



ВГТУ

ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

Воронежский государственный
технический университет

химия, физика и механика
материалов

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выпуск № 4(47), 2025

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

**ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА
МАТЕРИАЛОВ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

Выпуск № 4(47), 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 (регистрационный номер 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 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 техн. наук, проф. С.И. Лазарев (Тамбов, ТГТУ); д-р техн. наук, проф. Л.В. Моргун (г. Ростов-на-Дону, ДГТУ); канд. техн. наук, доц. А.А. Лукин (г. Челябинск, ЮУрГУ (НИУ)), 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. 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 хим. наук, доц. Е.В. Томина (г. Воронеж, ВГЛТУ); 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 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. Турдиалиев (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, материаловедам, 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, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, комн. 6420

тел.: +7(473)2717617, +7(980)5399928

E-mail: orudakov@cchgeu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Макеев А.И.</i> Исследования влияния содержания железистых минералов в заполнителе на прочность мелкозернистого бетона.....	4
<i>Коновалова В.С., Ваганов Н.А., Спиридонов Е.М., Дурсунов Д.Б.</i> Применение чат-ботов для оценки гидрофобности поверхности бетона.....	19
<i>Figovsky O., Hudzenko N.</i> Non-isocyanate polyurethane FOAMS (NIPUFS). Part 2.....	38
<i>Винокурова И.М., Хонькин Н.А., Титова Д.В.</i> Типология коррозионных повреждений составляющих погружного центробежного насоса ЦН160/112 с учетом рабочих технических данных.....	54

ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ

<i>Ботова Н.С., Фам Тхи Гам, Зяблов А.Н.</i> Морфологический анализ полимерных пленок.....	80
<i>Рудаков О.Б., Лукин А.А., Вебер А.Л.</i> Электрохимические методы идентификации микропластиков (Часть 1).....	90

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Усачев А.М., Мильниченко Е.А., Телегина А.В.</i> Способы получения космических строительных материалов.....	104
<i>Моргун В.Н., Моргун Л.В., Нагорский В.В., Дементьева Е.В.</i> Технологические решения получения пенобетонов с преимущественно замкнутой пористостью.....	113

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Тепоян О.М., Колюкаева С.Г., Корнеева В.В.</i> Явление светового загрязнения. Часть 1	126
--	-----

ПЕРСОНАЛИИ

<i>Усачев А.М., Белькова Н.А., Перцев В.Т.</i> Памяти Сергея Михайловича Усачева.....	136
<i>Рудаков О.Б., Небольсин В.А., Кукина О.Б., Шведова М.А.</i> Академик Фиговский О.Л. удостоен международной награды.....	149

БИБЛИОГРАФИЯ

<i>Полянский К.К., Рудаков О.Б.</i> О новой монографии Шелеховой Н.В., члена редакционной коллегии журнала «Химия, физика и механика материалов».....	150
<i>Рудаков О.Б.</i> Монография академика Олега Львовича Фиговского.....	152

УДК 691.322

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ
МИНЕРАЛОВ В ЗАПОЛНИТЕЛЕ НА ПРОЧНОСТЬ
МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА**

A.I. Макеев

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

Адрес для переписки: Макеев Алексей Иванович, e-mail: amakeev@cchgeu.ru

В статье рассматривается проблема строительно-технологической утилизации отходов (хвостов) обогащения железистых кварцитов АО «Олкон» (Мурманская обл.) в производстве строительных изделий из мелкозернистого бетона. Цель исследований состоит в изучении зависимости свойств мелкозернистого бетона от остаточного содержания рудных минералов в отходах. Даётся характеристика использованных сырьевых материалов и методика изготовления и испытаний бетонной смеси и образцов бетона. Представлены результаты экспериментальных исследований свойств сырьевых материалов и кинетики набора прочности бетонов на основе заполнителя с содержанием недоизвлечённых железорудных минералов (считая на металлическое железо) Fe = 3, 5, 9, 15, 20 и 25 %. Установлено, что повышение содержания железа в заполнителе негативно сказывается на прочности мелкозернистого бетона. Для изготовления бетона классом по прочности В40...В50 в качестве как заполнителя, так и компонента вяжущего рекомендуются хвосты обогащения с содержанием железа рудных минералов в пределах 5 – 15 %.

Ключевые слова: железные руды, отходы обогащения, заполнитель, мелкозернистый бетон, прочность при сжатии

**STUDIES OF THE EFFECT OF FERRUGINOUS MINERALS IN AGGREGATE ON THE
STRENGTH OF FINE-GRAINED CONCRETE**

A.I. Makeev

*Voronezh State Technical University, ul. 20-letiia Oktiabria, 84, Voronezh, 394006,
Russian Federation*

Correspondence address: Alexey I. Makeev, e-mail: amakeev@cchgeu.ru

The article deals with the problem of construction and technological disposal of waste (tailings) from the enrichment of ferruginous quartzites by JSC Olkon (Murmansk region) in the production of fine-grained concrete construction products. The purpose of the research is to study the dependence of the properties of fine-grained concrete on the residual content of ore minerals in the waste. The characteristics of the raw materials used and the methodology for the preparation and testing of concrete mixtures and concrete samples are given. The results of experimental studies of the properties of raw materials and the kinetics of strength gain of concretes based on aggregate containing undetected iron ore minerals (counting on metallic iron) are presented. = 3, 5, 9, 15, 20 and 25%. It has been established that an increase in the iron content in the filling negatively affects the strength of fine-grained concrete. For the manufacture of concrete of strength class B40...B50, enrichment tailings with an iron content of ore minerals in the range of 5-15% are recommended as both a filler and a binder component.

Keywords: iron ores, processing waste, aggregate, fine-grained concrete, compressive strength

Введение

Существенной экологической проблемой Мурманской области являются техногенные отходы АО «Олкон» (бывший Оленегорский ГОК), которые оказывают негативное влияние на природный ландшафт, атмосферу и водный режим региона. Предприятие является крупным горно-обогатительным комбинатом, обеспечивающим получение железорудного концентрата из железистых кварцитов месторождений Заимандровского района, содержащих в среднем 32 % железа и 46 – 48 % кремнезема. Продуктами механической переработки

руды путем дробления, помола, мокрой магнитной сепарации и гравитационного обогащения служат концентрат с содержанием железа в пределах 60 – 65 % и «хвосты» – отходы, состоящие в основном из кварца. Ежегодно АО «Олкон» направляло в хвостохранилище более 4,7 млн м³ (6 млн т) хвостов [2], в результате чего за более чем 70-летний срок работы предприятия в хвостохранилище накоплено свыше 500 млн т отходов, занимающих площадь в 1100 га [3].

Научные разработки по утилизации хвостов обогащения железистых кварцитов в технологии строительных изделий ведутся с 70-х годов прошлого века [2], значительное внимание уделяется их использованию в составе цементных мелкозернистых бетонов [4 – 7]. При этом важным фактором является то, что хвосты, в зависимости от зоны хвостохранилища, помимо кварца, содержат от 15 до 35 % (считая на Fe₂O₃) недоизвлеченного магнетита и гематита, которые находятся главным образом в сростках с кварцем и поэтому трудно извлекаются при обогащении [1].

Вопрос о влиянии остаточного содержания рудных минералов на эффективность утилизации хвостов обогащения железистых кварцитов остается недостаточно раскрытым, в связи с чем целью данных исследований было изучение зависимости свойств мелкозернистого бетона от содержания железистых минералов в заполнителе.

Материалы и методы исследования

В результате ранее проведенных исследований [7] было установлено, что использование молотых хвостов обогащения в качестве микронаполнителя повышает эффективность использования цемента в формировании прочности бетона на 57 – 58 %, поэтому в качестве вяжущего в экспериментах применяли композиционное вяжущее, полученное при тонком совместном измельчении цемента и хвостов обогащения в соотношении 75 : 25 до удельной поверхности 5000 – 5200 см²/г.

Для изготовления композиционного вяжущего использовали портландцемент СЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Савинский цементный завод» с истин-

ной плотностью 3,1 г/см³, насыпной плотностью 1220 кг/м³, удельной поверхностью 4000 см²/г, и хвосты обогащения (ХО) железистых кварцитов АО «Олкон» с остаточным содержанием металлического железа Fe ≈ 9 %. Химический состав компонентов вяжущего представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав компонентов вяжущего

Компонент	Массовое содержание оксидов, %					П.п.п.
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + FeO	CaO	MgO	
Цемент	19,75	5,62	4,78	62,9	4,42	нет
ХО Fe ≈ 9 %	74,76	4,96	13,42	2,53	4,10	0,22

По данным [8], ХО с содержанием Fe = 9 % слагают следующие минералы, %: магнетит – 4,0; гематит – 10,5; кварц – 34,1; полевой шпат – 13,1, амфиболы, пироксены – 30,6; биотит, флогопит, мусковит – 3,3; прочие минералы – 4,4.

В качестве заполнителя мелкозернистой бетонной смеси использовали пробы отходов, отобранные в определенных зонах хвостохранилища и отличающиеся степенью обогащения исходной рудной породы. Было отобрано шесть проб с содержанием недоизвлеченных железорудных минералов (считая на металлическое железо) Fe = 3, 5, 9, 15, 20 и 25 %, составы бетонов на которых обозначены соответственно Fe-3, Fe-5, Fe-9, Fe-15, Fe-20 и Fe-25.

Контрольные образцы бетона (Fe-0) изготавливались с применением в качестве заполнителя песка Оленогорского карьера с насыпной плотностью 1620 кг/м³, пустотностью 40,3 % и содержанием глинистых, илистых и пылевидных примесей 1,2 %.

В качестве добавки-пластификатора, обеспечивающей повышение подвижности бетонной смеси и плотности бетона, а также предотвращение налипания бетонной смеси на стенки пресс-форм, использовался нафталинсульфонатный суперпластификатор «Полипласт СП-1 (Са)» производства ГК «Полипласт» по ТУ 5870-005-58042865-05. Добавка представляет собой водный раствор темно-коричневого цвета плотностью 1,15 г/см³ при 20 °C и pH = 6,5 – 9.

Гранулометрический состав заполнителя и его плотность ρ_3 , г/см³, оценивались по методике ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний».

Расход композиционного вяжущего и В/Ц-отношение принимались на основе ранее проведенных исследований [6] по условию достижения наибольшего уплотнения сухих и увлажнённых цементно-песчаных смесей. Расход заполнителя рассчитывался методом абсолютных объемов в зависимости от плотности его зерен. В соответствии с рекомендациями производителя, расход суперпластификатора был принят в количестве 0,1 % от массы «чистого» цемента. Составы бетонной смеси для серий с различным содержанием железа в заполнителе представлены в таблице 2.

Таблица 2

Состав бетонной смеси для серий
с разным содержанием железа в заполнителе

Серия	Расход материалов на 1 м ³ бетона, кг			В/Ц	
	Вяжущее		Зап		
	Цемент	Микрозап.			
Fe-0	500	167	1523	208	0,42
Fe-3	500	167	1600	208	0,42
Fe-5	500	167	1707	208	0,42
Fe-9	500	167	1754	208	0,42
Fe-15	500	167	1806	208	0,42
Fe-20	500	167	1858	208	0,42
Fe-25	500	167	1920	208	0,42

Смеси заданного состава перемешивались в лабораторном смесителе ЛС-ЦБ-10 по режиму: сухие компоненты в течение 1 мин, затем еще 3 мин с водой и растворенной в ней добавкой.

Для исследования структуры и свойств бетона изготавливались образцы-кубы 7 × 7 × 7 см. Формование образцов производилось на виброплощадке с частотой колебаний 3000 мин⁻¹ и амплитудой 0,5 мм в форме с подпрессоренным пригрузом для получения удельного давления на смесь 0,1 кгс/см². Продолжительность уплотнения составляла 1 мин.

Коэффициент уплотнения свежеотформованных смесей $K_{упл}$ определялся по отношению фактической плотности цементно-песчаных смесей к их теоретической плотности, рассчитанной методом абсолютных объемов.

Через сутки после изготовления формы распалубливались, и образцы отправлялись на хранение в нормальных условиях при температуре 15 – 20 °С и относительной влажности воздуха около 90 %. По истечении заданного срока твердения образцы подвергалась испытаниям на сжатие с помощью гидравлического пресса ПСУ-10.

Истинная ρ , кг/м³, и средняя ρ_m , кг/м³, плотность бетона и его пористость P , %, определялись стандартными методами по ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности».

Кинетику набора прочности бетона при сжатии $R_{cж}$, МПа, оценивали по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» по результатам испытаний образцов в возрасте 1, 3, 7 и 28 суток твердения в нормальных условиях.

Результаты исследования и их обсуждение

Гранулометрический анализ проб хвостов обогащения железистых кварцитов показывает (табл. 3, рис. 1), что основное количество материала (около 80 %) представлено частицами, крупность которых изменяется от 0,63 до 0,1 мм, выход мелких фракций частиц размером менее 0,071 мм не превышает 6 %. При этом наиболее «мелким» материалом оказывается продукт наиболее полного обогащения исходного рудного сырья, что вполне закономерно, так как подразумевает более интенсивные воздействия на сырье. Для остальных хвостов закономерной связи их крупности с содержанием остаточных железистых минералов не прослеживается. Форма зерен неправильная, в крупных фракциях они имеют вид осколков, в мелких более изометричны. Поверхность зерен в результате дробления и присущего кварцу неровного излома «занозистая».

Таблица 3

Характеристика заполнителя

Содерж. Fe, %	Частные остатки, %, на ситах с отверстиями, мм							M_k	ρ_3 , г/см ³
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16		
0*	13,00	14,40	9,60	20,60	24,30	13,10	4,63	2,34	2,65
3	0,50	1,25	1,95	7,90	21,05	37,97	29,38	1,20	2,75
5	0,00	0,40	1,00	13,10	45,50	33,00	7,00	1,69	2,78
9	0,20	0,70	1,00	4,20	41,20	42,80	9,90	1,46	3,00
15	0,00	0,00	1,00	1,80	33,80	49,10	15,30	1,22	3,05
25	0,30	1,80	2,00	6,00	30,70	46,60	12,60	1,45	3,23

Примечание: * – песок кварцевый Оленегорского карьера

Согласно ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия», хвосты обогащения относятся к группе очень мелких песков. Взятый для контрольных образцов кварцевый песок значительно крупнее и относится к группе крупных песков.

Плотность хвостов обогащения выше плотности кварцевого песка и закономерно увеличивается с повышением содержания остаточных железистых минералов от 2,75 до 3,23 г/см³ (табл. 3). Несмотря на это, мелкозернистый бетон, приготовленный на Fe-3, обладает пониженной на 3 % по сравнению с контрольными образцами плотностью (рис. 2). Можно предполагать, что это является следствием недоуплотнения бетонной смеси из-за повышенной дисперсности заполнителя типа Fe-3 (табл. 3).

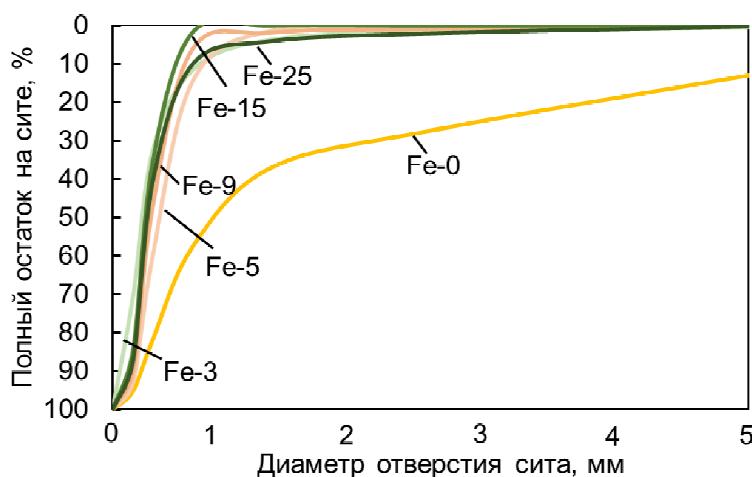


Рис. 1. Кривые рассева заполнителя (обозначения соответствуют остаточному содержанию железа, см. табл. 3)

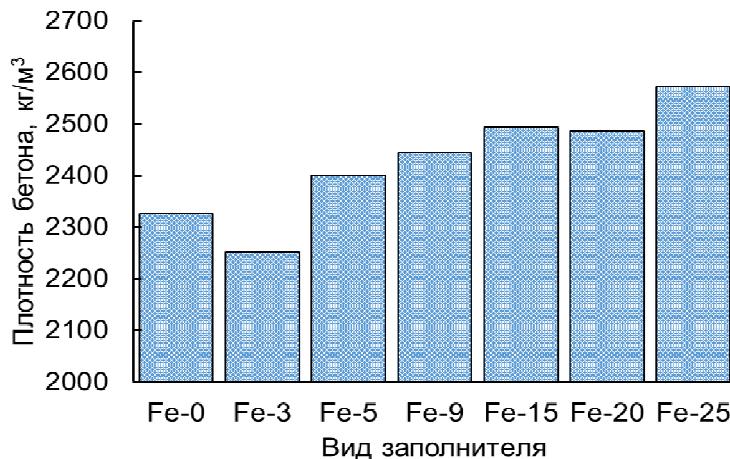


Рис. 2. Плотность бетона на заполнителе с различным содержанием железистых минералов

Дело в том, что принятая при виброуплотнении частота колебаний 3000 мин^{-1} существенно ниже резонансной частоты тонкодисперсных частиц и не способна разрушать достаточно прочные коагуляционные связи между ними [9, 10]. Бетон данной серии отличался повышенной пористостью $P = 24,9 \%$, при этом средний диаметр пор составлял $0,651 \text{ мкм}$. Плотность бетона остальных серий превысила плотность контрольного состава на $3\dots10 \%$, увеличиваясь от 2400 до $2570 \text{ кг}/\text{м}^3$ с повышением содержания железа в заполнителе (см. рис. 2).

Результаты оценки кинетики процессов структурообразования бетона показали, что быстрее всего твердеет и достигает максимальной прочности бетон контрольного состава на кварцевом песке, а применение хвостов обогащения железистых кварцитов приводит к замедлению набора прочности на 1-е сутки в среднем на 50% , на 3-и – на 38% и на 7-е – на 18% (рис. 3). При этом не наблюдается закономерного влияния содержания рудных минералов на скорость твердения: на разных сроках хранения более прочные составы оказываются менее прочными.

Несмотря на значительное замедление набора прочности бетона на хвостах обогащения в ранние сроки твердения, к 28 суткам их прочность в среднем «отстает» от прочности контрольного бетона лишь на 11% (рис. 4).

