобетона морских сооружений. Общим в ответах является введение добавок ингибиторов коррозии в бетон. При этом конкретных веществ и рекомендуемых количеств для добавления в цементную смесь не указали. Нейросети привели общую информацию по методу, расписали его достоинства. Также чат-боты указали катодную защиту в качестве рекомендуемого метода

защиты железобетона, но не привели четкой технологии для выполнения операций. В отношении гидрофобной обработки поверхности бетона не было названо конкретных препаратов и режимов нанесения покрытий. То есть тоже приведена общая информации о способе защиты от коррозии в виде совета.

Нужно отметить, что приведенные нейросетями методики на самом деле используются для защиты от коррозии железобетона, эксплуатирующегося в морских условиях [9, 11, 14, 15, 17, 18, 21, 22].

Далее был задан более сложный запрос: «Подбери метод защиты от коррозии железобетона, эксплуатирующегося в морской среде в прибрежной зоне, подвергающегося периодическому действию волн и циклическому обледенению. Приведи конкретную технологию защиты с составами и режимом обработки. Обоснуй эффективность выбранного метода». В этой формулировке уточнены условия эксплуатации железобетона, дан запрос на конкретизацию метода защиты.

1. ChatGPT:



Подбери метод защиты от коррозии железобетона, эксплуатирующегося в морской среде в прибрежной зоне, подвергающегося периодическому действию волн и циклическому обледенению. Приведи конкретную технологию защиты с составами и режимом обработки. Обоснуй эффективность выбранного метода

В условиях морской среды, особенно в прибрежной зоне, железобетон подвергается нескольким факторам коррозии: воздействию солей, циклическому обледенению и механическим нагрузкам от волн. Для защиты железобетона в таких условиях рекомендуется применять комплексный подход, включая химические и физические методы.

Метод защиты: Импрегнация защитными составами и применение защитных покрытий

1. Импрегнация защитными составами:

Импрегнация растворами на основе силикатов или силоксанов помогает увеличить водоотталкивающие свойства и уменьшает проницаемость бетона для воды и агрессивных химикатов.

Состав:

- Силиконовые или силикатные (жидкие) водоотталкивающие составы. Например, можно использовать:
 - Силиконовый герметик на основе полисилоксана (например, Silane-Siloxane препараты).
 - Раствор на основе реакционноспособных металлических оксидов, который проникает внутрь пор бетона.

Режим обработки:

- Подготовить поверхность: произвести механическую очистку и, при необходимости, отшлифовать поверхность.
- Наносить состав с помощью распылителя или валика, на чистый и сухой бетон.
- Необходимо следить за тем, чтобы защитный состав был нанесен равномерно, из расчета 0.2-0.5 л/м² в зависимости от пористости бетона.
- Процесс сушки: оставить обрабатываемую поверхность для сушки в течение 24-48 часов.

2. Применение защитных покрытий:

Для повышения устойчивости к механическим воздействиям и воздействию волн рекомендуется использование полимерных защитных покрытий.

Состав:

- Полимерные компаунды, такие как эпоксидные или полиуретановые покрытия (например, эпоксидные смолы с добавлением антикоррозионных добавок).

Режим обработки:

- После полной полимеризации импрегнантов, наносится тонкий слой защитного покрытия (100-200 мкм).
- Наносится в два слоя с интервалом 6-8 часов между ними для обеспечения адгезии.

Обоснование эффективности:

1. **Снижение проницаемости:** Импрегнация снижает проницаемость бетона, что предотвращает дальнейшее пополнение солей и влаги в поры и защищает арматуру от коррозии.
2. **Защита от механических повреждений:** Полимерные покрытия обеспечивают дополнительную механическую защиту, что предотвращает разрушение бетона под воздействием волн и ледяных нагрузок.
3. **Устойчивость к химическим воздействиям:** Силиконовые и эпоксидные составы имеют высокую устойчивость к химическим воздействиям, что актуально в условиях морской среды.
4. **Увеличение срока службы:** Комплексный подход обеспечивает увеличение срока службы конструкций, снижая необходимость в дорогих и частых ремонтах.

Таким образом, применение сочетания импрегнации и полимерного покрытия является эффективным методом защиты железобетона в условиях морской среды и может значительно продлить срок службы объектов в прибрежной зоне.

2. Genie:



В условиях прибрежной зоны, с периодическим воздействием волн и циклическим обледенением, защита железобетона должна быть комплексной и учитывать как химическую агрессию (хлориды), так и физическое разрушение (замораживание/оттаивание). Я бы рекомендовал следующую технологию защиты, сочетающую несколько методов:

Технология: Комбинированная защита железобетона от коррозии в прибрежной морской зоне

Этап 1: Подготовка поверхности

- **Цель:** Удаление загрязнений, поврежденного бетона, ржавчины с арматуры, обеспечение хорошей адгезии последующих слоев.
- **Процесс:**
 - i. **Очистка:** Тщательная очистка поверхности от соли, грязи, масел, органических загрязнений струей воды под высоким давлением (минимум 250 бар).
 - ii. **Удаление поврежденного бетона:** Обследование конструкции для выявления трещин, сколов, зон расслоения. Удаление поврежденного бетона отбойным молотком или другим подходящим инструментом до здорового слоя.