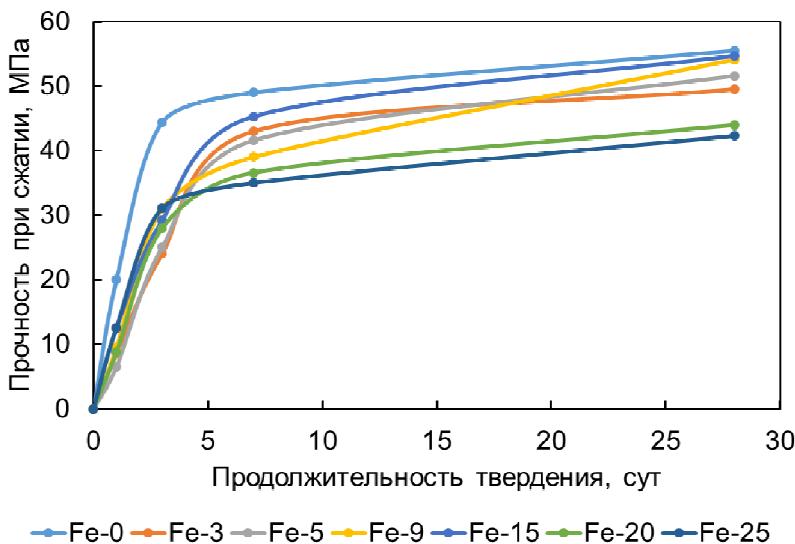


Рис. 3. Кинетика набора прочности бетона на заполнителе с различным содержанием железистых минералов

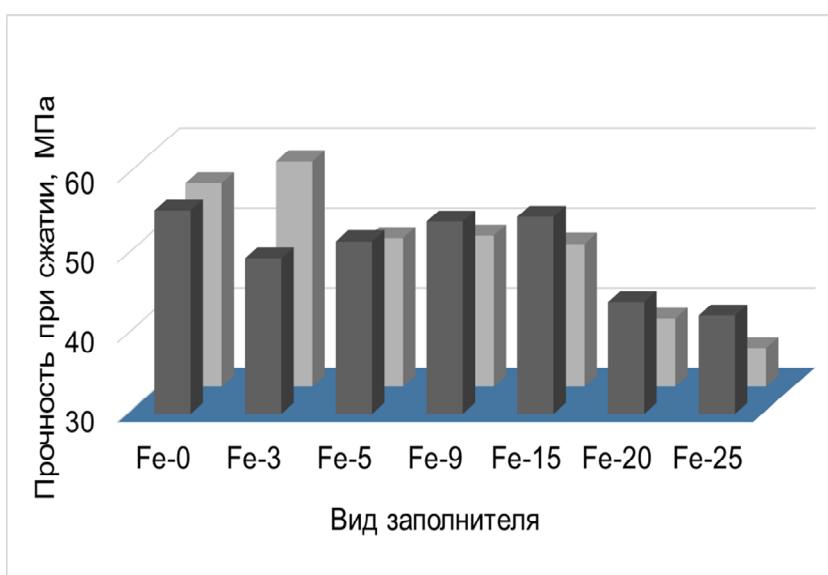


Рис. 4. Прочность бетона на заполнителе с различным содержанием железистых минералов в возрасте 28 суток
(передний ряд – абсолютная, задний – относительная)

Наиболее близкими к прочности контрольного бетона на кварцевом песке ($R_{c,ж} = 55$ МПа) оказались образцы на заполнителе с содержанием 9 и 15 % железа рудных минералов – они достигают 98 – 99 % прочности контрольного состава (разница в пределах ошибки опыта). При увеличении содержания железа

в заполнителе до 20 и 25 % прочность образцов в 28-дневном возрасте снижается до $R_{сж} = 42 - 44$ МПа, что на 20 – 25 % ниже контрольного состава. Прочность образцов на заполнителе с 3 и 5 % железа на 7 – 10 % ниже бетона на кварцевом песке.

Установлено, что прочность бетона на сжатие в 28-дневном возрасте не коррелирует с его плотностью (рис. 2 и 4). В целях исключения влияния факто-ра плотности бетона на полученные закономерности вычислялись значения относительной прочности бетона $R_{сж}^{отн}$, МПа, приведенной к плотности бетона контрольного состава [11]:

$$R_{сж}^{отн} = R_{сж} \frac{\rho_{кc}^2}{\rho^2}, \quad (1)$$

где $R_{сж}$ – прочность при сжатии, МПа, бетона плотностью ρ (в г/см³); $\rho_{кc}$ – плотность бетона контрольного состава (2,3 г/см³).

Здесь наблюдается несколько иная ситуация – максимальную относи-тельную прочность показывает бетон с минимальным содержанием железа в заполнителе 3 %, причем эта прочность выше прочности контрольного бетона. У бетона с заполнителем Fe-5, Fe-9, Fe-15 относительная прочность практиче-ски одинакова и на 10 – 15 % ниже контрольного бетона. Введение заполнителя с содержанием железа 20 и 25 % приводит к падению приведенной прочности по сравнению с контрольным бетоном на 30 и 37 % соответственно.

Заключение

Исходя из результатов физико-механических испытаний бетонов, изго-товленных на хвостах обогащения с различным содержанием рудных минера-лов, можно сделать вывод, что повышение содержания недоизвлеченных руд-ных минералов в хвостах обогащения негативно сказывается на прочности мел-козернистого бетона, приготовленного на их основе.

При изготовлении мелкозернистых бетонов на основе хвостов обогащения железистых кварцитов АО «Олкон» в качестве как заполнителя, так и компонента вяжущего следует применить хвосты с содержанием железа рудных минералов в пределах 5 – 15 %. Это обеспечивает получение бетона классом по прочности В40...В50 при расходе композиционного вяжущего состава 3 : 1 в количестве 667 кг/м³.

Использование хвостов с содержанием железа менее 5 % приводит к снижению прочности бетона из-за недоуплотнения бетонной смеси вследствие повышенной дисперсности заполнителя. Еще к более резкому снижению прочности бетона приводит введение заполнителя с содержанием железа выше 15 %. Считаем, что при утилизации отходов с повышенным содержанием железа более рациональным будет их предварительное дообогащение с получением дополнительного железорудного концентрата [12].

Список литературы

1. Хохуля М.С., Гершенкоп А.Ш. Переработка отходов обогащения ОАО «Олкон» // Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов. Архангельск: Институт экологических проблем Севера Архангельского НЦ УрО РАН, 2010. С. 97-100.
2. Крашенинников О.Н., Гришин Н.Н., Калинкин А.М., Буряченко С.Ю. Перспективы развития минеральной базы Кольского региона и производства местных строительных материалов // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2014. № 5. С. 39 – 43.
3. Хохуля М.С., Фомин А.В., Алексеева С.А. Сравнительная оценка эффективности применения различных схем обогащения при переработке техногенного железосодержащего сырья АО "Олкон" переменного качества // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды V Конгресса с междунар. участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021». Екатеринбург: Инсти-

тут металлургии УрО РАН, ООО Универсальная типография «Альфа Принт», 2021. С. 173-176.

4. Брянцева Н.Ф., Крашенинников О.Н., Сухорукова Р.Н. Отходы обогащения // Строительные и технические материалы из минерального сырья Кольского п-ова. Ч. 1. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2003. С. 170-182.
5. Ермолович Е. А. Утилизация отходов обогащения железистых кварцитов в мелкозернистой бетонной смеси для тротуарной плитки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 8. С. 23-25.
6. Long J. [et al.] New insights into the contribution of quartz powder byproduct from manufactured sand to the performance of cementitious materials // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. Vol. 148. No. 10. P. 4105-4117.
7. Макеев А.И. Отходы обогащения железистых кварцитов как структурный компонент мелкозернистого бетона // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2024. № 3. С. 63-73
8. Лобанов К.В. [и др.] Редкие и редкоземельные элементы руд Печенгского района // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 3. С. 406—421.
9. Усачев С.М., Перцев В.Т. Совершенствование технологии вибропрессованных бетонов. Воронеж: Воронежский гос. архитектурно-строительный ун-т., 2007. 142 с.
10. Макеев А.И., Чернышов Е.М. Пылевидная фракция отсевов дробления гранита как носитель микронаночастиц, участвующих в структурообразовании цементных бетонов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2018. Т. 10. № 4. С. 20-38.
11. Макеев А. И. Отсевы дробления гранита как компонентный фактор формирования структуры бетона. Часть II. Экспериментальные исследования структурообразующего потенциала // Строительные материалы. 2024. № 1-2. С. 59-66.
12. Громов Е. В., Опалев А. С., Иванова В. А., Хохуля М. С. Оценка эффективности переработки техногенного сырья рудных месторождений Коль-

ского горнoprомышленного комплекса // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2018. № 3(59). С. 77-90.

References

1. Khokhulya M.S., Gershenkop A.Sh. [Processing of enrichment waste of JSC "Olkon"]. *Problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya prirodnogo i tekhnogennogo syr'ya Barentseva regiona v tekhnologii stroitel'nykh i tekhnicheskikh materialov* [Problems of rational use of natural and man-made raw materials of the Barents region in the technology of building and technical materials]. Arkhangel'sk: Institut ekologicheskikh problem Severa Arkhangel'skogo NTS UrO RAN, 2010. pp. 97-100. (in Russian)
2. Krasheninnikov O.N., Grishin N.N., Kalinkin A.M., Buryachenko S.Yu. [Prospects for the development of the mineral base of the Kola region and the production of local building materials]. *Sever i rynok: formirovaniye ekonomicheskogo poryadka* [North and market: formation of economic order]. 2014. No. 5. P. 39a-43. (in Russian)
3. Khokhulya M.S., Fomin A.V., Alekseeva S.A. [Comparative assessment of the efficiency of using various enrichment schemes in the processing of technogenic iron-containing raw materials of JSC Olkon of variable quality]. *Fundamental'nyye issledovaniya i prikladnyye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogen-nykh obrazovaniy : trudy V Kongressa c mezhdunar. uchastiyem i Konferentsii molodykh uchenykh «TEKHNOGEN-2021»* [Fundamental research and applied development of the processes of processing and utilization of technogenic formations: proceedings of the V Congress with international participation and the Conference of young scientists "TECHNOGEN-2021"]. Ekaterinburg: Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Universal Printing House "Alpha Print" LLC, 2021. pp. 173-176. (in Russian)
4. Bryantseva N.F., Krasheninnikov O.N., Sukhorukova R.N. [Waste from enrichment]. *Stroitel'nyye i tekhnicheskiye materialy iz mineral'nogo syr'ya Kol'skogo*

p-ova. Ch. I [Construction and technical materials from mineral raw materials of the Kola Peninsula. Part 1]. Apatity: Izd-vo KNTS RAN, 2003. S. 170-182. (in Russian)

5. Yermolovich Ye. A. [Utilization of waste from the enrichment of ferruginous quartzites in fine-grained concrete mix for paving slabs]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2013. № 8. pp. 23-25. (in Russian)

6. Long J. [et al.] *New insights into the contribution of quartz powder byproduct from manufactured sand to the performance of cementitious materials*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. Vol. 148. No. 10. P. 4105-4117.

7. Makeyev A.I. [Waste from the enrichment of ferruginous quartzites as a structural component of fine-grained concrete]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologiy i upravleniya* [Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management]. 2024. № 3. pp. 63-73. (in Russian)

8. Lobanov K.V. [et al.] [Rare and rare earth elements of ores of the Pechenga region]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: ecology and economics]. 2021. T. 11. № 3. pp. 406—421. (in Russian)

9. Usachev S.M., Pertsev V.T. *Sovershenstvovaniye tekhnologii vibropressovannykh betonov* [Improvement of vibration-pressed concrete technology]. Voronezh, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, 2007. 142 p. (in Russian)

10. Makeyev A.I., Chernyshov Ye.M. [Dust fraction of granite crushing screenings as a carrier of micro-nanoparticles participating in the structure formation of cement concretes]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal* [Nanotechnology in construction: scientific online journal]. 2018. Vol. 10. No. 4. pp. 20-38. (in Russian)

11. Makeyev A. I. [Granite crushing screenings as a component factor in the formation of concrete structure. Part II. Experimental studies of structure-forming potential]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction materials]. 2024. № 1-2. pp. 59-66. (in Russian)

12. Gromov E. V., Opalev A. S., Ivanova V. A., Khokhulya M. S. [Evaluation of the efficiency of processing technogenic raw materials from ore deposits of the Kola mining complex]. *Sever i rynok: formirovanie ekonomiceskogo poryadka* [The North and the market: the formation of an economic order]. 2018. No. 3(59). pp. 77-90. (in Russian)

Макеев Алексей Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАТ-БОТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГИДРОФОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ БЕТОНА

В.С. Коновалова*, Н.А. Ваганов, Е.М. Спиридовонов, Д.Б. Дурсунов

*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*

Проведено исследование возможности использования нейросетевых чат-ботов для оценки гидрофобности бетона по снимкам капли на поверхности. Не для всех чат-ботов в диалоги можно загрузить файл, это ограничивает сферы применения этих программ. Запрос на определение гидрофобной поверхности по фотографии капли на поверхности бетона задавался чат-ботам Алиса, ChatGPT и Mistral. Ответы чат-ботов оценивались по корректности содержащейся в них информации и правильности выбора гидрофобных и не гидрофобных поверхностей. Чат-боты распознают изображение капли на поверхности материала, могут оценить ее размер и форму. Нейросети считывают обозначения, текст и символы на снимках и могут их проанализировать и выдать интерпретацию данных. По фотографиям с отмеченными на капле значениями угла смачивания чат-боты правильно определили, где гидрофобная поверхность, а где нет. По фотографиям без отмеченных углов смачивания нейросети не дают корректного ответа, совершают ошибки при установлении типа поверхности, но подробно описывают и анализируют изображенное на снимке. Чат-боты не показали себя надежным инструментом для характеристики поверхности материала по снимкам. Их использование требует предварительной обработки фотографий, внесение дополнительных данных.

Ключевые слова: использование нейросетей, машинное зрение, оценка гидрофобности, нейросетевой анализ данных, анализ изображений.

THE USE OF CHATBOTS TO ASSESS THE HYDROPHOBICITY OF THE CONCRETE SURFACE

V.S. Konovalova, N.A. Vaganov, E.M. Spiridonov, D.B. Dursunov*

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*

A study has been conducted on the possibility of using neural network chatbots to assess the hydrophobicity of concrete based on images of droplets on the surface. Not all chatbots can upload a file to the dialogs, which limits the scope of these programs. A request to identify a hydrophobic surface with a photo of a drop on the concrete surface was sent to the chatbots Alice, ChatGPT and Mistral. The chatbot responses were evaluated based on the accuracy of the information they contained and the correctness of their selection of hydrophobic and non-hydrophobic surfaces. Chatbots recognize the image of a drop on the surface of a material and can estimate its size and shape. Neural networks read the different symbols and text in the images and can analyze them and interpret the data. From the photos with the contact angle values marked on the drop, the chatbots correctly identified where the hydrophobic surface is and where it is not. In photographs without marked contact angles, neural networks do not give a correct answer, they make mistakes when determining the type of surface, but they describe and analyze in detail what is depicted in the picture. Chatbots have not proven to be a reliable tool for characterizing the surface of a material from images. Their use requires pre-processing of photos and adding additional data.

Key words: neural network usage, machine vision, hydrophobicity assessment, neural network data analysis, image analysis.

Введение

Угол смачивания измеряет способность твердой поверхности взаимодействовать с жидкостью. Обычно для этого используется метод неподвижной капли и измеряется угол на границе раздела твердого тела, жидкости и пара.

В процессе определения гидрофобности поверхностей нужно учитывать ограничения, связанные с тем, что результаты визуального определения гидрофобности легко искажаются субъективными факторами, например, неидеаль-

ными условиями и неправильно выбранным углом съемки и расстоянием до исследуемой поверхности, и не позволяют непрерывно определять и отмечать характеристики распределения гидрофобности поверхности.

С развитием технологий искусственного интеллекта алгоритмы распознавания изображений и глубокого обучения стали широко использоваться для решения задач классификации во всех сферах жизни [1 – 8].

Учитывая человеческий фактор и субъективные факторы, влияющие на существующий метод измерения гидрофобности композитных изоляторов, а также невозможность непрерывного определения и маркировки степени гидрофобности поверхности для отражения распределения гидрофобных характеристик, целесообразно использовать методы машинного зрения и нейросетевого анализа данных, позволяющие полностью и точно отразить фактическое состояние поверхности композитных материалов [9 – 11].

Процедура, которой следуют в таких случаях, состоит из следующих этапов: 1) необходимо сделать снимки капель на поверхностях материалов, 2) выполняется предварительная обработка изображений для извлечения некоторых характерных признаков с целью обучения нейронной сети, 3) нейронная сеть обучается на основе этих признаков и учится классифицировать новые, ранее не встречавшиеся изображения по правильному классу гидрофобности. Некоторые исследователи также пытались создать интегрированные устройства, которые могли бы выполнять всю эту работу в полевых условиях [12, 13].

Цифровая обработка изображений является перспективным и объективным инструментом для анализа поверхности. Был предложен метод определения распределения гидрофобности композитных изоляторов на основе сверточной нейронной сети [14, 15]. В ходе экспериментов с изображениями из проверочной выборки был сделан вывод, что точность модели оценки гидрофобности может достигать 90 %. Результаты показывают, что контур измеренного изображения соответствует фактическому состоянию образца, а нормализованная погрешность при расчете гидрофобности каждого образца составляет менее 0,03, что подтверждает высокую точность этого метода.

Снимки смоченной поверхности изоляторов проанализированы с помощью цифровой обработки изображений с использованием искусственной нейронной сети, основанной на методе обратного распространения ошибки, а для количественной оценки гидрофобных свойств различных полимерных поверхностей, подвергшихся старению, применялись дескрипторы Харалика [16].

Классификация гидрофобности поверхностей выполняется автоматически с помощью многослойной искусственной нейронной сети на основе перцептрона, которая использует цифровую обработку изображений и информацию о пространственной частоте, извлекаемую непосредственно из изображений без необходимости в сегментации. Была использована база данных изображений, содержащая 1200 образцов гидрофобных поверхностей на разных стадиях разрушения и при разном освещении [13]. Предложенный метод позволил успешно классифицировать большинство изображений гидрофобности поверхности, достигнув показателя успешности более 83 % для базы данных [13].

К преимуществам этого метода можно отнести: простоту и быстроту процесса фотографирования, короткое время обучения сетей, удовлетворительный уровень точности распознавания, возможность развертывания этих сетей на встроенных платформах и их использования в аэрофотосъемке для проверки поверхностей на месте [17].

Для проведения анализа данных, как правило, создают нейросеть и проводят ее обучение. Такой подход может быть нецелесообразным ввиду трудоемкости и необходимости обладать навыком программирования. Вследствие доступности нейросетевых чат-ботов было проведено исследование возможности их применения для оценки гидрофобности поверхности бетона по снимкам.

Экспериментальная часть

Для оценки гидрофобности поверхности бетона были сделаны снимки капель воды, нанесенных на поверхность образцов (рис. 1). Фотографии получены с помощью цифрового микроскопа CoolingTech Microscope, установлен-

ного ортогонально к поверхности образца. Для каждого изображения определен краевой угол смачивания с помощью программного обеспечения камеры.