- iii. **Очистка арматуры:** Очистка обнаженной арматуры от ржавчины механическим способом (пескоструйная обработка, металлические щетки). Важно добиться степени очистки Sa 2.5 по ISO 8501-1.
- iv. **Ремонт трещин (при наличии):** Заделка трещин шириной более 0.3 мм специальными ремонтными составами на цементной или полимерной основе.

Этап 2: Восстановление защитного слоя бетона и пассивация арматуры

- **Цель:** Восстановление геометрии конструкции, создание щелочной среды вокруг арматуры, пассивация арматуры.
- **Процесс:**
 - i. **Обработка арматуры антикоррозионным составом:** Нанесение на очищенную арматуру антикоррозионного состава с ингибиторами коррозии, например, *Emaco Nanocrete AP (BASF)* или *Sika FerroGard - 903 Plus (Sika)*. Наносить кистью или распылителем в 2 слоя с интервалом, указанным в инструкции производителя. Эти составы содержат ингибиторы коррозии, которые формируют защитную пленку на поверхности металла и предотвращают дальнейшую коррозию.
 - ii. **Нанесение адгезионного состава:** Нанесение адгезионного состава на обработанную арматуру и подготовленную бетонную поверхность. Например, *Emaco Nanocrete R2 (BASF)* или *Sika MonoTop - 910 N (Sika)*. Этот состав обеспечивает хорошее сцепление между старым бетоном и ремонтным составом.
 - iii. **Восстановление геометрии ремонтным составом:** Заполнение углублений и восстановление защитного слоя бетона тиксотропным ремонтным составом, армированным фиброй, с добавлением микрокремнезема, например, *Emaco Nanocrete R4 (BASF)* или *Sika MonoTop - 412 N (Sika)*. Эти составы обладают высокой прочностью, устойчивостью к морской воде и циклическому замораживанию/оттаиванию. Наносить послойно, соблюдая толщину слоя, указанную в инструкции производителя.

Этап 3: Гидрофобизация и финишное покрытие

- **Цель:** Создание водоотталкивающего барьера, защита от проникновения хлоридов, повышение морозостойкости, улучшение внешнего вида.
- **Процесс:**
 - i. **Гидрофобизация:** Нанесение гидрофобизирующего состава на основе силиконов/силанов, например, *Sika Silan Facade (Sika)* или *Mapei Antipluviol S (Mapei)*. Наносить в 2 слоя методом распыления или кистью с интервалом, указанным в инструкции производителя. Гидрофобизатор проникает в поры бетона, делая его водоотталкивающим, но паропроницаемым.
 - ii. **Финишное защитное покрытие (опционально):** Нанесение защитного покрытия на основе полиуретана или эпоксидной смолы, устойчивого к ультрафиолетовому излучению и абразивному воздействию морской воды, например, *Sikagard - 680 S (Sika)* или *Mapei Elastocolor Waterproof (Mapei)*. Это покрытие обеспечивает дополнительную защиту от воздействия окружающей среды и улучшает внешний вид конструкции. Наносить в 2 слоя валиком или распылителем, следуя инструкциям производителя.

Режим обработки:

- **Температура:** Все работы проводить при температуре не ниже +5°C и не выше +30°C. Важно следить за прогнозом погоды, чтобы избежать дождя или мороза во время нанесения и высыхания материалов.
- **Влажность:** Избегать нанесения материалов на влажную поверхность.
- **Выдержка:** Соблюдать время высыхания и отверждения каждого слоя, указанное в инструкциях производителей материалов.
- **Уход:** После нанесения ремонтных составов необходимо обеспечить правильный уход за бетоном (укрытие пленкой, увлажнение) в течение первых нескольких дней, чтобы предотвратить преждевременное высыхание и растрескивание.

Обоснование эффективности выбранного метода:

Эта технология комбинирует несколько методов защиты, которые взаимно усиливают друг друга:

- **Восстановление защитного слоя бетона:** Удаление поврежденного бетона и восстановление защитного слоя до требуемой толщины предотвращает прямой контакт агрессивной среды с арматурой.
- **Пассивация арматуры:** Антикоррозионные составы с ингибиторами коррозии формируют защитную пленку на арматуре, даже если небольшое количество хлоридов проникнет через бетон.
- **Низкая проницаемость бетона:** Использование ремонтных составов с микрокремнеземом снижает проницаемость бетона для хлоридов и других агрессивных веществ.
- **Гидрофобизация:** Гидрофобизация значительно снижает водопоглощение бетона, что уменьшает проникновение хлоридов и повышает морозостойкость. Это ключевой фактор в условиях циклического обледенения. Вода, замерзающая в порах бетона, расширяется и разрушает его. Гидрофобизация предотвращает это разрушение.
- **Финишное покрытие (опционально):** Дополнительное защитное покрытие обеспечивает защиту от ультрафиолетового излучения, абразивного воздействия морской воды и улучшает внешний вид конструкции.

Конкретные составы:

Выбор составов зависит от конкретных условий эксплуатации, требований к прочности и долговечности конструкции, а также бюджета. Приведенные выше примеры материалов от BASF и Sika являются лишь ориентировочными. Перед применением необходимо проконсультироваться со специалистами и изучить технические характеристики материалов.

Преимущества данного подхода:

- **Комплексная защита:** Учитывает все основные факторы, влияющие на коррозию железобетона в морской среде: химическую агрессию, физическое разрушение.
- **Долговечность:** Правильное применение данной технологии позволяет значительно продлить срок службы железобетонных конструкций в прибрежной зоне.
- **Ремонтопригодность:** В случае повреждения защитного покрытия его можно легко восстановить.

Важно:

- **Квалифицированный персонал:** Для выполнения работ необходимо привлечь квалифицированный персонал, имеющий опыт работы с ремонтными и защитными составами для бетона.
- **Соблюдение технологий:** Строгое соблюдение технологий нанесения материалов, указанных в инструкциях производителей, является обязательным условием для обеспечения эффективности защиты.
- **Регулярный мониторинг:** Необходимо регулярно осматривать железобетонные конструкции и своевременно устранять любые повреждения защитного покрытия.

В заключение, предложенная технология представляет собой комплексный и эффективный способ защиты железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной прибрежной морской среде, подверженных периодическому воздействию волн и циклическим замораживаниям/оттаиваниям. Правильное применение этой технологии позволит значительно увеличить срок службы железобетона и снизить затраты на ремонт и обслуживание.

3. Алиса:

Подбери метод защиты от коррозии железобетона, эксплуатирующегося в морской среде в прибрежной зоне, подвергающегося периодическому действию волн и циклическому обледенению. Приведи конкретную технологию защиты с составами и режимом обработки. Обоснуй эффективность выбранного метода

Для защиты железобетонных конструкций в указанных условиях рекомендуется комплексный метод защиты с использованием ингибиторов коррозии серии CI:

Технология защиты:

1. Первичная защита (на этапе бетонирования):

- Добавление химической добавки MasterLife CI 222 непосредственно в бетонную смесь
- Обеспечивает первичную защиту на весь срок службы конструкции

2. Ремонтно-восстановительные работы:

- Очистка поверхности от загрязнений и старой краски
- Ремонт повреждений ремонтной смесью MasterEmaco S 488 CI класса R4
- Обработка обнаженной арматуры антикоррозионным покрытием MasterEmaco P 5000 AP

3. Профилактическая защита:

- Нанесение мигрирующего ингибитора коррозии MasterProtect 8500 CI
- Создает защитный барьер в бетоне

4. Уход за свежееуложенным материалом:

- Применение пленкообразующих средств MasterKure для влажного ухода

Эффективность метода обусловлена:

1. Комплексным подходом к защите:

- Первичная защита бетона
- Ремонт повреждений
- Профилактическая защита

2. Учетом специфических условий эксплуатации:

- Устойчивость к периодическому воздействию волн
- Стойкость к циклическому обледенению
- Защита от хлоридной коррозии

3. Экономической эффективностью:

- Снижение затрат на обслуживание до 50%
- Увеличение срока безопасной эксплуатации в 2 раза
- Длительный срок действия защитных составов

4. Научно-технической обоснованностью:

- Подтвержденная многолетними исследованиями эффективность
- Положительные заключения научных институтов
- Успешный опыт применения на реальных объектах

Данный метод обеспечивает надежную защиту железобетонных конструкций в сложных условиях морской среды с учетом специфических нагрузок от волн и обледенения, при этом экономически эффективен и имеет научно-техническое обоснование.

4. Mistral:

Подбери метод защиты от коррозии железобетона, эксплуатирующегося в морской среде в прибрежной зоне, подвергающегося периодическому воздействию волн и циклическому обледенению. Приведи конкретную технологию защиты с составами и режимом обработки. Обоснуй эффективность выбранного метода

M Для защиты железобетона, эксплуатирующегося в морской среде в прибрежной зоне с периодическим воздействием волн и циклическим обледенением, можно использовать комбинированный метод, включающий гидрофобизацию и нанесение полимерных покрытий. Вот конкретная технология защиты:

Технология защиты:

1. **Гидрофобизация бетона:**

- **Состав:** Использование силиконовых или силикатных гидрофобизаторов, которые проникают в поры бетона и создают водоотталкивающий слой.
- **Режим обработки:**
 - Очистка поверхности от грязи и пыли.
 - Нанесение гидрофобизатора кистью или распылителем в два слоя с интервалом в 24 часа.
 - Сушка при температуре не ниже +5°C в течение 48 часов.

2. Полимерные покрытия:

- **Состав:** Эпоксидные или полиуретановые покрытия, которые обладают высокой адгезией и устойчивостью к агрессивным средам.
- **Режим обработки:**
 - Подготовка поверхности: удаление старых покрытий, обезжиривание.
 - Нанесение грунтовки для улучшения адгезии.
 - Нанесение основного покрытия в два слоя с интервалом в 24 часа.
 - Сушка при температуре не ниже +10°C в течение 72 часов.

Обоснование эффективности:

1. **Стойкость к агрессивным средам:** Гидрофобизаторы и полимерные покрытия устойчивы к воздействию солей и влаги, что снижает риск коррозии арматуры.
2. **Защита от циклического обледенения:** Покрытия предотвращают проникновение воды в бетон, что снижает риск разрушения при замерзании.
3. **Долговечность:** Комбинированный подход обеспечивает длительную защиту, что особенно важно для сооружений в прибрежной зоне.
4. **Экономичность:** Хотя начальные затраты могут быть высокими, долговечность и минимальные эксплуатационные расходы делают этот метод экономически выгодным.
5. **Экологичность:** Современные гидрофобизаторы и полимерные покрытия могут быть экологически безопасными, что важно для прибрежных зон.

Этот комбинированный метод обеспечивает надежную защиту железобетона в условиях агрессивной морской среды и циклического обледенения.