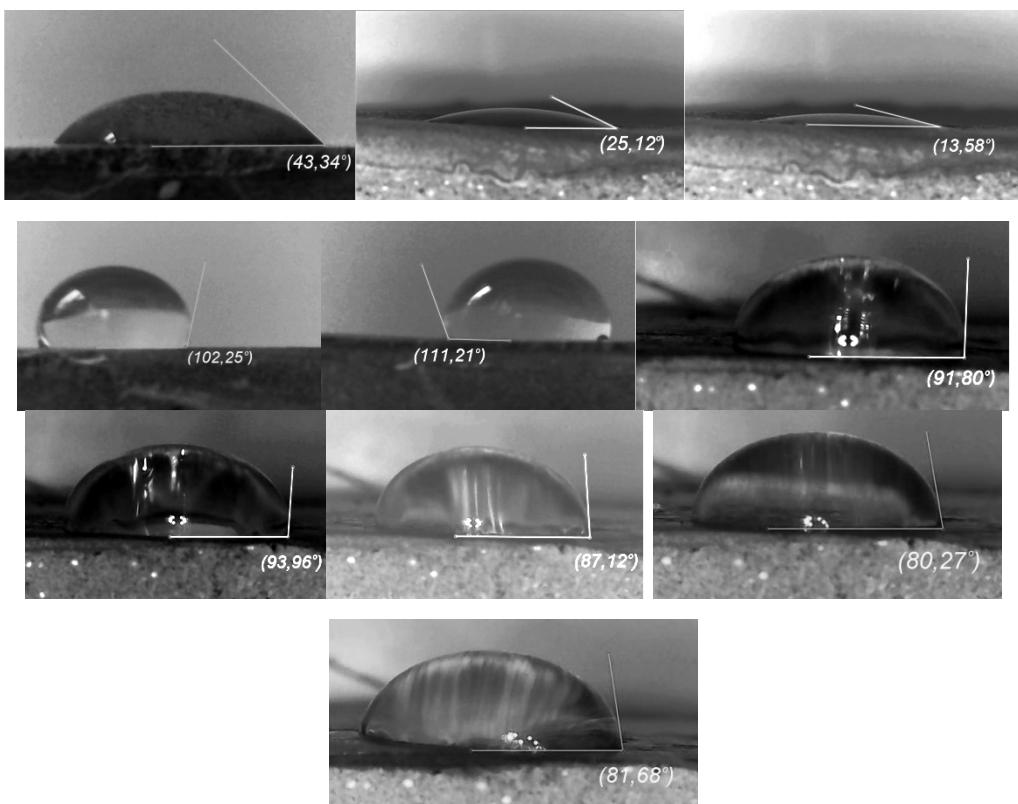


Рис. 1. Снимки капли воды на поверхности бетонных образцов

Гидрофобной считается поверхность со значениями краевого угла смачивания $> 90^\circ$. Поверхности с краевым углом смачивания $< 90^\circ$ являются гидрофильными.

Нейросетевым чат-ботам Алиса, ChatGPT, Mistral, GigaChat загружались поочередно снимки без обозначенных краевых углов смачивания с запросом «Это гидрофобная поверхность или нет?». Проводилась оценка понимания чат-ботом запроса и результат анализа изображения. Затем для сравнения загружались снимки со значениями углов с аналогичным запросом, и проводилась оценка ответа нейросетей по тем же показателям.

Результаты и их обсуждение

Алиса все снимки без обозначений угла смачивания капли отнесла к гидрофобным поверхностям (рис. 2 а), однако фотографии со значениями рассор-

тировала правильно (рис. 2 б). Чат-бот дал подробное описание изображения и методики отбора и обосновал выбор (рис. 3).

На рисунке 1 некоторые капли имеют значения угла смачивания в интервале $80 - 87^\circ$, что близко к пограничной величине 90° , поэтому поверхности можно принять за гидрофобные, однако очевидные гидрофильные поверхности чат-ботом пропущены (рис. 2 а).

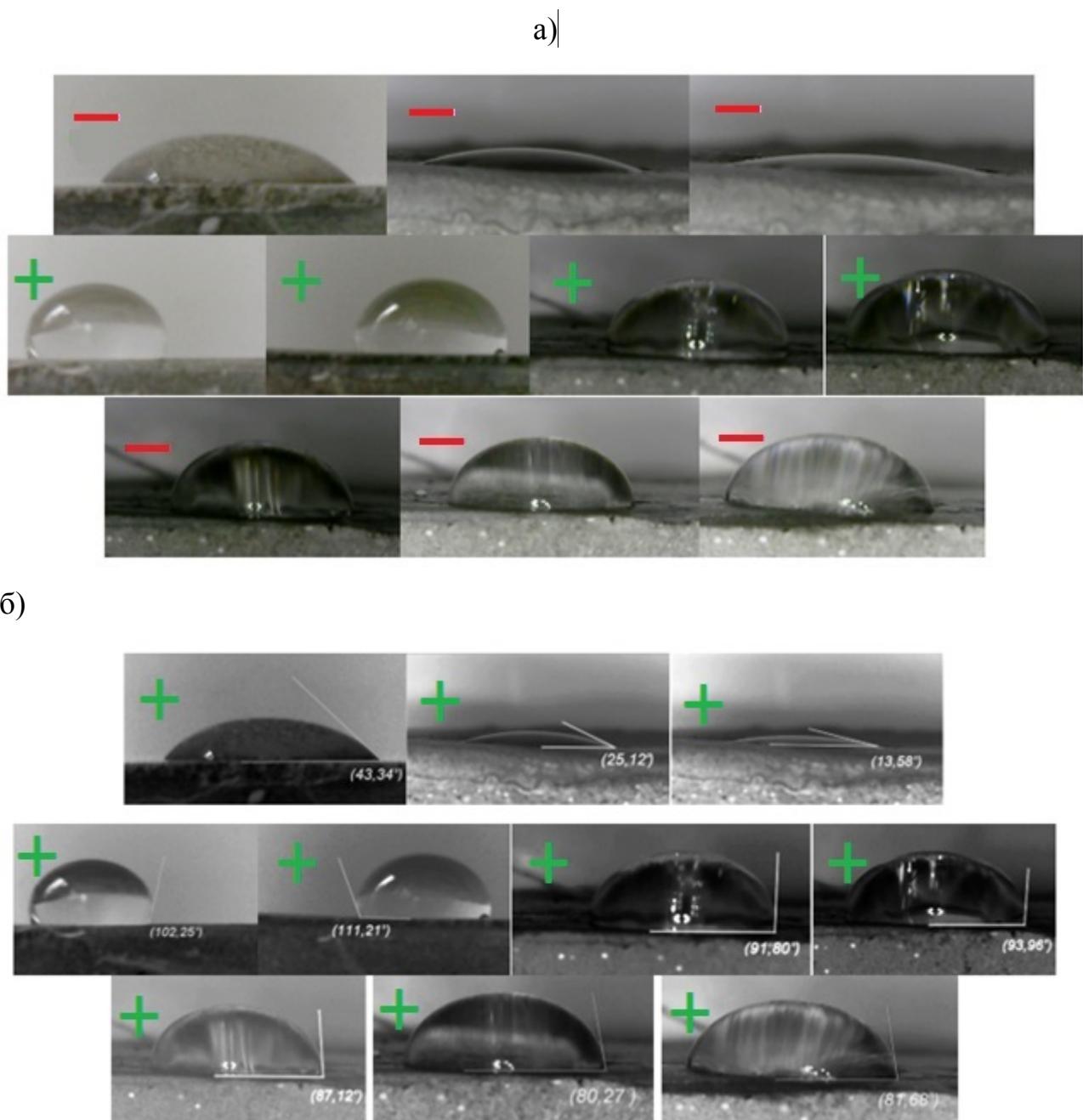


Рис. 2. Результат определения гидрофобных поверхностей по снимкам чат-ботом Алиса: а) без значений угла смачивания, б) с обозначениями величин краевых углов смачивания



Определи, это гидрофобная поверхность?

На основании изображения можно с высокой вероятностью утверждать, что поверхность **гидрофобная**. Вот почему:

- Форма капли:** Капля воды имеет выпуклую, почти сферическую форму, напоминающую «шарик». Это классический признак гидрофобности — вода «собирается» в капли, а не растекается по поверхности.
- Минимальный контакт с поверхностью:** Капля практически не соприкасается с материалом, что указывает на низкую смачиваемость.
- Краевой угол смачивания:** Угол между каплей и поверхностью визуально превышает 90° . По научным критериям, если краевой угол смачивания $> 90^\circ$, поверхность считается гидрофобной (несмачиваемой).



Это гидрофобная поверхность или нет?

На основании предоставленного изображения **нельзя с уверенностью утверждать, что поверхность гидрофобная**, так как на фото отсутствует капля воды для оценки её поведения (растекания или скатывания).



Это гидрофобная поверхность или нет?

□ ⚡ В Промптах

На изображении показан краевой угол смачивания (угол контакта) капли воды с поверхностью — **91,80°**.

Вывод: данная поверхность **является гидрофобной**.

Обоснование:

1. Критерии классификации по углу смачивания:

- если угол **меньше** 90° — поверхность **гидрофильная** (хорошо смачивается водой);
- если угол **больше** 90° — поверхность **гидрофобная** (несмачиваемая, отталкивает воду);
- угол около 180° соответствует максимальной гидрофобности (капля практически не касается поверхности).

2. Анализ угла $91,80^\circ$:

- угол **превышает** 90° , что однозначно указывает на **несмачиваемость** поверхности;
- капля воды **не растекается**, а сохраняет выпуклую, почти сферическую форму — это классический признак гидрофобных материалов;
- преобладает сила **когезии** (притяжение молекул воды друг к другу) над **адгезией** (притяжением к поверхности).

3. Визуальные признаки на фото:

- капля имеет чётко выраженную округлую форму;
- линия контакта капли с поверхностью минимальна — вода «отталкивается» от материала;
- наблюдается эффект, близкий к «эффекту лотоса» (когда капля «парит» над поверхностью за счёт микрорельефа или химического состава).

4. Примеры аналогичных гидрофобных материалов:

- водоотталкивающие покрытия для автомобилей и обуви;
- антиадгезионные покрытия для промышленного оборудования;
- специальные покрытия для электроники и оптики;
- природные примеры — листья лотоса, перья водоплавающих птиц.

Итог: поверхность на изображении **гидрофобная**, так как краевой угол смачивания ($91,80^\circ$) превышает критическое значение в 90° . Она отталкивает воду и не позволяет ей растекаться.



Это гидрофобная поверхность или нет?

На изображении показан краевой угол смачивания (угол контакта) капли воды с поверхностью — $81,68^\circ$.

Вывод: данная поверхность **не является гидрофобной**.

Обоснование:

1. Критерии классификации по углу смачивания:

- если угол **меньше** 90° — поверхность **гидрофильная** (хорошо смачивается водой);
- если угол **больше** 90° — поверхность **гидрофобная** (ненасмачиваемая, отталкивает воду);
- угол около 180° соответствует максимальной гидрофобности (капля практически не касается поверхности).

2. Анализ угла $81,68^\circ$:

- угол **меньше** 90° , что указывает на **смачиваемость** поверхности;
- капля воды **растекается** по материалу, а не сохраняет сферическую форму — это классический признак гидрофильных материалов;
- преобладает сила **адгезии** (притяжение молекул воды к поверхности) над **когезией** (притяжение молекул воды друг к другу).

3. Визуальные признаки на фото:

- капля имеет **приплюснутую форму**, а не идеально сферическую;
- линия контакта капли с поверхностью **широкая** — вода хорошо взаимодействует с материалом;
- отсутствует «эффект лотоса» (когда капля «парит» над поверхностью).

4. Примеры аналогичных гидрофильных материалов:

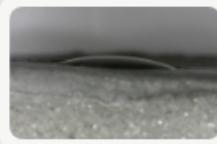
- стекло;
- керамика;
- большинство металлов без специальных покрытий;
- бумага.

Итог: поверхность на изображении **гидрофильная**, так как краевой угол смачивания ($81,68^\circ$) меньше критического значения в 90° . Она хорошо взаимодействует с водой и не обладает водоотталкивающими свойствами.

Рис. 3. Примеры ответов чат-бота Алиса при определении гидрофобных поверхностей по фотографиям

Чат-бот Mistral в своих ответах описал изображения, привел обоснования выбора гидрофобных поверхностей (рис. 4). Снимки капель со значениями угла

80 – 87 ° были ошибочно отнесены к гидрофобным (рис. 5 а). С фотографий с обозначенными углами нейросеть правильно считала данные и верно определила вид поверхности (рис. 5 б).



Это гидрофобная поверхность или нет?



На этом изображении капля жидкости выглядит более плоской и растекающейся по поверхности, не сохраняя чёткую округлую форму. Это указывает на то, что поверхность, скорее всего, не является гидрофобной. На гидрофобной поверхности капля сохраняла бы более выпуклую форму и не растекалась бы.

Таким образом, на этом изображении поверхность, вероятно, гидрофильная.

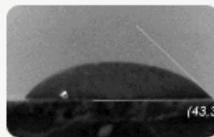


Это гидрофобная поверхность или нет?



На фотографии видна капля жидкости, скорее всего воды, на поверхности. Форма капли слегка приплюснута, но в целом сохраняет окружность, и видно, что она не растекается по поверхности, а остаётся в виде отдельной капли. Это характерно для гидрофобных поверхностей, где угол контакта капли с поверхностью достаточно большой, и жидкость не смачивает поверхность, а стремится сохранить форму капли.

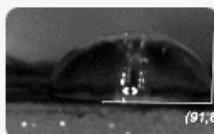
Таким образом, на изображении, скорее всего, показана гидрофобная поверхность.



Это гидрофобная поверхность или нет?

- На изображении видно, как капля воды оставляет за собой след на поверхности, образуя угол контакта около $43,34^\circ$. Гидрофобные поверхности обычно характеризуются углами контакта воды значительно выше 90° . Поверхности с углами контакта менее 90° считаются гидрофильными.

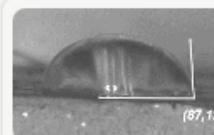
Таким образом, на этом изображении поверхность **не является гидрофобной**. Она, скорее, гидрофильная.



Это гидрофобная поверхность или нет?

- На этом изображении угол контакта капли воды с поверхностью составляет $91,80^\circ$.

Поверхности с углом контакта **более 90°** считаются гидрофобными. Таким образом, данная поверхность **является гидрофобной**.



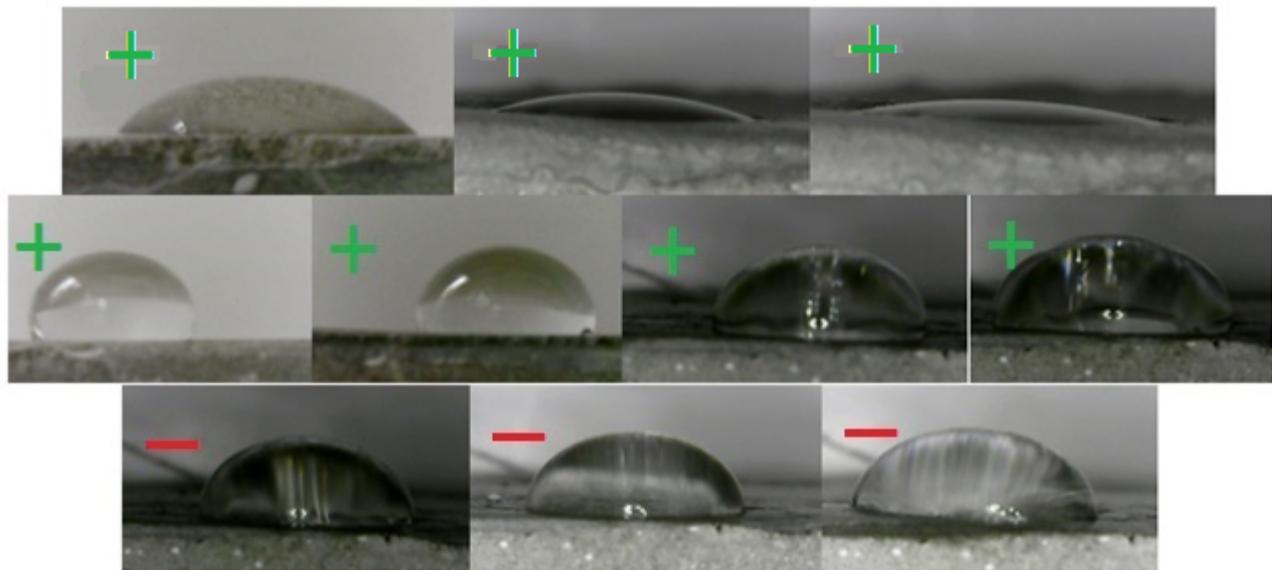
Это гидрофобная поверхность или нет?

- На этом изображении угол контакта капли воды с поверхностью составляет $87,12^\circ$.

Поверхности с углом контакта **менее 90°** считаются гидрофильными. Таким образом, данная поверхность **не является гидрофобной**. Она гидрофильная.

Рис. 4. Примеры ответов чат-бота Mistral при определении гидрофобных поверхностей по фотографиям

a)



б)

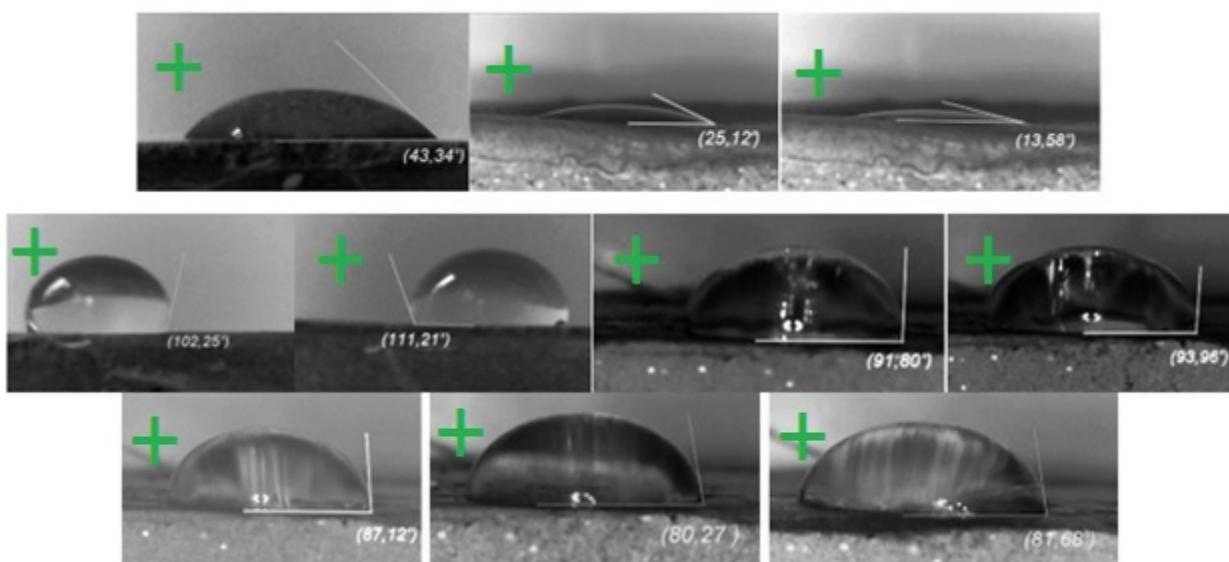


Рис. 5. Результат определения гидрофобных поверхностей по снимкам чат-ботом Mistral: а) без значений угла смачивания, б) с обозначениями величин краевых углов смачивания

ChatGPT описал изображения, привел характеристику формы капли на поверхности бетона и обосновал выбор типа поверхности (рис. 6). Однако совершено много ошибок при анализе снимков без отмеченных углов смачивания (рис. 7 а). Классификацию фотографий с обозначенными величинами углов чат-бот выполнил верно (рис. 7 б).

Это гидрофобная поверхность или нет?



Regenerate Delete

На основании этого изображения трудно точно определить гидрофобность поверхности. Обычно гидрофобные поверхности характеризуются тем, что вода образует крупные капли и скатывается с поверхности, создавая контактный угол больше 90°.

На этой фотографии видно каплю воды, которая достаточно хорошо держится на поверхности и имеет довольно круглый форму, что может указывать на гидрофобные свойства, но без дополнительных данных или измерений угла контакта трудно дать точный ответ.