5. DeepSeek:

Подбери метод защиты от коррозии железобетона, эксплуатирующегося в морской среде в прибрежной зоне, подвергающегося периодическому действию волн и циклическому обледенению. Приведи конкретную технологию защиты с составами и режимом обработки. Обоснуй эффективность выбранного метода



Для защиты железобетона, эксплуатирующегося в морской среде в прибрежной зоне с периодическим действием волн и циклическим обледенением, рекомендуется использовать **комплексную технологию защиты, включающую пропитку поверхности гидрофобными составами и нанесение защитного покрытия на основе эпоксидных смол**. Этот метод обеспечивает долговременную защиту от коррозии, механических повреждений и воздействия агрессивных сред.

Технология защиты

1. Пропитка гидрофобными составами

- **Состав:** Используются кремнийорганические гидрофобизаторы (например, **силиконы** или **силаны**). Пример конкретного состава: **Гидрофобизатор на основе метилсиликоната калия** (например, "Аквасил" или аналоги).

- **Режим обработки:**

- Очистка поверхности от загрязнений, солей и рыхлого бетона.
- Нанесение гидрофобизатора методом распыления или кистью в 2-3 слоя с промежуточной сушкой 2-4 часа.
- Расход состава: 200-300 г/м².

- **Эффективность:**

- Снижает водопоглощение бетона до 90%.
- Предотвращает проникновение солей и влаги вглубь бетона.
- Увеличивает морозостойкость бетона, что особенно важно при циклическом обледенении.

2. Нанесение защитного покрытия на основе эпоксидных смол

- **Состав:** Двухкомпонентная эпоксидная смола с добавлением антикоррозионных наполнителей (например, Эпоксидное покрытие "Эпостат" или аналоги).

- **Режим обработки:**

- Очистка и обезжиривание поверхности.
- Нанесение грунтовочного слоя эпоксидной смолы с добавлением антикоррозионных пигментов (например, цинк-фосфатных).
- Нанесение основного слоя эпоксидного покрытия толщиной 200-300 мкм.
- Сушка при температуре +15...+25°C в течение 24 часов.

- **Эффективность:**

- Создает прочный барьер против проникновения воды, солей и химических реагентов.
- Устойчиво к механическим воздействиям (удары волн, трение льда).
- Обладает высокой адгезией к бетону.

3. Дополнительные меры

- **Использование ингибиторов коррозии:** Добавление в бетонную смесь или нанесение на поверхность ингибиторов коррозии (например, нитрита кальция) для дополнительной защиты арматуры.
- **Катодная защита:** Установка системы катодной защиты для предотвращения коррозии арматуры в особо агрессивных условиях.

Обоснование эффективности метода

1. Защита от влаги и солей:

- Гидрофобизаторы и эпоксидные покрытия создают барьер, предотвращающий проникновение морской воды и солей в бетон, что снижает риск коррозии арматуры.

2. Устойчивость к механическим воздействиям:

- Эпоксидные покрытия обладают высокой прочностью и устойчивостью к истиранию, что важно при воздействии волн и льда.

3. Морозостойкость:

- Гидрофобизаторы снижают водопоглощение, что уменьшает риск разрушения бетона при замерзании и оттаивании.

4. Долговечность:

- Комбинированная защита обеспечивает долгий срок службы конструкции (20-30 лет и более) даже в агрессивных условиях.

5. Экономическая эффективность:

- Использование доступных материалов и технологий делает метод экономически выгодным для крупных объектов.

Пример конкретного решения

- **Гидрофобизатор:** "Аквасил" (метилсиликат калия), нанесение в 2 слоя.
- **Эпоксидное покрытие:** "Эпостат-М" (двухкомпонентное), толщина слоя 250 мкм.
- **Ингибитор коррозии:** Нитрит кальция, добавление в бетонную смесь или нанесение на поверхность.

Этот метод обеспечивает надежную защиту железобетона в условиях морской среды, циклического обледенения и механических нагрузок.

При такой формулировке запроса нейросети подобрали в качестве антикоррозионного метода пропитку бетона гидрофобными составами и/или нанесение на его поверхность защитного слоя в комбинировании с полимерным покрытием (эпоксидным) для арматуры. Не все нейросети в своих ответах указали названия составов для обработки поверхностей бетона и арматуры. Стоит заметить, что DeepSeek подобрал препараты российских производителей, то есть нейросеть распознала и использовала при поиске решения местоположение пользователя. В большинстве своем ответы содержат достаточно развернутое, а местами и детальное, описание технологии нанесения защитных составов от операций подготовки поверхностей до режимов сушки или отверждения.

Заключение

В работе показано, что даже нейросетевые чат-боты могут быть использованы для подбора и характеристики антикоррозионных методов защиты от коррозии различных материалов. Нейросети поняли запрос, выдали корректные и правильные ответы в удобной форме с последовательной структурой. Однако при запросе, имеющем упрощенную форму, информация от нейросетей является недостаточно точной и содержит не полные описания технологических режимов антикоррозионной обработки.

Для получения четких ответов с конкретными рекомендациями требует формулировать сложноструктурированные запросы, содержащие как можно больше информации об условиях эксплуатации изделий, о различных воздействиях и нагрузках на них, продолжительности этих воздействий, составе агрессивных сред и защищаемых материалов. Можно также указывать в запросе требуемый срок службы изделия, задавать ограничения по стоимости методики защиты от коррозии, устанавливать допустимую степень и скорость деструкции в указанных условиях эксплуатации. С помощью нейросетей также можно провести сравнение нескольких подобранных методов защиты или предложенных препаратов и антикоррозионных материалов с точки зрения экономической эффективности и прогнозируемого увеличения срока службы изделий.

Список литературы

1. Алексеев С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. М.: Стройиздат, 1968. 231 с.
2. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин [и др.]. М.: Мир, 1983. 399 с.
3. Степанова В.Ф. Долговечность бетона. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 124 с.
4. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair / L. Bertolini [et al.]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2013. 434 p.
5. Шамшина К.В. Коррозия арматуры в нормальных трещинах железобетонных элементов и конструкций при действии переменной нагрузки // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2018. № 2. 08SATS218.
6. Andrade C. Propagation of reinforcement corrosion: principles, testing and modeling // Materials and Structures. 2019. V. 52. Article no. 2.
7. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем применения активных заполнителей второго типа / Н.М. Толыпина [и др.] // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2019. Т. 4. №. 2. С. 27–32.

8. Influence of the Type of Aggregate from Industrial Waste on Corrosion Resistance of Modified Fine-Grained Concrete / L. Zajceva [et al.] // *Buildings*. 2021. V. 11. Issue 8. Article no. 352.

9. al-Swaidani A.M., Aliyan S.D. Effect of Adding Scoria as Cement Replacement on Durability-Related Properties // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015. V. 9. N. 2. P. 241–254.

10. Ингибирование коррозии бетонного композита комбинированной добавкой нитрита натрия и силиката натрия / В.Е. Румянцева [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология»*. 2021. Т. 64. Вып. 8. С. 57–62.

11. Research on Inhibiting Performance of Compound Corrosion Inhibitors Based on Nitrite / B. Yi [et al.] // *Advances in Civil Engineering*. 2021. V. 2021. Article ID 6655080.

12. Ингибиторы хлоридной коррозии арматурной стали в бетоне на основе производных солей карбоновых кислот и диметиламинопропиламина / О.А. Козадеров [и др.] // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023. Т. 25. № 3. С. 435–444.

13. Corrosion Resistant Coating from Nano Printed Circuit Board Powder for the Reinforced Concrete Structures / R. Mohana [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2023. V. 2023. Article ID 2141115.

14. Khomwan N., Sujjavanich S., Kheaw-on T. Effect of crystalline waterproofing materials on corrosion potential of steel in concrete // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024. V. 9. Article no. 12.

15. Fedosov S., Roumyantseva V., Konovalova V. Phosphate coatings as a way to protect steel reinforcement from corrosion // *MATEC Web of Conferences*. 2019. V. 298. Article ID 00126.

16. Anti-Corrosion Reinforcements Using Coating Technologies—A Review / L. Yan [et al.] // *Polymers*. 2022. V. 14. Issue 21. Article no. 4782.

17. Применение гидрофобных покрытий на основе ПМГС для бетона при борьбе с обледенением в дорожно-транспортной инфраструктуре / М.И. Кожухова [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. Т. 7. № 3. С. 8–15.

18. Hydrophobization of concrete and aerated concrete by impregnation with calcium polysulfide / I.A. Massalimov [et al.] // *Nanotechnologies in construction*. 2024. V. 16. N. 2. P. 140–151.

19. Yoon C.B., Lee H.S. Experimental Study on the Evaluation of Physical Performance and Durability of Cement Mortar Mixed with Water Repellent Impregnated Natural Zeolite // *Materials*. 2020. V. 13. Issue 15. Article no. 3288.

20. Коновалова В.С., Ваганов Н.А., Раджабов С.З. Нейросети как инструмент подбора защитных покрытий для стальной арматуры // *Химия, физика и механика материалов*. 2024. № 4 (43). С. 70–88.

21. Кузьмин Ю.Л., Ставицкий О.А. Электрохимическая защита от коррозии стальной арматуры в железобетоне при эксплуатации в морской воде // *Вопросы материаловедения*. 2018. № 4 (96). С. 185–190.

22. An experimental study of cathodic protection for chloride contaminated reinforced concrete / H.M. Oleiwi [et al.] // *Materials and Structures*. 2018. V. 51. Article no. 148.

References

1. Alekseev S.N. [Corrosion and protection of reinforcement in concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1968. 231 p. (In Russian)

2. Moskvina V.M., et al. [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection]. Moscow: Mir, 1983. 399 p. (In Russian)

3. Stepanova V.F. [Durability of concrete]. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2023. 124 p. (In Russian)

4. Bertolini L., et al. [Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2013. 434 p.

5. Shamshina K.V. [Corrosion of reinforcement in normal cracks of jelly-concrete elements and structures under the action of a variable load]. Russian journal

of transport engineering, 2018, no. 2, 08SATS218. doi: 10.15862/08SATS218 (In Russian)

6. Andrade C. [Propagation of reinforcement corrosion: principles, testing and modeling]. *Materials and Structures*, 2019, vol. 52, article no. 2. doi: 10.1617/s11527-018-1301-1

7. Tolypina N.M., Schigoreva E.M., Golovin M.V., Schigorev D. [Increase of concrete inoxidizability by application of active fillers of the second type]. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov*, 2019, no. 2, pp. 27-32. doi: 10.12737/article_5c73fbf6df9f53.10093605 (In Russian)