Copy Summarize Delete

Это гидрофобная поверхность или нет?



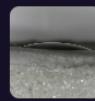
Regenerate Delete

На этом изображении видно каплю жидкости, которая практически плоская и расширяется у края, что указывает на низкий контактный угол. Обычно гидрофобная поверхность характеризуется тем, что капля образует угол больше 90°, что свидетельствует о том, что жидкость отталкивается от поверхности.

Поскольку капля кажется достаточно плоской и угол контакта кажется меньше 90°, скорее всего, эта поверхность не гидрофобная, а гидрофильная, то есть притягивает воду.

Copy Summarize Delete

Это гидрофобная поверхность или нет?



Regenerate Delete

На этом изображении видно каплю жидкости, которая очень плотно прилипает к поверхности и практически не образует угол, характерный для капли на гидрофобной поверхности. Такая капля скорее напоминает каплю на гидрофильной поверхности, где жидкость хорошо сцепляется с материалом.

Следовательно, эта поверхность, вероятно, не гидрофобная, а гидрофильная.

Copy Summarize Delete

Это гидрофобная поверхность или нет?



Regenerate Delete

На этом изображении показана капля воды с контактным углом 80,27°. Так как этот угол меньше 90°, это свидетельствует о гидрофильной или слабо гидрофобной поверхности.

Следовательно, эта поверхность скорее не гидрофобная.

Copy Summarize Delete

Рис. 6. Примеры ответов чат-бота ChatGPT при определении гидрофобных поверхностей по фотографиям

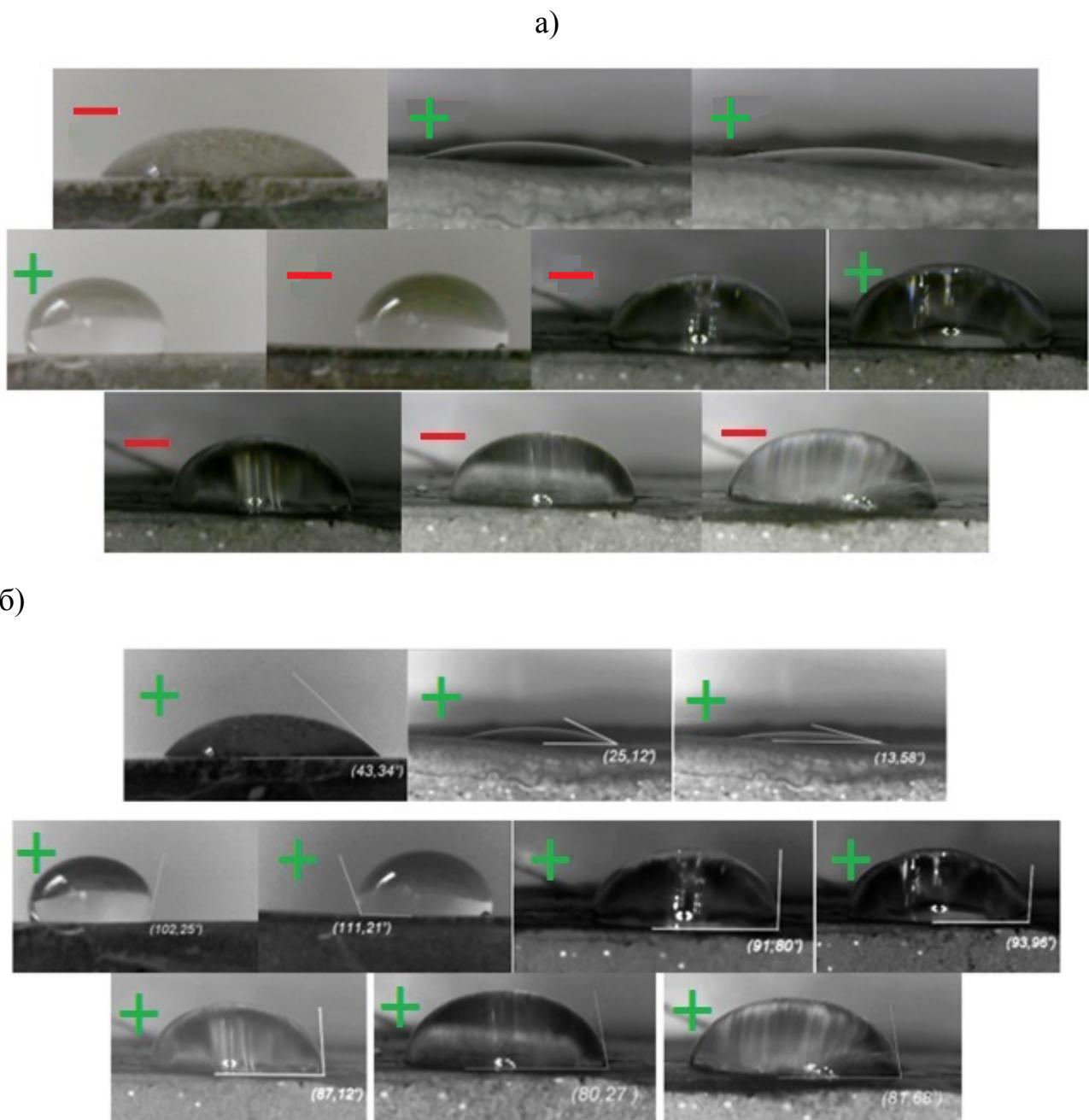


Рис. 7. Результат определения гидрофобных поверхностей по снимкам чат-ботом Mistral: а) без значений угла смачивания, б) с обозначениями величин краевых углов смачивания

Заключение

Чат-боты анализируют изображения, составляя их описание и давая характеристику изображенными объектам. Нейросети хорошо извлекают данные со снимков, могут их интерпретировать, обобщить, выявить закономерности.

При анализе фотографий поверхности бетона с нанесенной на нее каплей воды для определения гидрофобности материала не всегда чат-боты способны распознать и правильно оценить форму капли. Для правильного определения гидрофобных поверхностей рекомендуется загружать четкие снимки высокого качества и дополнять их данными.

Список литературы

1. Щукина Н.А. Нейросетевые модели в задаче классификации медицинских изображений // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 4. 14 с. Доступно по: <https://moitvivt.ru/journal/pdf?id=1028>
2. Пшенокова И.А., Киясов М.Р. Модели и методы глубокого обучения в задачах распознавания и классификации медицинских изображений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27, № 2. С. 103-112.
3. Искусственный интеллект в оценке качества готовой швейной продукции / В.С. Белгородский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2 (398). С. 168-177.
4. Fujiyoshi H., Hirakawa T., Yamashita T. Deep learning-based image recognition for autonomous driving // IATSS Research. 2019. Vol. 43, Issue 4. pp. 244 – 252.
5. Ni X., Huttunen H. Vehicle Attribute Recognition by Appearance: Computer Vision Methods for Vehicle Type, Make and Model Classification // Journal of Signal Processing Systems. 2021. Vol. 93. pp. 357-368.
6. A spatial-spectral adaptive learning model for textile defect images recognition with few labeled data / Y. Zhang [et al.] // Complex & Intelligent Systems. 2023. Vol. 9. pp. 6359-6371.
7. Intelligent agriculture: deep learning in UAV-based remote sensing imagery for crop diseases and pests detection / H. Zhu [et al.] // Frontiers in Plant Science. 2024. Vol. 15. Article ID1435016.

8. Noh S.-K. Recycled Clothing Classification System Using Intelligent IoT and Deep Learning with AlexNet // Computational Intelligence and Neuroscience. 2021. Vol. 2021, Issue 1. Article ID 5544784.
9. Васильев П.В., Сеничев А.В. Применение нейросетевых технологий в задаче контроля поверхностных дефектов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2020. № 1. С. 33-40.
10. Андреева О.В., Дмитриев Д.В. Нейросетевой анализ дефектов микроструктуры поверхности металлов и сплавов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 233-233. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16491> (дата обращения: 21.11.2025).
11. Баранов Д.С., Дуюн Т.А. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования шероховатости при чистовом и получистовом точении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 7. С. 128-134.
12. The Study of the Improved Multilayer Perceptron Algorithm on Hydrophobicity Detection Research of Composite Insulator Bushing / Q. Wang [et al.] // The Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou, China, 2016. pp. 438-441.
13. Estimation of the Hydrophobicity of a Composite Insulator Based on an Improved Probabilistic Neural Network / Q. Sun [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, Issue 9. Article no. 2459.
14. Research on Image Determination Method of Hydrophobicity Distribution of Composite Insulator Based on Convolutional Neural Network / L. Nie [et al.] // Yang, Q., Li, J., Xie, K., Hu, J. (eds) The Proceedings of the 17th Annual Conference of China Electrotechnical Society. ACCES 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 1012. Springer, Singapore, 2023. pp. 459-473.
15. B N.S., K R.M., Shivashimpiger S. Classification and Prediction of Hydrophobicity in Polymeric Insulator using Convolutional Neural Networks // The Proceedings of the 2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon). Vijaypur, India, 2022. pp. 1-5.

16. Artificial Neural Network Assisted Digital Image Processing to Determine the Hydrophobicity of Polymeric Materials / D. Thomazini [et al.] // Materials Science Forum. 2014. Vols. 775-776. pp. 743-748.
17. Hydrophobicity Classification of Composite Insulators Using Convolutional Neural Networks / C.C. Kokalis [et al.] // CSE. 2021. No.23. Article ID B2.119.

References

1. Shchukina N.A. Neural network models in the problem of medical images classification. Modeling, Optimization and Information Technology. 2021. Vol. 9, No. 4. 14 p. Available from: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1028> doi: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.022 (In Russian)
2. Pshenokova I.A., Kiyasov M.R. Models and methods of deep learning in medical image recognition and classification tasks. News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS. 2025. Vol. 27, No. 2. pp. 103-112. doi: 10.35330/1991-6639-2025-27-2-103-112 (In Russian)
3. Artificial intelligence in quality assessment of finished sewing products / V.S. Belgorodsky [et al.] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 2 (398). pp. 168-177. doi: 10.47367/0021-3497_2022_2_168 (In Russian)
4. Fujiyoshi H., Hirakawa T., Yamashita T. Deep learning-based image recognition for autonomous driving // IATSS Research. 2019. Vol. 43, Issue 4. pp. 244-252. doi: 10.1016/j.iatssr.2019.11.008
5. Ni X., Huttunen H. Vehicle Attribute Recognition by Appearance: Computer Vision Methods for Vehicle Type, Make and Model Classification // Journal of Signal Processing Systems. 2021. Vol. 93. pp. 357-368. doi: 10.1007/s11265-020-01567-6
6. A spatial-spectral adaptive learning model for textile defect images recognition with few labeled data / Y. Zhang [et al.] // Complex & Intelligent Systems. 2023. Vol. 9. pp. 6359-6371. doi: 10.1007/s40747-023-01070-y

7. Intelligent agriculture: deep learning in UAV-based remote sensing imagery for crop diseases and pests detection / H. Zhu [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. Article ID1435016. doi: 10.3389/fpls.2024.1435016
8. Noh S.-K. Recycled Clothing Classification System Using Intelligent IoT and Deep Learning with AlexNet // *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2021. Vol. 2021, Issue 1. Article ID 5544784. doi: 10.1155/2021/5544784
9. Vasiliev P.V., Senichev A.V. The use of neural network technologies in the task of controlling surface defects // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Technical science*. 2020. No 1. pp. 33-40. doi: 10.17213/1560-3644-2020-1-33-40 (In Russian)
10. Andreeva O.V., Dmitriev D.V. The neural network analysis of the metals and alloys surface microstructure defects // *Modern problems of science and education*. 2014. No. 6. pp. 233-233. (In Russian)
11. Baranov D.S., Dujun T.A. Application of artificial neural networks for predicting roughness at cleaning and getting point. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 7. pp. 128-134. doi: 10.34031/article_5d35d0b62dc823.22670125 (In Russian)
12. The Study of the Improved Multilayer Perceptron Algorithm on Hydrophobicity Detection Research of Composite Insulator Bushing / Q. Wang [et al.] // *The Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou, China, 2016.* pp. 438-441. doi: 10.1109/IHMSC.2016.265
13. Estimation of the Hydrophobicity of a Composite Insulator Based on an Improved Probabilistic Neural Network / Q. Sun [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, Issue 9. Article no. 2459. doi: 10.3390/en11092459
14. Research on Image Determination Method of Hydrophobicity Distribution of Composite Insulator Based on Convolutional Neural Network / L. Nie [et al.] // Yang, Q., Li, J., Xie, K., Hu, J. (eds) *The Proceedings of the 17th Annual Conference of China Electrotechnical Society. ACCES 2022. Lecture Notes in Electrical Engi-*

neering, vol. 1012. Springer, Singapore, 2023. pp. 459-473. doi: 10.1007/978-981-99-0357-3_47

15. B N.S., K R.M., Shivashimpiger S. Classification and Prediction of Hydrophobicity in Polymeric Insulator using Convolutional Neural Networks // The Proceedings of the 2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon). Vijaypur, India, 2022. pp. 1-5. doi: 10.1109/NKCon56289.2022.1012658

16. Artificial Neural Network Assisted Digital Image Processing to Determine the Hydrophobicity of Polymeric Materials / D. Thomazini [et al.] // Materials Science Forum. 2014. Vols. 775-776. pp. 743-748. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.775-776.743

17. Hydrophobicity Classification of Composite Insulators Using Convolutional Neural Networks / C.C. Kokalis [et al.] // CSE. 2021. No.23. Article ID B2.119.

Коновалова Виктория Сергеевна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Ваганов Никита Андреевич – аспирант кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Спиридовон Никита Михайлович – аспирант кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Дурсунов Дурсун Батырович – магистрант кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

NON-ISOCYANATE POLYURETHANE FOAMS (NIPUFS). PART 2

O. Figovsky^{1*}, N. Hudzenko²

¹*International Nanotechnology Research Center "Polymath",*

Israel, 34750, Haifa, Shimkina str., 3a

²*Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Germany, 67658,*

Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Str. 58

*Corresponding author: Oleg L. Figovsky, e-mail: figovsky@gmail.com

Polyurethane foams (PUFs) constitute a major class of polymeric materials, widely appreciated for their excellent mechanical strength, chemical resistance, and physical versatility. They are used in a wide variety of applications, such as insulation, cushioning, coatings, and structural parts. Traditionally, PUFs are prepared through polyaddition reactions involving polyols, diisocyanates, and water, where the in-situ generated CO₂ in the reaction mixture serves as the blowing agent. However, there are significant concerns with the use of isocyanates as they are toxic, classified respiratory sensitizers, and contribute to environmental pollution. These issues have directed both researchers and industry experts to search for safer and more sustainable alternative feedstocks.

The polyaddition reaction between cyclic carbonates (CCs) and polyfunctional amines has been one promising alternative. The reaction leads to the formation of non-isocyanate polyurethanes (NIPUs), specifically polyhydroxyurethane foams (PHUFs). Foaming is achieved by using external chemical blowing agents or through self-blown reactions, where gases are generated directly in the system. The generated foam cells – the structures that give foams their unique properties – depends largely on the gas-forming reactions.

Keywords: biobased polyurethane; blowing agent; non-isocyanate polyurethane; polymeric foams; polyurethane foams; self-blown

Aabbreviations used in this review: CCs – cyclic carbonates; DABCO – 1,4-diazabicyclo [2.2.2] octane; DABCO – 1,4-diazabicyclo [2.2.2] octane; DSTDL – dibutyltin dilaurate; DBU – 1,8-Diazabicyclo[5.4.0]undec-7-en; EC – ethylene carbonate; GC – Glycerol Carbonate; LDI – L-Lysine ethyl ester diisocyanate; MOF – metal-organic framework; NIPUFs – non-isocyanate poly-

rethane foams; NIPUs – non-isocyanate polyurethanes; PC – propylene carbonate; PHMS – poly(methylhydrogensiloxane); PHUFs – polyhydroxyurethane foams; PHUs – polyhydroxyurethanes; PUs – polyurethanes; PUFs – polyurethane foams; ROP – ring-Opening Polymerization; SDGs – sustainable Development Goals; SOC – spiro-orthocarbonate; TBD – triazabicyclodecene; VOCs – volatile organic compounds

НЕИЗОЦИАНАТНЫЕ ПЕНОПОЛИУРЕТАНЫ (NIPUFS). ЧАСТЬ 2

О. Фиговский¹*, Н. Гудзенко²

¹*Международный научно-исследовательский центр нанотехнологий
«Полимат», Израиль, 34750, Хайфа, ул. Шимкина, 3а*

²*Институт композитных материалов GmbH в Лейбнице, Германия, 67658,
Кайзерслаутерн, ул. Эрвина Шредингера, 58*

**Адрес для переписки: Фиговский Олег Львович, e-mail: figovsky@gmail.com*

Пенополиуретаны (ППУ) представляют собой основной класс полимерных материалов, которые широко ценятся за их высокую механическую прочность, химическую стойкость и универсальность. Они находят широкое применение при изготовлении изоляционных материалов, прокладок, покрытий и деталей конструкций. Традиционно ППУ получают в результате реакций полиприсоединения с участием полиолов, диизоцианатов и воды, где образующийся на месте CO₂ в реакционной смеси служит в качестве вспенивающего агента. Однако использование изоцианатов вызывает серьезные опасения, поскольку они токсичны, классифицируются как респираторные сенсибилизаторы и способствуют загрязнению окружающей среды. Эти проблемы побудили исследователей и экспертов отрасли к поиску более безопасного и экологичного альтернативного сырья.

Одной из многообещающих альтернатив является реакция полиприсоединения циклических карбонатов (ЦК) с полифункциональными аминами. Эта реакция приводит к образованию неизоцианатных полиуретанов (НИПУ), в частности полигидроксиуретановых пен (ПГУП). Вспенивание достигается за счет использования внешних химических вспенивателей или за счет реакций самовозгорания, при которых газы образуются непосредственно в системе. Образующиеся ячейки пены – структуры, которые придают пены ее уникальные свойства, – в значительной степени зависят от реакций газообразования.

Ключевые слова: пенополиуретан на биополиуретановой основе; пенообразователь; неизоцианатный полиуретан; полимерные пены; пенополиуретановые пенопласти; самонадувающийся

Synthesis of cyclic carbonates

The carbonation of epoxides with CO₂ (shown as Equation below, fig. 1) is a key reaction for creating cyclic carbonates, which are essential building blocks for non-isocyanate polyurethanes. This process offers a sustainable and environmentally friendly approach, as it uses CO₂ – an abundant and renewable resource – as a raw material.

In this section, the focus is on how this carbonation reaction works, what chemical conditions are needed, and the progress being made in developing better catalytic systems to make the process more efficient (table 1).

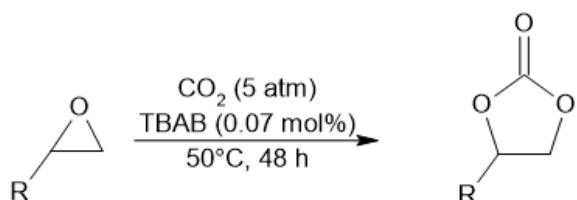


Fig. 1. Carbonation of epoxides with CO₂ to form cyclic carbonates.

1. Catalysts and Conditions. The carbonation process works by reacting epoxides with CO₂ in the presence of catalysts like organobases, metal salts, or ionic liquids [42–45]. These reactions typically require moderate to high pressure and temperature. To make the process more energy-efficient and eco-friendly, researchers have also been exploring solvent-free systems and milder reaction conditions [1].