8. Zajceva L., Lucyk E., Latypova T., Latypov V., Fedorov P., Salamanova M. [Influence of the Type of Aggregate from Industrial Waste on Corrosion Resistance of Modified Fine-Grained Concrete]. *Buildings*, 2021, vol. 11, issue 8, article no. 352. doi: 10.3390/buildings11080352

9. al-Swaidani A.M., Aliyan S.D. [Effect of Adding Scoria as Cement Replacement on Durability-Related Properties]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2015, vol. 9, no. 2, pp.241-254. doi: 10.1007/s40069-015-0101-z

10. Rumyantseva V.E., Konovalova V.S., Goglev I.N., Kasiyanenko N.S. [Inhibition of concrete composite corrosion by combined addition of sodium nitrite and sodium silicate]. *ChemChemTech*, 2021, vol. 64, issue 8, pp. 57-62. doi: 10.6060/ivkkt.20216408.6366 (In Russian)

11. Yi B., Wang J., Feng L., Song Y., Liu J., Shu H. [Research on Inhibiting Performance of Compound Corrosion Inhibitors Based on Nitrite]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, vol. 2021, article ID 6655080. doi: 10.1155/2021/6655080

12. Kozaderov O.A., Shevtsov D.S., Potapov M.A., Zartsyn I.D., Grushevskaya S.N., Kruzhilin A.A., Ilina E.A., Tkachenko K.A., Shikhaliev K.S. [Inhibitors of chloride corrosion of reinforcement steel in concrete based on derivatives of salts of carboxylic acids and dimethylaminopropylamine]. *Kondensirovannyye Sredy I Mezhfaznye Granitsy = Condensed Matter and Interphases*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 435-444. doi: 10.17308/kcmf.2023.25/11393 (In Russian)

13. Mohana R., Selvaganesh D., Anto Issac A., Vignesh Kumar M. [Corrosion Resistant Coating from Nano Printed Circuit Board Powder for the Reinforced Concrete Structures]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023, vol. 2023, article ID 2141115. doi: 10.1155/2023/2141115
14. Khomwan N., Sujjavanich S., Kheaw-on T. [Effect of crystalline waterproofing materials on corrosion potential of steel in concrete]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2024, vol. 9, article no. 12. doi: 10.1007/s41062-023-01313-4
15. Fedosov S., Roumyantseva V., Konovalova V. [Phosphate coatings as a way to protect steel reinforcement from corrosion]. *MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 298, article ID 00126. doi: 10.1051/mateconf/201929800126
16. Yan L., Deng W., Wang N., Xue X., Hua J., Chen Z. [Anti-Corrosion Reinforcements Using Coating Technologies—A Review]. *Polymers*, 2022, vol. 14, issue 21, article no. 4782. doi: 10.3390/polym14214782
17. Kozhuhova M.I., Sobolev K.G., Strokova V.V., Kozhuhova N.I. [Use of pmhs-based hydrophobic coatings to fight slippery concrete transportation infrastructure]. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov*, 2022, vol. 7, no. 3, pp. 8-15. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-8-15 (In Russian)
18. Massalimov I.A., Massalimov B.I., Akhmetshin B.S., Khusainov A.N., Mustafakulov Sh.S., Mustafin A.G. [Hydrophobization of concrete and aerated concrete by impregnation with calcium polysulfide]. *Nanotechnologies in construction*, 2024, vol. 16, no. 2, pp. 140-151. doi: 10.15828/2075-8545-2024-16-2-140-151
19. Yoon C.B., Lee H.S. [Experimental Study on the Evaluation of Physical Performance and Durability of Cement Mortar Mixed with Water Repellent Impregnated Natural Zeolite]. *Materials*, 2020, vol. 13, issue 15, article no. 3288. doi: 10.3390/ma13153288
20. Konovalova V.S., Vaganov N.A., Radzhabov S.Z. [Neural networks as a tool for selecting protective coatings for steel reinforcement]. *Himiya, fizika i mekhanika materialov*, 2024, no. 4 (43), pp. 70-88. (In Russian)
21. Kuzmin Yu.L., Stavitsky O.A. [Electrochemical protection against corrosion for steel bars in reinforced concrete structures exposed to seawater]. *Voprosy*

Materialovedeniya, 2018, no. 4 (96), pp. 185-190. doi: 10.22349/1994-6716-2018-96-4-185-190 (In Russian)

22. Oleiwi H.M., Wang Y., Curioni M., Chen X., Yao G., Augustus-Nelson L., Ragazzon-Smith A.H., Shabalin I. [An experimental study of cathodic protection for chloride contaminated reinforced concrete]. *Materials and Structures*, 2018, vol. 51, article no. 148. doi: 10.1617/s11527-018-1273-1

Коновалова Виктория Сергеевна – д-р техн. наук доцент, профессор кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Ваганов Никита Андреевич – магистрант кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

ХРОНИКА, БИБЛИОГРАФИЯ

**25-ЛЕТИЕ ЖУРНАЛА
«СОРБЦИОННЫЕ И ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ»**

В.Ф. Селеменев¹, О.Б. Рудаков^{2*}, А.К. Буряк³

¹*Воронежский государственный университет,
Российская Федерация, 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1*

²*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84*

³*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Российская Федерация, 119071, Москва, Ленинский проспект, 31, корп. 4*

**Адрес для переписки: Рудаков Олег Борисович, e-mail: robi57@mail.ru*

Рассмотрена история создания и современное состояние журнала «Сорбционные и хроматографические процессы», который публикует научные статьи на русском и английском языках, посвященные исследованию структуры и свойств природных и синтетических сорбентов, носителей, ионообменных гранульных и мембранных материалов; термодинамики, кинетики и динамики сорбционных, ионообменных, мембранных процессов; теоретических и практических аспектов различных хроматографических и других методов Separation Science.