2. Bio-Based Carbonation Systems. Using bio-based materials is another important focus. For example, epoxy soybean oil can react with CO₂ to produce cyclic carbonates, which can then be used to make NIPUs by reacting with amines [2]. This approach fits with green chemistry principles, as it relies on renewable feedstocks and generates less hazardous waste.

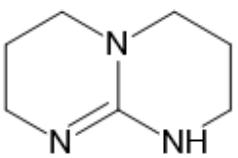
3. *CO₂ Fixation via Spiro-Orthocarbonate (SOC) Polymerization.* Spiro-orthocarbonate polymerization is another interesting method. In this process, carbonation happens with very little internal stress, making it ideal for applications where low shrinkage is important [3].

4. *Decarboxylation in Self-Blowing Foams.* There's also a clever strategy for making self-blown foams. Here, decarboxylation of cyclic carbonates by thiols releases CO₂ directly during the reaction, which helps the foam expand without needing external blowing agents [4].

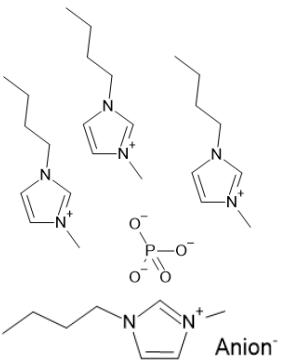
5. *Alcohol Carbonation Routes.* Finally, CO₂ can react with alcohols like glycerol or ethylene glycol to form cyclic carbonates. This method uses CO₂ as a carbon source and supports circular economy goals [5 – 7]. However, getting good catalytic performance under mild conditions is still a challenge researchers are working to solve.

Based on comparisons across different systems, the most commonly used and industrially practical catalysts for the carbonation process are organobases like TBD and metal salts such as Zn (II) or Al (III). These options strike a good balance between reactivity, efficiency, and scalability, which makes them particularly well-suited for large-scale NIPU production. Meanwhile, MOF-based catalysts are gaining attention as a greener and more sustainable solution for CO₂ utilization, especially when working under milder conditions.

Table 1
Comparative Table of Carbonation Conditions and Catalysts.

Catalyst Type	Catalyst Example	Reaction Conditions (Temp/Pressure)	Efficiency / Notes
Organic bases	TBD (Triazabicyclodecene) 	80–120°C / 5–10 bar	High with epoxides [8]
Metal Salts	Zn (II), Al (III), Sn (IV)	100–140°C / 10–30 bar	Good conversion, reusable [9]

Continuation of table 1

Ionic Liquids	Imidazolium-based ILs 	70–110°C / 5–20 bar	High selectivity [10]
MOF-based Catalysts	ZIF-8, MIL-101	Mild (~80°C / ≤10 bar)	High yield under mild conditions [11]
Biocatalyst mimics	Polypeptide/MOF hybrids	50–80°C / ambient to 5 bar	Promising lab-scale results [12]
No Catalyst	—	>160°C / >30 bar	Low conversion (benchmark)

Based on comparisons across different systems, the most commonly used and industrially practical catalysts for the carbonation process are organobases like TBD and metal salts such as Zn (II) or Al (III). These options strike a good balance between reactivity, efficiency, and scalability, which makes them particularly well-suited for large-scale NIPU production. Meanwhile, MOF-based catalysts are gaining attention as a greener and more sustainable solution for CO₂ utilization, especially when working under milder conditions.

Types of Catalysts for Carbonation in NIPU Synthesis

Catalysts play a crucial role in speeding up the carbonation process, which is the reaction between CO₂ and epoxides or alcohols [13, 14]. The cyclic carbonates produced through this reaction are key intermediates in making non-isocyanate polyurethanes.

The most commonly used catalysts are metal-based compounds, such as Zn (II), Al (III), and Co (III). These work as Lewis acids, helping to activate the epoxide ring and make the reaction more efficient [15, 16]. A good catalyst not only boosts efficiency but also allows the reaction to happen under milder conditions and improves selectivity toward the desired products.

Researchers have explored a wide range of catalyst systems for both industrial and lab-scale use. These include metal complexes, organocatalysts, ionic liquids, thiol-based systems, and heterogeneous catalysts supported on solid materials [17 – 19].

Types of Catalysts Used in Carbonation

There are several types of catalysts used to drive the carbonation process (table 2), each with its own benefits and challenges:

- 1) Metal-Based Catalysts: These include salts and complexes of zinc, cobalt, aluminum, and tin. They work as Lewis acids, helping to activate the epoxide ring so that CO₂ can insert into the structure. These catalysts are generally effective under elevated pressures (5–30 bar) and temperatures (60–150°C) [13, 15]. Zinc-based catalysts are especially popular because they're affordable and easier to scale up [20].
- 2) Organocatalysts: Organic bases like DBU and TBD have gained attention because they allow carbonation reactions to happen under milder conditions, with lower toxicity and less energy input [14, 21]. They also support solvent-free reactions, which is a key advantage from a green chemistry perspective [8].
- 3) Ionic Liquids: Ionic liquids like imidazolium- and pyridinium-based systems ([BMIm][BF₄], [EMIm][Cl]) offer a dual advantage – they dissolve CO₂ and also catalyze the reaction [22]. Their ability to be tuned for different tasks, low volatility, and recyclability make them appealing. However, they can be expensive, and recovering them for reuse can be tricky [16].
- 4) Thiol-Based Catalysts: Thiols can serve both as reactants and as internal catalysts in the decarboxylation of cyclic carbonates. This approach allows CO₂ to be released directly during the reaction, which helps create foams without needing extra blowing agents [18]. The structure of the thiol (whether it's di-, tri-, or tetrafunctional) influences the mechanical and thermal properties of the final foam.
- 5) Heterogeneous Catalysts: Recent research highlights the potential of heterogeneous systems, including metal oxides, carbon-based materials, and especially metal-

organic frameworks, for large-scale applications [23–25]. These catalysts are reusable, reduce environmental impact, and can mimic enzyme-like activity [26].

Table 2

Summary of Catalysts Used in the Carbonation Step of NIPU Synthesis

Catalyst Type	Examples	Conditions (Temp/Pressure)	Solvent Requirement	Advantages
Metal-Based	Zn (II), Al (III), Sn (IV)	80–150°C / 10–30 bar	Optional	High efficiency, scalable
Organocatalysts	DBU, TBD	60–120°C / 5–15 bar	No	Green, mild conditions
Ionic Liquids	[BMIm][BF ₄], [EMIm][Cl]	70–130°C / 5–20 bar	Yes	Dual function, recyclable
Thiol-Based	Di-/Tri-/Tetra-thiols	Variable	Varies	Reacts + catalyzes, foam-specific
Heterogeneous	MOFs, Silica, Zeolites	60–140°C / 5–25 bar	Optional	Recyclable, stable

Among the different catalysts discussed, metal-based catalysts are still the most commonly used in industrial applications. They offer reliable performance, are relatively affordable, and are easy to scale up for large production.

However, there's growing interest in organocatalysts and ionic liquids because they have a smaller environmental footprint.

Current research is focused on developing catalysts that combine high efficiency with recyclability and compatibility with bio-based raw materials [27, 28]. This way, the goal is to make the whole process more sustainable and suitable for large-scale, greener production of NIPUs.

Amines in NIPUF Synthesis

Amines are key building blocks in the synthesis of non-isocyanate polyurethane foams. They act as nucleophiles, reacting with cyclic carbonates to form β -hydroxyurethane linkages. This aminolysis process essentially defines the structure of the polymer and directly affects important properties like crosslinking density, foam structure, mechanical strength, thermal stability, and even biodegradability [29, 30].

Types of Amines Used

A wide range of amines has been explored in NIPU synthesis (table 3):

- Primary amines (such as ethylene diamine, hexamethylene diamine) are highly reactive with cyclic carbonates, making them ideal for fast and efficient polymerization [31].
- Secondary amines react more slowly, which can actually be beneficial when you want more control over the polymer's architecture [1].
- Fatty diamines (like PRIAMINE 1075) are bio-based alternatives that provide excellent tensile strength and flexibility [32].
- Gallic acid- and polysiloxane-modified amines can boost both the thermal and mechanical properties of the final materials [33].

Reactivity and Structure–Property Relationships

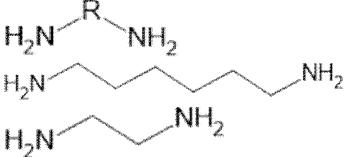
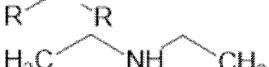
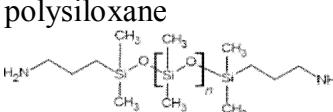
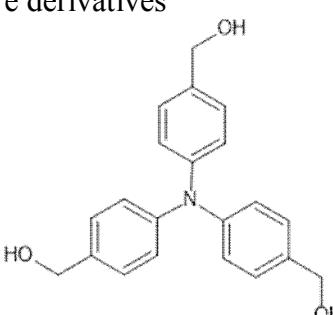
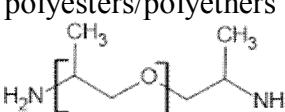
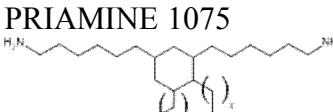
The structure of the amine plays a major role in determining the final properties of the polymer:

- Linear diamines tend to increase rigidity and also improve biodegradability [33].
- Aromatic diamines make the polymer stiffer and give it better thermal resistance [34, 35].
- Amine-terminated oligomers with controlled functionality are used to build hybrid NIPU networks, helping to boost crosslinking and increase the gel content in the final material [36 – 40].

Amines are essential for making Non-Isocyanate Polyurethanes (NIPUs). They react with cyclic carbonates to create the urethane bonds that define the polymer. The specific amine you choose has a big influence on the material's key properties – things like hardness, elasticity, biodegradability, and thermal stability. Researchers have tested a wide variety of primary and secondary amines, along with different oligomeric and bio-based amines, to fine-tune the characteristics of NIPUs. The table below provides a summary of the most commonly used amines in NIPU synthesis.

Table 3

Comparative Table: Types of Amines Used in NIPU Synthesis

Amine Type	Structure / Example	Reactivity with Cyclic Carbonates	Impact on Polymer Properties	Sustainability / Source
Primary Diamines	Hexamethylene diamine, Ethylene diamine 	High, rapid aminolysis	High cross-linking, strong and rigid foams	Widely available, some bio-based variants
Secondary Amines	Diethylamine 	Moderate, slower than primary	Controlled crosslinking, improved flexibility	Synthetic, limited bio-variants
Polysiloxane-modified Amines	Amine-terminated polysiloxane 	Moderate to high	Enhances flexibility, hydrophobicity	Specialty chemical, synthetically modified
Gallic Acid-based Amines	Tris(hydroxyphenyl)amine derivatives 	High	Improves thermal stability	Derived from natural phenols
Amine-Terminated Oligomers	Amine-terminated polyesters/polyethers 	Controlled, stoichiometric	Enhances toughness, tailored architecture	Can be bio-based or synthetic
Fatty Diamines	PRIAMINE 1075 	High	Exceptional elongation and strength	Fully renewable, bio-based

The molar ratio between the amine and cyclic carbonate, as well as the curing temperature (typically between 10–140 °C), are critical factors for achieving the desired properties in the final material. These factors influence important characteristics like gel fraction, porosity, and hydrolytic stability. Studies by Figovsky et al. (2009) showed that careful control of these parameters leads to better performance [37].

Role in Self-Blowing Foams

Amines also play a key role in the production of self-blown PHU foams. They react with cyclic carbonates to form the urethane linkages, and when combined with thiols, they help generate CO₂ directly within the system. This reaction allows the foam to expand without needing additional external blowing agents [31, 33, 41].

Hybrid and Networked NIPUs

Recent patents describe the development of cyclocarbonate-epoxy-amine hybrid systems for making highly crosslinked NIPU networks. These hybrid systems have been shown to offer: gel fractions over 96 %; excellent chemical resistance; improved performance as composite matrices

These hybrid NIPUs help address common problems found in traditional isocyanate-based materials, like poor hydrolytic stability and environmental toxicity [32, 42].

Advantages and Sustainability

- Bio-based origins: Many amines can be sourced from renewable materials like vegetable oils and lignin, which helps improve the overall sustainability of the process [43, 44].
- Lower toxicity: Compared to isocyanates, amines are much safer to handle and align better with the goals of green chemistry [45].
- Functionality control: By modifying the chain ends or side groups of amines, researchers can fine-tune the architecture of the resulting polymers [46].

Amines are incredibly versatile and reactive building blocks in the development of NIPUs and NIPUFs. Whether it's simple linear diamines or more complex biobased and functionalized amines, they offer precise control over polymer structure, foaming behavior, and overall performance. In short, amines play a crucial role in creating safer, greener, and more durable alternatives to traditional polyurethanes.

Conclusion

This review focuses on the different blowing agents used in NIPUF synthesis, such as poly(methylhydrogensiloxane) (PHMS) and liquid fluorohydrocarbons. It al-

so looks at recent advances in self-blown techniques, which eliminate the need for external agents and make the process more sustainable. Special emphasis is placed on NIPUFs derived from renewable feedstocks, as these align with global trend towards green chemistry and circular materials. The review provides an overview of both externally blown and self-blown biobased NIPUFs, detailing their synthesis, performance, and potential industrial applications.

References

1. Peng J., Wang S., Yang H.-J., et al. Chemical fixation of CO₂ to cyclic carbonate catalyzed by new environmental-friendly bifunctional bis-β-cyclodextrin derivatives // Catal Today 330 (2019) 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.06.020>.
2. Doley S., Bora A., Saikia P., et al. Blending of cyclic carbonate based on soybean oil and glycerol: a non-isocyanate approach towards the synthesis of polyurethane with high performance // Journal of Polymer Research 28 (2021) 146. <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02485-2>.
3. Liu M., Liu B., Shi L., et al. Melamine-ZnI₂ as heterogeneous catalysts for efficient chemical fixation of carbon dioxide to cyclic carbonates //, RSC Adv 5 (2015) 960–966. <https://doi.org/10.1039/C4RA11460D>.
4. Hirose T., Qu S., Kodama K., et al. Organocatalyst system for disubstituted carbonates from cycloaddition between CO₂ and internal epoxides // Journal of CO₂ Utilization 24 (2018) 261–265. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.01.016>.
5. Huh S. Direct Catalytic Conversion of CO₂ to Cyclic Organic Carbonates under Mild Reaction Conditions by Metal—Organic Frameworks // Catalysts 9 (2019) 34. <https://doi.org/10.3390/catal9010034>.
6. Brege A., Grignard B., Méreau R., et al. En Route to CO₂-Based (a)Cyclic Carbonates and Polycarbonates from Alcohols Substrates by Direct and Indirect Approaches // Catalysts 12 (2022) 124. <https://doi.org/10.3390/catal12020124>.

7. Tomishige K., Gu Y., Nakagawa Y., et al. Reaction of CO₂ With Alcohols to Linear-, Cyclic-, and Poly-Carbonates Using CeO₂-Based Catalysts // Front Energy Res 8 (2020). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00117>.
8. W. Liu, G. Hang, H. Mei, L. Li, S. Zheng, Nanocomposites of Polyhydroxyurethane with POSS Microdomains: Synthesis via Non-Isocyanate Approach, Morphologies and Reprocessing Properties, Polymers (Basel) 14 (2022) 1331. <https://doi.org/10.3390/polym14071331>.
9. Hedrick J.L., Piunova V., Park N.H., et al. Simple and Efficient Synthesis of Functionalized Cyclic Carbonate Monomers Using Carbon Dioxide // ACS Macro Lett 11 (2022) 368–375. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00060>.
10. Krutskikh D.V., Shapagin A.V., Plyusnina I.O., et al. Modification of Epoxy Coatings with Fluorocontaining Organosilicon Copolymers // Polymers (Basel) 16 (2024) 1571. <https://doi.org/10.3390/polym16111571>.
11. Singh Dhankhar S., Ugale B., Nagaraja C.M. Co□Catalyst□Free Chemical Fixation of CO₂ into Cyclic Carbonates by using Metal□Organic Frameworks as Efficient Heterogeneous Catalysts // Chem Asian J 15 (2020) 2403–2427. <https://doi.org/10.1002/asia.202000424>.
12. Alves M., Grignard B., Gennen S., et al. Organocatalytic synthesis of bio-based cyclic carbonates from CO₂ and vegetable oils // RSC Adv 5 (2015) 53629–53636. <https://doi.org/10.1039/C5RA10190E>.
13. Sun J., Wang L., Zhang S., et al. ZnCl₂/phosphonium halide: An efficient Lewis acid/base catalyst for the synthesis of cyclic carbonate // J Mol Catal A Chem 256 (2006) 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2006.05.004>.
14. Honda M., Tamura M., Nakao K., et al. Direct Cyclic Carbonate Synthesis from CO₂ and Diol over Carboxylation/Hydration Cascade Catalyst of CeO₂ with 2-Cyanopyridine // ACS Catal 4 (2014) 1893–1896. <https://doi.org/10.1021/cs500301d>.
15. He Q., O'Brien J.W., Kitselman K.A., et al. Synthesis of cyclic carbonates from CO₂ and epoxides using ionic liquids and related catalysts including

choline chloride–metal halide mixtures // Catal. Sci. Technol. 4 (2014) 1513–1528.
<https://doi.org/10.1039/C3CY00998J>.

16. Martínez-Ferraté O., Chacón G., Bernardi F., et al. Cycloaddition of carbon dioxide to epoxides catalysed by supported ionic liquids // Catal Sci Technol 8 (2018) 3081–3089. <https://doi.org/10.1039/C8CY00749G>.
17. Ge Y., Liu W., Zou Y., et al. A solid Zn complex catalyst for efficient transformation of CO₂ to cyclic carbonates at mild conditions // Tetrahedron 119 (2022) 132857. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2022.132857>.
18. Bousquet B., Martinez A., Dufaud V. Zinc–Azatrane Complexes as Efficient Catalysts for the Conversion of Carbon Dioxide into Cyclic Carbonates // ChemCatChem 10 (2018) 843–848. <https://doi.org/10.1002/cctc.201701481>.
19. Appaturi J.N., M.K. Gnanamani, G. Periyasami, et al. Review on Carbon Dioxide Utilization for Cycloaddition of Epoxides by Ionic Liquid-Modified Hybrid Catalysts: Effect of Influential Parameters and Mechanisms Insight // Catalysts 11 (2020) 4. <https://doi.org/10.3390/catal11010004>.
20. Kessarati-koon T., Theerathanagorn T., Crespy D., et al. Organocatalytic Polymers from Affordable and Readily Available Building Blocks for the Cycloaddition of CO₂ to Epoxides // J Org Chem 88 (2023) 4894–4924. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.2c02447>.
21. Natongchai W., Posada-Pérez S., Phungpanya C., et al. Enhancing the Catalytic Performance of Group I, II Metal Halides in the Cycloaddition of CO₂ to Epoxides under Atmospheric Conditions by Cooperation with Homogeneous and Heterogeneous Highly Nucleophilic Aminopyridines: Experimental and Theoretical Study // J Org Chem 87 (2022) 2873–2886. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.1c02770>.
22. Detrembleur C., Thomassin J.-M., Grignard B., et al. Self-blown isocyanate-free polyurethane foams // WO2021004993A1, 2019.
23. Mańka D., Siewniak A. Deep Eutectic Solvents as Catalysts for Cyclic Carbonates Synthesis from CO₂ and Epoxides // Molecules 27 (2022) 9006. <https://doi.org/10.3390/molecules27249006>.

24. Diakoumakos C.D., Lubomirov Kotzev D. Non-Isocyanate-Based Polyurethane and Hybrid Polyurethane-Epoxy Nanocomposite Polymer Compositions // US20120149842A1, n.d. <https://patents.google.com/patent/US20120149842A1/en> (accessed February 15, 2012).
25. Benedito A., Acarreta E., Giménez E. Highly Efficient MOF Catalyst Systems for CO₂ Conversion to Bis-Cyclic Carbonates as Building Blocks for NI-PHUs (Non-Isocyanate Polyhydroxyurethanes) Synthesis //, Catalysts 11 (2021) 628. <https://doi.org/10.3390/catal11050628>.
26. He X., Wu G., Xu L., et al. Lipase-Catalyzed Synthesis, Properties Characterization, and Application of Bio-Based Dimer Acid Cyclocarbonate // Polymers (Basel) 10 (2018) 262. <https://doi.org/10.3390/polym10030262>.
27. Monmagnon A., Bayle P.-A., Flaig F., et al. Insights on the polymerization kinetics of non-isocyanate polyurethanes (NIPU) using in situ NMR spectroscopy // Polym Test 140 (2024) 108615. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108615>.
28. Huang H., Qui X., Wang C., et al. Water-induced self-foaming polyhydroxy polyurethane foam and preparation method and application thereof // CN119529362A, n.d. [https://patents.google.com/patent/CN119529362A/en?oq=CN119529362+\(A\)](https://patents.google.com/patent/CN119529362A/en?oq=CN119529362+(A)) (accessed December 18, 2024).
29. Yu L., Jia K., Zheg X., et al. A kind of organic-silicon-modified single functionality polyurethane acrylic ester monomer and the preparation method and application thereof // CN109762008A, n.d. <https://patents.google.com/patent/CN109762008A/en?oq=CN109762008A> (accessed December 28, 2018).
30. de la Cruz-Martínez F., Castro-Osma J.A., Lara-Sánchez A. Catalytic synthesis of bio-sourced organic carbonates and sustainable hybrid materials from CO₂, in: 2022: pp. 189–236. <https://doi.org/10.1016/bs.acat.2022.07.003>.
31. Monie F., Grignard B., Thomassin J., et al. Chemo- and Regioselective Additions of Nucleophiles to Cyclic Carbonates for the Preparation of Self-Blowing

Non-Isocyanate Polyurethane Foams // *Angewandte Chemie* 132 (2020) 17181–17189. <https://doi.org/10.1002/ange.202006267>.

32. Catalá J., Guerra I., García-Vargas J.M, et al. Tailor-Made Bio-Based Non-Isocyanate Polyurethanes (NIPUs), *Polymers* (Basel) 15 (2023) 1589. <https://doi.org/10.3390/polym15061589>.

33. Yu L., Zheng X., Jia K., et al. A kind of organic-silicon-modified bifunctionality urethane acrylate monomer and the preparation method and application thereof // CN109762008A, 2018.

34. Matsumoto K., Kokai A., Endo T. Synthesis and properties of novel poly(hydroxyurethane) from difunctional alicyclic carbonate and m-xylylenediamine and its possibility as gas barrier materials // *Polymer Bulletin* 73 (2016) 677–686. <https://doi.org/10.1007/s00289-015-1513-2>.

35. Mhatre S.V., Mahajan J.S., Epps T.H., et al. Lignin-derivable alternatives to petroleum-derived non-isocyanate polyurethane thermosets with enhanced toughness // *Mater Adv* 4 (2023) 110–121. <https://doi.org/10.1039/D2MA00895E>.

36. Figovsky O. Hybrid nonisocyanate polyurethane network polymers and composites formed therefrom // KR20010071470A, 2001. <https://patents.google.com/patent/KR20010071470A/en?oq=KR20010071470> (accessed July 28, 2001).

37. Leykin A., Beilin D., Birukova O., et al. Nonisocyanate Polyurethanes Based on Cyclic Carbonates: Chemistry and Application. Review // *Journal "Scientific Israel-Technological Advantages* 9 (2009) 159–189. https://www.researchgate.net/publication/261362367_Nonisocyanate_Polyurethanes_Based_on_Cyclic_Carbonates_Chemistry_and_Application_Review (accessed August 18, 2025).

38. Ke J., Li X., Wang F., et al. Non-isocyanate polyurethane/epoxy hybrid materials with different and controlled architectures prepared from a CO₂ -sourced monomer and epoxy via an environmentally-friendly route // *RSC Adv* 7 (2017) 28841–28852. <https://doi.org/10.1039/C7RA04215A>.

39. Wazarkar K., Kathalewar M., Sabnis A. Development of epoxy-urethane hybrid coatings via non-isocyanate route // Eur Polym J 84 (2016) 812–827. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.10.021>.
40. Asemani H., Zareanshahraki F., Mannari V. Design of hybrid nonisocyanate polyurethane coatings for advanced ambient temperature curing applications, 47266 (2018) 1–10. <https://doi.org/10.1002/app.47266>.
41. Bourguignon M., Grignard B., Detrembleur C. Water-Induced Self-Blown Non-Isocyanate Polyurethane Foams // Angewandte Chemie International Edition 61 (2022). <https://doi.org/10.1002/anie.202213422>.
42. He H., Sun Q., Gao W., et al. A Stable Metal–Organic Framework Featuring a Local Buffer Environment for Carbon Dioxide Fixation // Angewandte Chemie - International Edition 57 (2018) 4657–4662. <https://doi.org/10.1002/anie.201801122>.
43. Kotanen S., Poikelispää M., Efimov A., et al. Hydrolytic stability of polyurethane/polyhydroxyurethane hybrid adhesives, Int J Adhes Adhes 110 (2021) 102950. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102950>.
44. Wołosz D., Parzuchowski P.G. Biobased non-isocyanate poly(carbonate-urethane)s of exceptional strength and flexibility // Polymer (Guildf) 254 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125026>.
45. Delavarde A., Savin G., Derkenne P., et al. Sustainable polyurethanes: toward new cutting-edge opportunities // Prog Polym Sci 151 (2024) 101805. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2024.101805>.
46. Orabona F., Recupido F., Lama G.C., et al. Cutting-edge development of non-isocyanate polyurethane (NIPU) foams: from sustainable precursors to environmental impact evaluation // Green Chemistry 27 (2025) 7403–7444. <https://doi.org/10.1039/D4GC05796A>.

Фиговский Олег Львович – д-р техн. наук, специалист в области создания новых композиционных материалов, Академик EAS, РИА и РААСН, почётный доктор КНИТУ, почетный профессор КГТУ, ВГТУ и WSG

Гудзенко Наталья – ведущий научный сотрудник института композитных материалов в Лейбнице

**ТИПОЛОГИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОГРУЖНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА
ЦН160/112 С УЧЕТОМ РАБОЧИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

И.М. Винокурова, Н.А. Хонькин, Д.В. Титова*

Воронежский государственный технический университет, Российской Федерации, 394006, г. Воронеж, ул. 20-лет Октября, 84

**Адрес для переписки: Винокурова Ирина Михайловна, E-mail: vinokurovai@bk.ru*

Машиностроительная нефтегазовая промышленность на данный момент включает площадки, выполняющие большой спектр операций по добыче, переработке, поставке нефтеперерабатывающих предприятий. Работа технического оборудования (центробежных погружных насосов) в различных климатических, физических и производственных условиях обязывает применять и вводить более прогрессивные приемы защиты с дублирующими мерами безопасности. Рассмотрение работы оборудования погружных центробежных насосов с учетом технических нормативов и территориальных эксплуатационных условий, предписывает инженерные службы прорабатывать и вводить в эксплуатационное обслуживание комплексные средства защиты оборудования с использованием сочетающихся способов обеспечения защиты бесперебойной работы насосов. В зависимости от возлагаемой нагрузки ответственности на площадки нефтегазового и машиностроительного производства необходимо разрабатывать несколько вариантов по обеспечению защиты, как самих отдельных технологических объектов производства, так и в комплексной совокупности технологического предприятия в целом.

Ключевые слова: материалы оборудования, комплексные методы защиты, погружные центробежные насосы, параметры работы технического оборудования.

**TYPОLOGY OF CORROSION DAMAGE TO THE COMPONENTS OF THE CN160/112
SUBMERSIBLE CENTRIFUGAL PUMP, TAKING INTO ACCOUNT THE OPERA-
TIONAL TECHNICAL DATA**

I.M. Vinokurova, N.A. Khonkin, D.V. Titova*

Voronezh State Technical University, ul. 20-let Oktyabrya, 84, Voronezh, 394006, Russian Federation

*Address for correspondence: Vinokurova Irina Mikhailovna, E-mail: vinokurovai@bk.ru

The engineering and oil and gas industry currently includes sites that perform a wide range of operations related to extraction, processing, and supply of oil refineries. The operation of technical equipment (centrifugal submersible pumps) in various climatic, physical, and industrial conditions requires the use of more advanced protection methods with redundant safety measures. The consideration of the operation of centrifugal submersible pumps, taking into account technical regulations and local operating conditions, requires engineering services to develop and implement comprehensive equipment protection measures using a combination of methods to ensure the uninterrupted operation of pumps. Depending on the level of responsibility assigned to the oil and gas and engineering production sites, it is necessary to develop several options for ensuring the protection of individual technological facilities.

Keywords: equipment materials, comprehensive protection methods, submersible centrifugal pumps, and technical equipment operating parameters.

Введение

Погружные центробежные насосы представляют собой ключевые устройства, используемые в различных секторах промышленности, таких как нефтегазовая, химическая и водоснабжение. Их основная задача состоит в перемещении жидкостей, что делает их незаменимыми в процессах добычи, переработки и транспортировки различных веществ. Тем не менее, несмотря на их важность, погружные насосы подвержены множеству возможных повреждений, среди которых [1 – 3, 11 – 15] коррозионные дефекты занимают особое место. Коррозия [4 – 10], являясь естественным процессом разрушения материалов под воздействием агрессивных сред, может значительно ухудшить эксплуатационные характеристики насосного оборудования, привести к его преждевременному вы-

ходу из строя [11-20] и, как следствие, к значительным [21 – 29] финансовым и [30 – 37] технологическим потерям.

Обзор рассматривает конструкцию насосов, подчеркивая важность элементов, не связанных напрямую с проточной частью, для их надежности. На нефтеперерабатывающих заводах используется более двух тысяч насосных агрегатов различных типов, а на крупных предприятиях их количество может достигать пяти тысяч. Высокое качество оборудования критически важно для эффективной работы всего комплекса и, основываясь на многолетнем опыте эксплуатации, обеспечивает значительную экономию ресурсов.

Схема составляющих компонентов центробежного погружного насоса представлена на рисунке 1 а, где наглядно видны основные проблемные участки в техническом оборудовании (рис. 1б, в, г) для проработки под защиту.

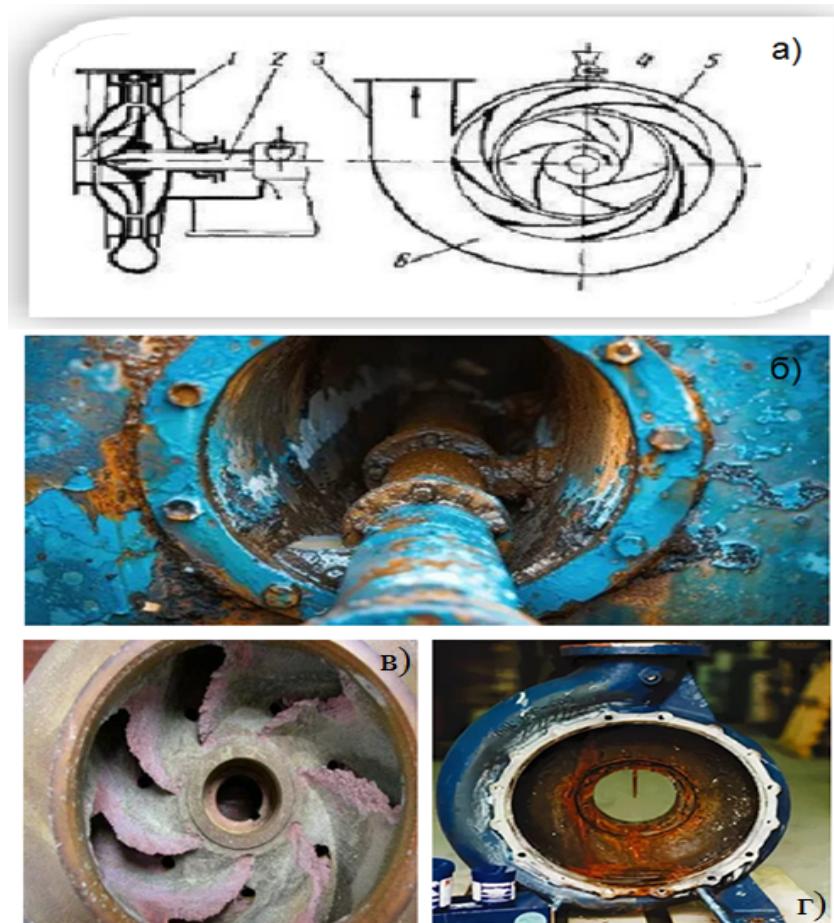


Рис. 1. Иллюстрация возможных разрушений объекта исследования: а – составляющие компоненты центробежного погружного насоса:
1 – всасывающая турбина; 2 – вал; 3 – нагнетательный парубок; 4 – рабочее колесо;
5 – направляющий аппарат; 6 – корпус; б – коррозионное разрушение вала насоса;
в – коррозия крыльчатки; г – коррозия корпуса насоса

Разберем основные проблемные узлы центробежного насоса, вызывающие причины сбоя технологического оборудования в период работы производства обрабатывающего и изготавливающего машиностроения (табл. 1). Детализация возможных причин возникновения поломок и повреждений оборудования площадок нефтегазо- и машиностроительного предприятия представляется на рисунке 2.



Рис. 2. Систематизация возможных причин неполадок насосного оборудования

Таблица 1
Технические характеристики насосов ЦН160/112

Опорные компоненты	Марка материала
Корпус и корпусные части	чугун или нержавеющая сталь 12Х18Н10Т
Валы	нержавеющая сталь 12Х18Н10Т
Рабочее колесо	латунированное или из нержавеющей стали класса 12Х18Н10Т
Уплотнения	торцевые или уплотнения с гидравлическим утечком, из эталонных материалов
Рабочие параметры	
Рабочее давление до 16 МПа	Глубина погружения до 300 м
Температура среды до 80°C	Скорость вращения: 980 — 1450 об/мин

Статистика возможных аварийных ситуаций на площадках цехов при технологических процессах подготовки нефти и воды, а также в условиях создания работы стабильного давления (пластового), спровоцированных коррозионными разрушениями в частях оборудования представлена таблицах 2, 3.

Таблица 2

Разновидности проблем эксплуатации насосного оборудования

Разновидность проблемы	Описание возникновения проблемы	Результаты воздействия
Коррозия и эрозия элементов насоса, находящихся в непосредственном контакте с водой	Наиболее значительные повреждения фиксировались на рабочих колесах, валах, подшипниках и корпусах насосов, так как они испытывают наибольшие нагрузки.	Воздействие агрессивных сред вызывало уменьшение толщины стенок и ухудшение рабочих параметров всего агрегата
Кавитационные процессы	Процесс образования и последующего схлопывания пузырьков (каверн) в потоке жидкости, вызванный локальным падением давления ниже давления насыщенных паров этой жидкости.	Вызывали удары в процессе работы, усиливали вибрации всего агрегата, сокращали срок службы подшипников, увеличивали износ внутренних элементов и приводили к истончению стенок корпуса
Наличие в перекачиваемой среде твердых включений	Абразивный износ и механические повреждения внутренних поверхностей насоса, вызванные воздействием взвешенных или растворенных твердых частиц в перекачиваемой жидкости (пульпе)	Способствовало абразивному изнашиванию проточной части насоса, что также сокращало срок службы его оборудования
Работа насосных агрегатов на недогруженных ($0,5\dots0,7 Q_{\text{опт}}$) и нерасчетных режимах (ниже $0,5 Q_{\text{опт}}$)	Это комплекс негативных явлений, возникающих, когда насос вынужден длительно работать с расходом (Q) значительно ниже его оптимального КПД ($Q_{\text{опт}}$), указанного в паспорте	Значительно ухудшает вибродинамические характеристики центробежных насосов, что, в свою очередь, снижает их эффективность
Работа насоса на неоптимальных режимах	Эксплуатация агрегата с параметрами (расход Q , напор H), значительно отклоняющимися от расчетной точки его максимального КПД	Приводит к неравномерному нагреву вала и стенок корпуса из-за различий в коэффициентах теплового расширения использованных материалов и методов крепления, что уменьшало установленные зазоры в насосе и увеличивало нагрузки на него

Таблица 3

Динамика возникновения аварийных ситуаций составляющих
узлов насосного оборудования

Аварийная ситуация	Доля участия в общем числе отказов, %
Выход из строя подшипников	18
Рабочее колесо	25
Перегрев торцевых уплотнений	27
Остановка электродвигателя насоса	16
Отказ подачи масла в насос	14
Всего	100

К требованиям к рабочему колесу относятся высокая прочность, износостойкость и устойчивость к эрозионной коррозии, вызванной кавитацией и частицами в потоке. Для достижения этих характеристик в машиностроении и нефтегазовой промышленности применяются специальные материалы (рис. 3).

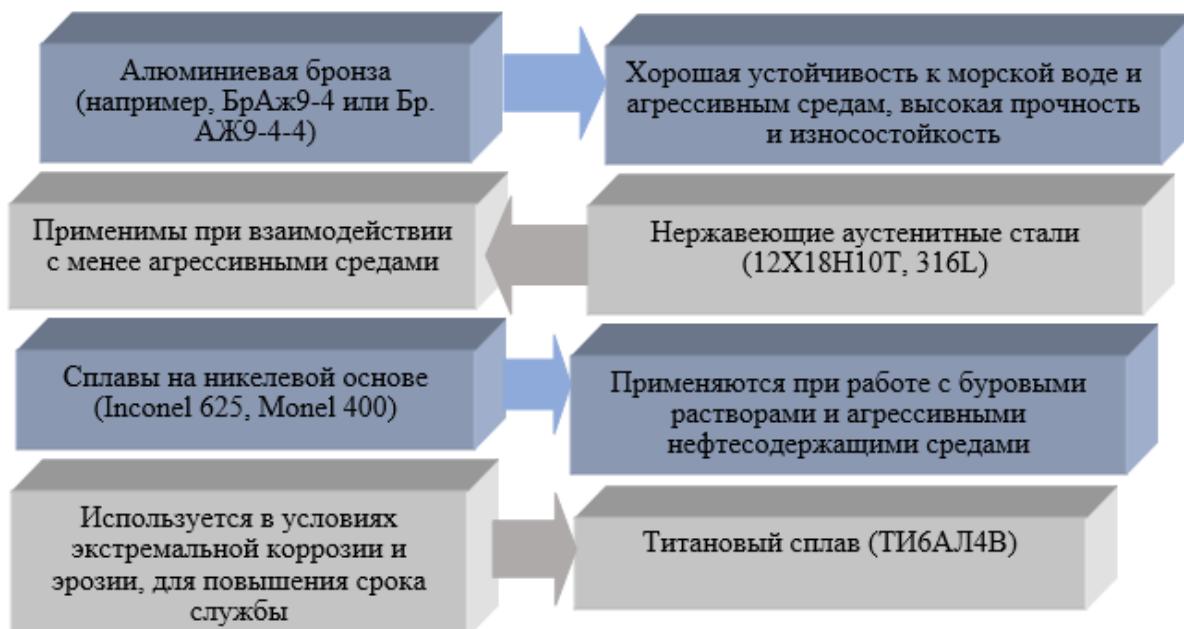


Рис. 3. Рекомендуемые варианты выбора специализированных материалов для изготовления насосного оборудования

Для корпуса насоса также должны соблюдаться важнейшие требования: высокая прочность, коррозионная стойкость, стойкость к гидроударам. Для достижения этих характеристик используются углеродные стали с антикоррозионной защи-

той (например, Сталь 20, Сталь 35), которые применяются в менее агрессивных средах с добавлением защитных покрытий (эпоксидных, резиновых).