Ключевые слова: научная периодика, сорбция, хроматография, ионообменные процессы, мембранные процессы

**25TH ANNIVERSARY OF THE JOURNAL
"SORPTION AND CHROMATOGRAPHIC PROCESSES"**

V.F. Selemenev¹, O.B. Rudakov^{2*}, A.K. Buryak³

¹*Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation*

²*Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Octyabrya, 84, Voronezh, 394006,
Russian Federation*

³*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy
of Sciences, Leninsky Prospekt, 31, Building 4, Moscow, 119071, Russian Federation*

**Correspondence address: Rudakov Oleg Borisovich, e-mail: robi57@mail.ru*

The article reviews the history of the creation and the current state of the journal "Sorption and Chromatographic Processes", which publishes scientific articles in Russian and English devoted to the study of the structure and properties of natural and synthetic sorbents, carriers, ion-exchange granular and membrane materials; thermodynamics, kinetics and dynamics of sorption, ion-exchange, membrane processes; theoretical and practical aspects of various chromatographic and other methods of Separation Science.

Keywords: scientific periodicals, sorption, chromatography, ion-exchange processes, membrane processes.

В этом, 2025 году, наступила первая юбилейная дата выхода в свет первого номера журнала «Сорбционные и хроматографические процессы». Учредителем данного научного периодического издания по решению Научного Совета по хроматографии РАН от 11.12.2000 года был выбран и стал Воронежский ордена Ленина государственный университет имени Ленинского комсомола. Выбор учредителя был сделан не случайно.

Во-первых, на базе кафедры аналитической химии ВГУ, начиная с 1953 года, сложился коллектив сотрудников и преподавателей, который в течение нескольких десятилетий успешно функционировал, органически сочетая фундаментальные и прикладные исследования в области хроматографии, ионного обмена и мембранных процессов. Указанными научно-исследовательскими работами последовательно руководили профессора Валентин Пименович Мелешко – основатель Воронежской школы хроматографистов, Геннадий Афанасьевич Чикин, Владимир Алексеевич Шапошник и Владимир Федорович Селеменев.

Во-вторых, на химическом факультете ВГУ в 1962 году был организован Институт хроматографии (НИИХ ВГУ). В 1990 году в НИИХ, выполнявшего прикладные и конструкторские работы, трудилось более 200 сотрудников. Во НИИХ были разработаны ионообменные технологии, спроектировано и внедрено в производство более 50 промышленных ионообменных установок получения ультрачистой воды из природных источников, для очистки сточных вод и электролитов гальванических производств, для очистки газовых выбросов, для очистки свеклосахарных и сахарно-рафинадных сиропов, для выделения глицерина, маннита, гидроксикислот, аминокислот из полупродуктов неполной переработки пищевой, микробиологической и фармацевтической промышленности. Следует отметить, что первая в Советском Союзе промышленная ионообменная установка по получению глубокообессоленной воды под руководством В.П. Мелешко была внедрена на Воронежском заводе радиодеталей.

В-третьих, ВГУ к 2000 году стал инициатором проведения Всесоюзных (Всероссийских) научно-практических конференций по ионному обмену и мембранным процессам, получившим название «Иониты».

В-четвертых, с 1966 по 1998 гг. в ВГУ выходил ежегодный сборник научных статей «Теория и практика сорбционных процессов» (23 выпуска), в котором публиковались материалы исследований ученых из Москвы, Ленинграда, Киева, Воронежа, Белгорода, Минска, Еревана, Харькова и др.

В-пятых, в ВГУ в период 1968-2000 гг. в рамках Научного Совета по хроматографии эффективно работала секция «Промышленная хроматография» (с 1998 г «Ионообменная хроматография»), председателями которой последовательно были профессора В.П. Мелешко, Г.А. Чикин, В.Ф. Селеменов, входившие в состав Бюро Научного Совета по адсорбции и хроматографии.

И наконец, к 2000 году на кафедрах аналитической и физической химии сотрудники и преподаватели защитили 36 кандидатских и 8 докторских диссертаций в области хроматографии, ионного обмена и мембранных про-

цессов. В ВГУ функционировали 2 диссовета по специальностям «Аналитическая химия», «Физическая химия», в которых защищались специалисты, проводившие исследования в области Separation Science (физико-химической сепарации).

В настоящее время журнал «Сорбционные и хроматографические процессы» зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ №ФС77-28319 от 15.06.2007). Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по следующим специальностям:

- 1.4.1. Неорганическая химия (химические науки);
- 1.4.2. Аналитическая химия (химические науки);
- 1.4.4. Физическая химия (химические науки);
- 1.4.6. Электрохимия (химические науки);
- 1.4.7. Высокомолекулярные соединения (химические науки);
- 1.4.9. Биоорганическая химия (химические науки);
- 1.4.10. Коллоидная химия (химические науки);
- 1.5.4. Биохимия (биологические науки);
- 1.5.6. Биотехнология (биологические науки, химические науки).

Журнал принимает материалы к публикации по всем этим специальностям. Он индексируется в библиографических базах данных РИНЦ, Scopus, RSCI, Chemical Abstracts, EBSCO, Crossref, DOAJ.

В электронной научной библиотеке elibrary.ru можно проследить положительную динамику библиометрических показателей журнала за последние 10 лет. В настоящее время практически все они находятся в зеленой и желтой зоне, он занимает по рейтингу Science Index РИНЦ 50 место среди 106 индексируемых изданий по направлению «Химия», число просмотров журнала за год достигло более 19 тысяч, загрузок статей – 4,5 тысячи, ци-

тирований – более 500, средний индекс Хирша авторов 10,9, индекс Херфиндаля 434, и т. д.

Топ 10 авторов по числу цитирований в РИНЦ за 5 лет: Селеменев В.Ф. (92), Рудаков О.Б. (54), Крысанова Т.А. (48), Котова Д.Л. (47), Свергузова С.В. (45), Шайхиев И.Г. (45), Галимова Р.З. (43), Шелехова Н.В. (40), Буряк А.К. (39), Долгоносков А.М. (37).

Принято решение в Научном Совете по аналитической химии РАН о включении журнала в список научных изданий РАН, что станет серьезным стимулом для дальнейшего успешного развития журнала «Сорбционные и хроматографические процессы».

Селеменев Владимир Федорович – д-р хим. наук, проф. кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета

Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Буряк Алексей Константинович – д-р хим. наук, член-корр. РАН, директор Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН

К ЮБИЛЕЮ ОЛЬГИ ВЛАДИМИРОВНЫ АРТАМОНОВОЙ



Ольга Владимировна Артамонова – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры химии и химической технологии ВГТУ. Родилась 5 июня 1975 года в г. Воронеж. В 2001 году она с отличием окончила Воронежский государственный университет по направлению «Химия», получив квалификацию «Магистр химии». В 2004 г., по окончании очной аспирантуры (ВГУ, г. Воронеж; Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, г. Санкт-Петербург) защитила кандидатскую диссертацию, посвященную проблемам синтеза новых нанокристаллических и нанокерамических композиций на основе диоксида циркония.

С 2004 г. и по настоящее время Ольга Владимировна работает в Воронежском государственном техническом университете. Она начинала как ассистент кафедры химии ВГАСУ, затем была старшим преподавателем, а в 2006 г. стала доцентом этой же кафедры.

В 2009 г. она разработала и открыла на кафедре основную профессиональную образовательную программу по направлению «Химия, физика и механика материалов».

С 2010 по 2013 гг. Артамонова О.В. обучалась в очной докторантуре ВГАСУ. В 2019 г. она защитила диссертацию «Технология наномодифицирования структуры неорганических систем твердения строительных композитов» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности «05.23.05 – Строительные материалы и изделия».

С 2020 г. Ольга Владимировна занимает должность профессора кафедры химии и химической технологии материалов и читает лекции по дисциплинам «Химия», «Материалы: прошлое будущее, настоящее», «Синтез современных твердофазных материалов», «Основы нанотехнологий», а также ведет специальные курсы «Структурная химия» и «Химия твердого тела» у аспирантов.

Вместе с этим, Ольга Владимировна занимается научно-исследовательской деятельностью. С 2003 года и по настоящее время является исполнителем работ по различным грантам. Область ее научных интересов составляют следующие вопросы: синтез наноструктур и нанотехнологии неорганических систем твердения и композитов; разработка нанодобавок для модифицирования структур строительных композитов; разработка и исследование свойств 3D-печатных строительных композитов. Закономерным результатом её трудов является высокая публикационная активность – О.В. Артамонова является автором более 200 публикаций, из которых 25 учебно-методических работ (в том числе 16 учебных пособий), 5 монографий, 5 патентов.

Стоит отметить, что Ольга Владимировна, является интересным, харизматичным, творческим человеком, который показывает студентам, что наука может быть увлекательной, доступной, красивой и совсем не скучной. Она активно вовлекает в научную деятельность бакалавров, магистров, аспирантов. Под руководством О.В. Артамоновой успешно подготовлена и защищена 1 кандидатская диссертация, в данный момент осуществляется научное консультирование 1 аспиранта.

Наряду с педагогической и научной деятельностью Ольга Владимировна занимается общественной работой – входит в состав диссертационного совета 24.2.286.05 созданного на базе ВГТУ (г. Воронеж); является членом редакционной коллегии различных научных журналов, в частности, журнала «Химия, физика и механика материалов»; долгое время являлась руководителем СНО кафедры химии и химической технологии материалов ВГТУ; принимает участие в кружковом движении ВГТУ для школьников и студентов.

Дорогая Ольга Владимировна!

Коллектив кафедры химии и химической технологии материалов от всей души поздравляет Вас с юбилеем. Мы знаем Вас не только как справедливого педагога и талантливого ученого, но и как чуткую, изящную, обаятельную натуру. Желаем Вам доброго здоровья, благополучия во всех начинаниях, научных и творческих успехов!

М.А. Шведова, В.А. Небольсин, О.Б. Рудаков, О.Б. Кукина

Шведова Мария Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Небольсин Валерий Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Кукина Ольга Борисовна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Научное издание

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

Выпуск № 2(45), 2025

Научный журнал

В авторской редакции

*Дата выхода в свет: 30.06.2025.
Формат 60×84 1/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 20,2. Уч.-изд. л. 16,5.
Тираж 25 экз. Заказ № 173
Цена свободная*

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84