Примеры аварий, вызванных коррозионными повреждениями погружных центробежных насосов, свидетельствуют о высокой опасности агрессивных сред и недостаточной профилактике. Так, в 2015 году на нефтеперерабатывающем предприятии в Северном море насос ЦН160/112, эксплуатируемый в хлорсодержащей воде с сульфидами, начал проявлять признаки коррозии, что привело к развитию трещин, разгерметизации и разрушению рабочего колеса. Это вызвало утечку жидкой среды, остановку добычи и значительные убытки, подчёркивая необходимость применения анткоррозийных покрытий и регулярных инспекций.

В 2018 году на промышленной площадке в Западной Сибири в условиях температурных колебаний и кислой среды произошло повреждение вала насоса из нержавеющей стали. Микротрещины привели к отказу подшипников и разрушению вала, что увеличило расходы на ремонт и замену деталей. Этот случай продемонстрировал важность диагностики коррозии с помощью ультразвука и контроля трещиностойкости материалов в опасных условиях.

В 2020 году в Казахстане на нефтяной скважине из-за сульфидной коррозии в условиях высокого содержания сероводорода возникли трещины и разрушение компонентов насоса из нержавеющей стали, снизилась эффективность добычи и увеличились издержки на обслуживание. Аналитические данные сбоя работы оборудования подчеркнули необходимость применения материалов, стойких к сульфидной коррозии, и применение систем мониторинга состояния оборудования.

Эти случаи подчёркивают важность использования анткоррозийных покрытий, долговечных материалов и систем контроля для защиты центробежных насосов в агрессивных средах, предотвращения износа и повышения надёжности эксплуатации.

Для защиты центробежных насосов от коррозии и износа в различных средах рассматривают при конструировании, согласно техническим показателям и уровня нагрузки, следующие материалы (табл. 4).

Таблица 4

Рекомендации выбора материала изготовления с учетом сред
технической эксплуатации

Средне агрессивные среды	Аустенитные нержавеющие стали (12Ч18Н10Т, 316L)
Высокие требования к коррозии и прочности	Высоколегированные стали (06ХН28МДТ)
Наиболее агрессивные среды (высокое давление, температура)	Никелевые сплавы (Inconel IN-718, Monel 400)
Общее применение (вода, неагрессивные химикаты)	Нержавеющие стали AISI 304, 316. Аустенитная сталь 316L устойчива к кислотам. Ферритные и дуктильные стали.
Специфические среды	
Inconel (Ni-Cr-Fe)	- агрессивные и высокотемпературные среды
Monel (Ni-Cu)	- морская вода и кислоты
Фосфорная и алюминиевая бронза	- морская вода (рабочие колеса, направляющие аппараты)
Химическая промышленность (кислоты)	Hastelloy, Inconel
Вода с кислородом	Нержавеющие стали с катодной защитой
Комбинированные методы	Полимерные покрытия на корпусах и рабочих колесах из алюминиевой бронзы для морской воды.

Исследования показали, что рабочие колеса центробежных насосов нуждаются в защитных покрытиях повышенных показателей для устойчивости к абразивному износу и коррозии, поэтому разработанные стандарты производства насосных агрегатов, дают возможность упростить показатели надежности и унифицировать требования к оборудованию.

Ключевые преимущества таких покрытий включают: 1) защиту от прямого контакта с абразивными веществами, что способствует увеличению срока службы рабочего колеса; 2) улучшение эффективности работы насоса и поддержание его производительности на протяжении более длительного времени; 3) снижение эксплуатационных затрат благодаря уменьшению расходов на замену изношенного рабочего колеса.

После анализа методов повышения износостойкости рабочих колес на базе данных экспериментальных и аналитических расчетов [11 – 16] по работе оборудования непосредственно в технологических цепочках промышленных предприятий мы останавливаемся на методе защиты, заключающемся в нанесении с помощью напыления на поверхность графитового покрытия. Практическое использование метода позволительно производить тремя наиболее практическими и апробированными приемами: плазменное, вакуумное напыление или нанесение покрытия из газовой фазы.

Проведя всесторонний анализ можно прийти к выводу, что повышение устойчивости к износу и коррозии появляется с возможностью внедрения новых специализированных технологий по обработке поверхностей изделия [20 – 42], а также введение в состав дополнительных компонентов (новые марки рабочих колес). Оптимизация и проведение идентификационных работ при обслуживании технического оборудования площадок нефте- и машиностроительных производственных комплексов на остаточные нагрузки и повреждения в ходе работы позволяет своевременно вводить дублирующие защитные мероприятия (табл. 5), способствующие продлению эксплуатационных промежутков работы насосного оборудования, соответственно, снижая капиталовложения.

Таблица 5
Сравнительное описание методов защиты

Метод	Описание приема защиты	Преимущества	Применение и ограничения
Антикоррозионные покрытия	Нанесение специализированных слоёв (краски, эмали, полимерные пленки) на поверхность металла для защиты от воздействия окружающей среды	Высокая эффективность, экономичность, широкий спектр материалов	Требует регулярного обновления, чувствительны к механическим повреждениям
Катодная защита	Электрохимический метод, при котором на металлическую конструкцию подается отрицательный потенциал для предотвращения анодной коррозии	Очень хорошая защита крупных подземных и наземных конструкций	Высокая стоимость установки, требует квалифицированного обслуживания

Продолжение таблицы 5

Метод	Описание приема защиты	Преимущества	Применение и ограничения
Использование коррозионно-стойких материалов	Применение нержавеющей стали, алюминиевых сплавов и композитов в узлах с низкой коррозионной стойкостью	Увеличение срока службы без частого обслуживания	Более высокая цена материалов, ограничения в прочности и технологичности
Управление микроклиматом и условиями эксплуатации	Контроль температуры, влажности, удаление конденсата и пыли, оптимизация режима работы	Снижает скорость коррозии, продлевая ресурс покрытий и металла	Требует систем контроля и регулярного мониторинга
Обработка поверхности (приготовление перед покрытием)	Механическая очистка (шлифование, пескоструйка), химическая обработка перед нанесением покрытия для улучшения адгезии и удаления ржавчины	Повышает эффективность защитных покрытий	Необходима квалифицированная подготовка и оборудование
Использование ингибиторов коррозии	Добавление веществ (органические или неорганические соединения) для замедления процессов электролитической коррозии на поверхности металла	Удобно для временной защиты и обработки труднодоступных мест	Действие ограничено по времени, требует повторного введения
Регулярный мониторинг и диагностика	Использование методов неразрушающего контроля (ультразвук, акустическая эмиссия, магнитопорошковая инспекция) для раннего обнаружения коррозии	Позволяет выявлять очаги коррозии до появления аварий	Требует специализированного оборудования и квалифицированного персонала

Тематический анализ проведенных исследований по гидротранспортным системам на нефтеперерабатывающих заводах показывает, что эффективность применения центробежных насосов секционного типа полностью соответствует их техническим характеристикам, а линейка насосов ЦНС является наилучшим вариантом для транспортировки нефтепродуктов по трубопроводам.

Мощность, потребляемая насосом, является ключевым параметром, который чутко реагирует на изменение его технического состояния. Развитие коррозионных повреждений проточной части приводит к увеличению гидравлических потерь, что, в свою очередь, требует большей мощности для поддержания номинальных параметров.

Полезная (гидравлическая) мощность насоса (N_n) – это мощность, непосредственно передаваемая перекачиваемой жидкости для обеспечения заданных данных расхода и напора:

$$N_{\text{п}} = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{1000}, \quad (1)$$

где $N_{\text{п}}$ – полезная мощность, (кВт); ρ – плотность перекачиваемой жидкости, ($\text{кг}/\text{м}^3$) (для воды $\approx 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$); g – ускорение свободного падения, ($\text{м}/\text{с}^2$) $\approx 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; Q – подача (расход) насоса, ($\text{м}^3/\text{с}$); H – полный напор, развиваемый насосом, (м).

Для насоса ЦН160/112:

$$Q_{\text{ном}} = 160 \text{ м}^3/\text{час} \approx 0.0444 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$H_{\text{ном}} = 112 \text{ м}; \rho_{\text{воды}} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Пример расчета номинальной полезной мощности:

$$N_n = 1000 \times 9,81 \times \frac{160}{3600} \times \frac{112}{1000} \approx 48,9 \text{ кВт.}$$

Снижение фактического напора H из-за коррозии лопаток (снижение способности передавать энергию жидкости) при сохранении требуемой подачи Q приведет к падению полезной мощности N_n . Это свидетельствует о ухудшении гидравлических характеристик насоса.

Подводимая к валу насоса мощность (N_e) от двигателя, всегда по значением больше полезной мощности на величину потерь внутри самого насоса (гидравлических, объемных и механических), а потребляемая электродвигателем из сети электрическая мощность ($N_{эл}$), больше мощности на валу на величину потерь в самом электродвигателе (КПД двигателя).

Математический инструмент для определения данных показателей:

$$\begin{cases} N_e = \frac{N_n}{\eta_n} \\ N_{эл} = \frac{N_e}{\eta_{дв}} \end{cases} \quad (2)$$

где η_n — полный коэффициент полезного действия (КПД) насоса;

$\eta_{дв}$ — коэффициент полезного действия (КПД) электродвигателя.

Для насоса ЦН160/112 номинальный КПД (η_n) обычно находится в диапазоне 0,65 – 0,78 (или 65%-78%). Возьмем для примера $\eta_n = 0,72$.

Пример расчета номинальной мощности на валу:

$$N_{\text{в}} = \frac{48,9}{0,72} \approx 67,9 \text{ кВт.}$$

Коррозия увеличивает шероховатость внутренних поверхностей, нарушает геометрию проточных каналов, увеличивает зазоры. Это приводит к росту гидравлических и объемных потерь, что выражается в снижении КПД насоса (η_n). Следовательно, для достижения той же полезной мощности (N_n) требуется большая мощность на валу (N_e). Мониторинг роста N_e при постоянных Q и H является косвенным признаком прогрессирования коррозии и износа.

Для погружного электродвигателя, соответствующего насосу ЦН160/112, КПД ($\eta_{\text{эл}}$) обычно высок и составляет около 0,90 – 0,94.

Пример расчета номинальной электрической мощности:

$$N_{\text{эл}} = \frac{67,9}{0,92} \approx 73,8 \text{ кВт.}$$

Рост электрической мощности при неизменных условиях работы системы — интегральный показатель ухудшения состояния насосного агрегата в целом, вызванного, в том числе и коррозией.

Удельный показатель мощности — это мощность, отнесенная к единице подачи и напора:

$$k = \frac{N_{\text{эл}}}{Q \times H}, \quad (3)$$

где k — удельный показатель мощности, [кВт / (м³/ч × м)] (или в других согласованных единицах); $N_{\text{эл}}$ — электрическая мощность, (кВт); Q — подача, (м³/ч); H — напор, (м).

Пример вычислений для нового насоса:

$$k = \frac{73,8}{160 \times 112} \approx 0,00412 \text{ кВт/(м}^3/\text{ч} \times \text{м}).$$

По мере коррозионного износа значение коэффициента k будет увеличиваться, так как для создания того же напора H и подачи Q насос будет потреб-

лять больше электрической мощности ($N_{эл}$). Этот показатель удобен для сравнительного анализа состояния насоса во времени.

Представленные расчетные формулы позволяют количественно оценить влияние коррозионных повреждений проточной части погружного центробежного насоса ЦН160/112 на его энергетические характеристики.

Мониторинг этих параметров в процессе эксплуатации позволяет не только диагностировать развитие коррозии, но и оценить экономический ущерб, связанный с повышенным энергопотреблением.

Заключение

Модернизированное развитие в настоящее время предприятий машино- и нефтегазового производства обязывает прорабатывать и разрабатывать параллельно страхующие приемы защиты технологического оборудования данных отраслей. Так как в современных обстоятельствах применение технических объектов (погружных насосов) приемлемо при эксплуатации для обширного числа промышленных предприятий, то с учетом повышенных требований к безотказности работы данного технического оборудования необходимо разрабатывать [11 – 15, 25 – 42] дублирующие механизмы защиты оборудования.

Выход из строя механизмов центробежных насосов порой тянет за собой цепочкой нарушения последующих узлов технологического оборудования с остановкой на ремонтные работы и с последующими материальными затратами. Внедрение современных систем мониторинга для обследования машино-строительных предприятий с последующей программной обработкой данных и внедрением дублирующих систем защиты позволяет предотвратить сбои в производственной деятельности.

Список литературы

1. Алехин В.Ю. Расчет катодной защиты газонефтепровода / В.Ю. Алехин, А.А. Абдулахунов, И.М. Винокурова // сб. науч. тр. Гидравлические машины и системы транспортировки нефти и газа /АО «Научно-

исследовательский институт лопастных машин»; Издательско-полиграфический центр «Научная книга», Вып. 11. Воронеж. 2022. С. 130 – 139.

2. Алексин В.Ю. Расчет протекторной защиты нефтегазопровода / В.Ю. Алексин, А.А. Абдулахунов, И.М. Винокурова // сб. науч. тр.: Гидравлические машины и системы транспортировки нефти и газа. Воронеж, 2022. С. 150 – 159.

3. Иванова Д.Э. Коррозия сварных швов нефтегазового оборудования / Д.Э. Иванова, В.В. Коротов, И.М. Винокурова // межвуз. сб. науч. тр.: Химия, новые материалы, химические технологии. Воронеж, 2015. С. 22 – 29.

4. Жиленко В.А. Изучение кислородной и водородной деполяризации при анодной обработке металлов / В.А. Жиленко, А.Н. Сальков, И.М. Винокурова // межвуз. сб. науч. тр.: Химия, новые материалы, химические технологии. Воронеж, 2016. С. 56 – 61.

5. Бородина В.С. Перспективы обеспечения качественного поверхностного слоя при электрохимической обработке металлов для авиастроения / В.С. Бородина, И.М. Винокурова, Е.В. Смоленцев // сбор. науч. труд. Молодежной науч.-техн. конф. 2023, посвященной 120-летию со дня рождения С.А. Косберга: Технологии и техника: пути инновационного развития. Воронеж, 2024. С. 247 – 251.

6. Абрамова О.В., Шишгин И.И. Наноструктурированные покрытия для защиты от коррозии: современное состояние и перспективы // Успехи химии. 2022. Т. 91, № 5. С. 547 – 567.

7. Бородина В.С. Анализ альтернативных производственных методов обработки металлических изделий авиастроительного комплекса / В.С. Бородина, И.М. Винокурова, Е.В. Смоленцев // сбор. науч. ст. 2-й Междунар. науч.-техн. конфер.: Технологии и техника: пути инновационного развития. Воронеж, 2024. С. 99-106.

8. Жаркова Е.А., Семенов К.Н. Применение графена и его производных в полимерных композиционных материалах для защиты металлов // Пластические массы. 2023. № 1-2. С. 45-51.

9. Жиленко В.А. Моделирование высокоскоростного анодного растворения металлов, склонных к пассивации / В.А. Жиленко, Л.Н. Попов, И.М. Винокурова // сб. труд. XVII Междунар. науч.-технич. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов: Авиакосмические технологии (АКТ-2016). Воронеж. 2016. С. 80-82.
10. Казакова С.А. Влияние импульсного тока на физико-химические свойства формообразования поверхности титановых и алюминиевых сплавов при ЭХО / С.А. Казакова, П.В. Бежин, И.М. Винокурова // межвуз. сб. науч. труд.: Химия, новые материалы, химические технологии. Воронеж, 2014. С. 61-64.
11. Лапунина Т.В. Оптимизация технологических мероприятий при обслуживании оборудования нефтегазовой отрасли / Т.В. Лапунина, И.М. Винокурова // межвуз. сб. науч. тр.: Химия, новые материалы, химические технологии. Воронеж, 2016. С. 20-25.
12. Бородина В.С. Оценка эколого-химического состояния объектов авиакосмической промышленности по обеспечению безопасной работы / В.С. Бородина, И.М. Винокурова, А.А. Сидоренко, Л.Б. Сафонова // сб. науч. тр. Междунар. науч. технич. конф.: Технологии и техника: пути инновационного развития. Воронеж, 2023. С. 116-121.
13. Тычинина А.А. Систематизация основных требований для безопасности промышленных предприятий авиакосмического комплекса / А.А. Тычинина, Е.Е. Хлоповских, И.М. Винокурова // сб. тр.: XXII Междунар. науч.-технич. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Авиакосмические технологии (АКТ-2021). Воронеж, 2021. С. 123 -124.
14. Каракев Д.А. Изучение возможностей улучшения свойств материалов для авиакосмических агрегатов и оборудования / Д.А. Каракев, И.М. Винокурова // сб. тр.: XXII Междунар. науч.-технич. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Авиакосмические технологии (АКТ-2020). Воронеж, 2020. С. 92-94.

15. Саломатин В.В. Расчет параметров применения катодной защиты от внешнего источника тока / В.В. Саломатин, Р.Ю. Лихобабин, И.М. Винокурова // сб. науч. тр.: Гидравлические машины и системы транспортировки нефти и газа: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт лопастных машин»; Издательско-полиграфический центр «Научная книга», Воронеж. 2021. С.114-123.
16. Саломатин В.В. Антикоррозионные материалы для защиты нефти и газотрубопроводов от коррозии / В.В. Саломатин, Р.Ю. Лихобабин, И.М. Винокурова // сб. науч. тр. XVIII международная научно-практическая конференция. «Гражданская оборона и природно-технические системы. Воронеж, 2022. С. 432-436.
17. Карпова Е.И., Лобанов М.Н. Нанотехнологии в создании материалов для экстремальных условий эксплуатации // Перспективные материалы. 2023. № 4. С. 22-33.
18. Милютин А.М. Методы предотвращения аварий на магистралях нефтегазопроводов / А.М. Милютин, Ю.С. Наумова, И.М. Винокурова // сб. науч. тр. Гидравлические машины и системы транспортировки нефти и газа / АО «Научно-исследовательский институт лопастных машин»; Издательско-полиграфический центр «Научная книга», Вып. 11. - Воронеж. 2022. С. 140-149.
19. Милютин А.М. Перспективы модернизации газоперекачивающих агрегатов / А.М. Милютин, Ю.С. Наумова, И.М. Винокурова // сб. науч. тр. Гидравлические машины и системы транспортировки нефти и газа / АО «Научно-исследовательский институт лопастных машин»; Издательско-полиграфический центр «Научная книга», Вып. 11. Воронеж. 2022. С. 209-221.
20. Горожанкина О.В. К вопросу об особенностях структуры покрытия железа повышенной толщины, полученных электрогальваническим методом с механическим послойным упрочнением / О.В. Горожанкина, И.М. Винокурова, А.М. Кадырметов // Воронежский научно-технический Вестник. 2021. Т. 1. № 1 (35). С. 18-24.

21. Vinokurova I., Khlopovskikh E., Tychinina A., Safonova L. Mathematical modeling of anodic oxidation and cathodic reduction of metals prone to passivation, taking into account the peculiarities of heat and mass transfer in the ieg under pulsed modes. Key Engineering Materials. 2022. Т. 910 КЕМ. С. 529-537.
22. Винокурова И.М. Коррозия и защита оборудования от коррозии: учеб. пособ. / И.М. Винокурова. Воронеж, ФГБОУ ВО “Воронежский государственный технический университет”. 2016. Ч. 2. 225 с.
23. Шалимов Ю.Н., Винокурова И.М. Восстановление деталей машин в условиях импульсного электролиза / Ю.Н. Шалимов, И.М. Винокурова, Е.Н. Островская, Ю.В. Литвинов, М.А. Лесных // В сборнике: Современная электротехнология в промышленности центра России: Труды VII региональной научно-технической конференции. 2004. -Тула: ТулГУ. С. 90-95.
24. Винокурова И.М., Спиридовон Б.А. Исследование коррозионно-электрохимического поведения родированного титана в кислой среде / И.М. Винокурова, Б.А. Спиридовон // межвуз. сбор. науч. тр.: Системы жизнеобеспечения и управления в чрезвычайных ситуациях. ГОУВПО "Воронежский гос. технический ун-т". Междунар. акад. наук экологии безопасности человека и природы. Ч. 1. Воронеж, 2008. С. 162-165.
25. Дворядкина Д.Ю. Развитие нефтегазовой отрасли Крыма в связи с новыми технологическими возможностями /Д.Ю. Дворядкина, Т.В. Лапунина, И.М. Винокурова // межвуз. сб. науч. тр.: Химия, новые материалы, химические технологии. Воронеж, 2016. С. 146-154.
26. Дворядкина Д.Ю. Присадки для топлива и октановое число / Д.Ю. Дворядкина, Т.В. Лапунина, И.М. Винокурова // межвуз. сбор. науч. тр.: Химия, новые материалы, химические технологии. Воронеж, 2016. С. 136-140.
27. Иванова Д.Э. Коррозия сварных швов нефтегазового оборудования / Д.Э. Иванова, В.В. Коротов, И.М. Винокурова // межвуз. сб. науч. тр.: Химия, новые материалы, химические технологии. Воронеж, 2015. С. 22-29.
28. Винокурова, И. М. Коррозионно-электрохимическое поведение титана, сплава ВТ3-1 и родированного титана / И.М. Винокурова, Б. А. Спиридовон

// Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 4, № 5. 2008. С. 53-55.

29. Жиленко В.А. Изучение кислородной и водородной деполяризации при анодной обработке металлов / В.А. Жиленко, А.Н. Сальков, И.М. Винокурова // межвуз. сб. науч. тр.: Химия, новые материалы, химические технологии. Воронеж, 2016. С. 56-61.

30. Винокурова И.М. Синтез программных оптимизационных моделей планирования работы производственных машиностроительных площадок / И.М. Винокурова, А.А. Сидоренко, Н.А. Хонькин, В.М. Куликов // сб. науч. стат. 3-й Междунар. науч.-технич. конф. молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров: Технологии, машины и оборудование для проектирования, строительства объектов АПК. Курск, 2025. С. 105-111.

31. Винокурова И.М. Совершенствование моделей формирования задач рационального мониторинга мероприятий по исследованию негативного воздействия на окружающую среду объектов авиа- и машиностроительного комплекса / И.М. Винокурова, Л.Б. Сафонова, Н.А. Хонькин, В.М. Куликов // сбор. науч. стат. 3-й Всерос. науч.-технич. конф. молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров: Современные перспективы развития гибких производственных систем в промышленном гражданском строительстве и агропромышленном комплексе. Курск, 2025. С. 158-164.

32. Четверикова Д.А. Всестороннее исследование деградационных коррозионных процессов на орбитальных космических станциях / Д.А. Четверикова, И.М. Винокурова, Д.В. Титова // сб. науч. стат. 3-й Междунар. науч.-технич. конф.: Технологии и техника: пути инновационного развития. Воронеж, 2025. С. 289-295.

33. Титова Д.В. Анализ коррозионных процессов металлоконструкций ядерных энергетических и котловых установок / Д.В. Титова, И.М. Винокурова // Студент и наука. 2025. № 3 (34). С. 108-113.

34. Четверикова Д.А. Особенности коррозии и защиты оборудования в нефтегазовой промышленности / Д.А. Четверикова, Д.В. Титова, Н.А. Хонькин,

О.А. Соколова, И.М. Винокурова // сбор. науч. стат. 3-й Междунар. научно-технич. конф.: Современное перспективное развитие науки, техники и технологий (09 октября 2025 года) / (отв. ред. Смоленцев Е.В.); Воронежский государственный технический университет. Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2025. С. 453-459.

35. Винокурова И.М. Оценка риска возможности аварий в промышленности при эксплуатации опасных производственных объектов / И.М. Винокурова, Е.Н. Кудинова // Мат. 2-й междунар. науч.-практ. конф. Обеспечение экологической безопасности в чрезвычайных ситуациях. Воронеж. 2006. Ч. 2. С. 102-105.

36. Штатнов М.Н., Орлов А.А. Электрохимические аспекты защиты металлов нанопокрытиями // Электрохимия. 2020. Т. 56, № 9. С. 1023-1035.

37. Жиленко В.А. Взаимосвязь процессов кислородной и водородной деполяризации при анодной обработке металлов / В.А. Жиленко, И.М. Винокурова // межвуз. сб. науч. тр.: Химия, новые материалы, химические технологии. Воронеж, 2015. С. 54-59.

38. Иванова Д.Э. Защита трубопровода от гидравлического удара / Д.Э. Иванова, В.В. Коротов, И.М. Винокурова // межвуз. сб. науч. тр.: Химия, новые материалы, химические технологии. Воронеж, 2016. С. 128-135.

39. Плисеина Е.А. Разработка методических основ экологогеологического мониторинга / Е.А. Плисеина, Л.Б. Сафонова, И.М. Винокурова // сб. науч. тр. XVI Междунар. науч.-практич. конф.: Комплексные проблемы техносферной безопасности. Кампания "Мой город готовится": задачи, проблемы, перспективы. 2020. С. 188-190.

40. Яковleva D.M. Предотвращение внештатных аварийных ситуаций на нефтегазовых предприятиях / D.M. Яковleva, I.M. Винокурова, C.N. Букша // Химия, физика и механика материалов. 2023. № 3 (38). С. 113-129.

41. Наумова Ю.С. Разработка мер обеспечения устойчивой работы потенциально опасных объектов при использовании высокоточного оружия в современных конфликтах геополитического характера / Ю.С. Наумова, А.М. Милю-

тин, И.М. Винокурова // сб. ст. матер. XIX Междунар. науч.-практич. конф.: Гражданская оборона и природно-технические системы. Воронеж, 2023. С. 40-43.

42. Ермилов А.В. Выбор электролита при электрохимическом формообразовании / А.В. Ермилов, И.М. Винокурова // В книге XVI Всерос. науч.-технич. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов: Авиакосмические технологии (АКТ-2015). 2015. С. 30-32.

References

1. Alyokhin V.Yu. Calculation of cathodic protection of a gas and oil pipeline / V.Yu. Alyokhin, A.A. Abdulakhunov, I.M. Vinokurova // Collection of scientific Tr. Hydraulic machines and oil and gas transportation systems /JSC "Scientific Research Institute of Paddle Machines"; Publishing and Printing Center "Scientific Book", Issue 11. Voronezh. 2022. pp. 130-139. (in Russian)
2. Alyokhin V.Yu. Calculation of the tread protection of the oil and gas pipeline / V.Yu. Alyokhin, A.A. Abdulakhunov, I.M. Vinokurova // collection of scientific tr.: Hydraulic machines and oil and gas transportation systems. Voronezh, 2022. pp. 150-159. (in Russian)
3. Ivanova D.E. Corrosion of welds of oil and gas equipment / D.E. Ivanova, V.V. Korotov, I.M. Vinokurova // Interuniversity scientific research: Chemistry, new materials, chemical technologies. Voronezh, 2015. pp. 22-29. (in Russian)
4. Zhilenko V.A. Study of oxygen and hydrogen depolarization in metal anodic treatment / V.A. Zhilenko, A.N. Salkov, I.M. Vinokurova // Interuniversity collection of Scientific tr.: Chemistry, new materials, chemical technologies. Voronezh, 2016. pp. 56-61. (in Russian)
5. Borodina V.S., Vinokurova I.M., Smolentsev E.V. Prospects of providing a high-quality surface layer in electrochemical metal processing for aircraft construction. Youth Scientific and Technical Center Conference 2023, dedicated to the 120th anniversary of S.A. Kosberg's birth: Technologies and techniques: ways of innovative development. Voronezh, 2024. pp. 247-251. (in Russian)

6. Abramova O.V., Shishkin I.I. Nanostructured coatings for corrosion protection: current state and prospects // *Uspekhi khimii.* 2022. Vol. 91, No. 5. pp. 547-567. (in Russian)
7. Borodina V.S. Analysis of alternative production methods for processing metal products of the aircraft manufacturing complex / V.S. Borodina, I.M. Vinokurova, E.V. Smolentsev // Collection of scientific articles of the 2nd International Scientific and Technical Conference: Technologies and technology: ways of innovative development. Voronezh, 2024. pp. 99-106. (in Russian)
8. Zharkova E.A., Semenov K.N. The use of graphene and its derivatives in polymer composite materials for metal protection // *Plastic masses.* 2023. No. 1-2. pp. 45-51. (in Russian)
9. Zhilenko V.A. Modeling of high-speed anodic dissolution of metals prone to passivation / V.A. Zhilenko, L.N. Popov, I.M. Vinokurova // Collection of works. XVII International Scientific and Technical Conference and schools of young scientists, postgraduates and students: Aerospace Technologies (ACT-2016). Voronezh. 2016. pp. 80-82. (in Russian)
10. Kazakova S.A. Influence of pulsed current on the physico-chemical properties of surface shaping of titanium and aluminum alloys during ECHO / S.A. Kazakova, P.V. Bezhin, I.M. Vinokurova // Interuniversity collection of scientific work: Chemistry, new materials, chemical technologies. Voronezh, 2014. pp. 61-64. (in Russian)
11. Lapunina T.V. Optimization of technological measures in the maintenance of equipment in the oil and gas industry / T.V. Lapunina, I.M. Vinokurova // Interuniversity scientific research: Chemistry, new materials, chemical technologies. Voronezh, 2016. pp. 20-25. (in Russian)
12. Borodina V.S. Assessment of the ecological and chemical state of aerospace industry facilities to ensure safe operation / V.S. Borodina, I.M. Vinokurova, A.A. Sidorenko, L.B. Safonova // Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Conference: Technologies and techniques: ways of innovative development. Voronezh, 2023. pp. 116-121. (in Russian)

13. Tychinina A.A. Systematization of basic safety requirements for industrial enterprises of the aerospace complex / A.A. Tychinina, E.E. Khlopovskikh, I.M. Vinokurova // Collection of tr.: XXII International Scientific and Technical Conference and schools of young scientists, graduate students and students. Aerospace Technologies (ACT-2021). Voronezh, 2021. pp. 123-124. (in Russian)
14. Karachev D.A. Study of the possibilities of improving the properties of materials for aerospace units and equipment / D.A. Karachev, I.M. Vinokurova // Collection of tr.: XXII International Scientific and Technical Conference and schools of young scientists, graduate students and students. Aerospace Technologies (ACT 2020). Voronezh, 2020. pp. 92-94. (in Russian)
15. Salomatin V.V. Calculation of parameters for the application of cathodic protection from an external current source / V.V. Salomatin, R.Yu. Likhobabin, I.M. Vinokurova // Collection of scientific tr.: Hydraulic machines and oil and gas transportation systems: Joint Stock Company "Scientific Research Institute of paddle Machines"; Publishing and Printing Center "Scientific the book", Voronezh. 2021. P. 114-123. (in Russian)
16. Salomatin V.V. Anticorrosive materials for protecting oil and gas pipelines from corrosion / V.V. Salomatin, R.Yu. Likhobabin, I.M. Vinokurova // Collection of scientific papers of the XVIII International scientific and practical conference. "Civil defense and natural-technical systems. Voronezh, 2022. pp. 432-436. (in Russian)
17. Karpova E.I., Lobanov M.N. Nanotechnology in the creation of materials for extreme operating conditions // Promising materials. 2023. No. 4. pp. 22-33. (in Russian)
18. Milyutin A.M., Naumova Yu.S. Methods of preventing accidents on oil and gas pipelines / Yu.S. Naumova, A.M. Milyutin, I.M. Vinokurova // Collection of nau. tr. Hydraulic machines and oil and gas transportation systems / JSC "Scientific Research Institute of Paddle Machines"; Publishing and Printing Center "Scientific Book", Issue 11. - Voronezh. 2022. pp. 140-149. (in Russian)
19. Milyutin A.M. Prospects of modernization of gas pumping units / A.M. Milyutin, Yu.S. Naumova, I.M. Vinokurova // Collection of nau. tr. Hydraulic ma-

chines and oil and gas transportation systems / JSC "Scientific Research Institute of Paddle Machines"; Publishing and Printing Center "Scientific Book", Issue 11. - Voronezh. 2022. C. 209-221. (in Russian)

20. Gorozhankina O.V. On the issue of the features of the structure of the coating of high-thickness iron obtained by the electrogalvanic method with mechanical layer-by-layer hardening / O.V. Gorozhankina, I.M. Vinokurova, A.M. Kadyrmetov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2021. Vol. 1. No. 1 (35). pp. 18-24. (in Russian)

21. Vinokurova I., Khlopovskikh E., Tychinina A., Safonova L. Mathematical modeling of anodic oxidation and cathodic reduction of metals prone to passivation, taking into account the peculiarities of heat and mass transfer in the ieg under pulsed modes. Key Engineering Materials. 2022. Vol. 910 KEM. pp. 529-537. (in Russian)

22. Vinokurova I.M. Corrosion and protection of equipment from corrosion: textbook. manual / I.M. Vinokurova. Voronezh, Voronezh State Technical University. 2016. Part 2. 225 p. (in Russian)

23. Shalimov Yu.N., Vinokurova I.M. Restoration of machine parts under conditions of pulsed electrolysis / Yu.N. Shalimov, I.M. Vinokurova, E.N. Ostrovskaya, Yu.V. Litvinov, M.A. Lesnykh // In the collection: Modern electrical technology in the industry of the center of Russia: Proceedings of the VII Regional Scientific and Technical Conference. 2004. Tula: TulSU. pp. 90-95. (in Russian)

24. Vinokurova I.M., Spiridonov B.A. Investigation of the corrosion-electrochemical behavior of rhodated titanium in an acidic environment / I.M. Vinokurova, B.A. Spiridonov // mezhvuz. collection of scientific materials: Life support and management systems in emergency situations. Voronezh State Technical University. International Academy of Sciences of Ecology, Safety of Man and Nature. Part 1. Voronezh, 2008. pp. 162-165. (in Russian)

25. Dvoryadkina D.Y. Development of the Crimean oil and gas industry in connection with new technological opportunities /D.Y. Dvoryadkina, T.V. Lapunina, I.M. Vinokurova // Interuniversity scientific research: Chemistry, new materials, chemical technologies. Voronezh, 2016. pp. 146-154. (in Russian)

26. Dvoryadkina D.Y. Fuel additives and octane rating / D.Y. Dvoryadkina, T.V. Lapunina, I.M. Vinokurova // mezhvuz. collection of scientific papers: Chemistry, new materials, chemical technologies. Voronezh, 2016. pp. 136-140. (in Russian)
27. Ivanova D.E. Corrosion of welds of oil and gas equipment / D.E. Ivanova, V.V. Korotov, I.M. Vinokurova // Interuniversity collection of scientific tr.: Chemistry, new materials, chemical technologies. Voronezh, 2015. pp. 22-29. (in Russian)
28. Vinokurova, I. M. Corrosion-electrochemical behavior of titanium, VT3-1 alloy and rhodated titanium / I.M. Vinokurova, B. A. Spiridonov// Bulletin of the Voronezh State Technical University. vol. 4, No. 5. 2008. pp. 53-55. (in Russian)
29. Zhilenko V.A. The study of oxygen and hydrogen depolarization in metal anodic treatment / V.A. Zhilenko, A.N. Salkov, I.M. Vinokurova // Interuniversity collection of scientific tr.: Chemistry, new materials, chemical technologies. Voronezh, 2016. pp. 56-61. (in Russian)
30. Vinokurova I.M. Synthesis of software optimization models for planning the work of production engineering sites / I.M. Vinokurova, A.A. Sidorenko, N.A. Honkin, V.M. Kulikov // collection of scientific papers. stat. 3rd International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, postgraduates, Masters and Bachelors: Technologies, machines and equipment for the design and construction of agricultural facilities. Kursk, 2025. pp. 105-111. (in Russian)
31. Vinokurova I.M., Safonova L.B., Honkin N.A., Kulikov V.M. Improving models for the formation of tasks of rational monitoring of measures to study the negative environmental impact of aircraft and machine-building facilities // collection. nauch. stat. 3rd All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates, Masters and Bachelors: Current prospects for the development of flexible production systems in industrial civil engineering and the agro-industrial complex. Kursk, 2025. pp. 158-164. (in Russian)
32. Chetverikova D.A. Comprehensive study of degradation corrosion processes on orbital space stations / D.A. Chetverikova, I.M. Vinokurova, D.V. Titova // Collection of scientific papers. stat. 3rd International Scientific and Technical Con-

ference: Technologies and Techniques: ways of innovative development. Voronezh, 2025. pp. 289-295. (in Russian)

33. Titova D.V. Analysis of corrosion processes in metal structures of nuclear power plants and boilers /D.V. Titova, I.M. Vinokurova // Student and science. 2025. No. 3 (34). pp. 108-113. (in Russian)

34. Chetverikova D.A. Features of corrosion and protection of equipment in the oil and gas industry / D.A. Chetverikova, D.V. Titova, N.A. Honkin, O.A. Sokolova, I.M. Vinokurova // collection. scientific. stat. 3rd International Scientific and Technical Conference: Modern perspective development of Science, Technology and Technologies (October 09, 2025) / (ed. Smolentsev E.V.); Voronezh State Technical University. Kursk: Publishing house of CJSC "University Book", 2025. pp. 453-459. (in Russian)

35. Vinokurova I.M. Assessment of the risk of accidents in industry during the operation of hazardous production facilities / I.M. Vinokurova, E.N. Kudinova // Mat. 2nd International Scientific and practical Conference. Ensuring environmental safety in emergency situations. Voronezh. 2006. Part 2. pp. 102-105. (in Russian)

36. Shtatnov M.N., Orlov A.A. Electrochemical aspects of metal protection by nanocoating // Electrochemistry. – 2020. – Vol. 56, No. 9. – pp. 1023-1035.

37. Zhilenko V.A. Interrelation of oxygen and hydrogen depolarization processes in metal anodic treatment / V.A. Zhilenko, I.M. Vinokurova // Interuniversity scientific research: Chemistry, new materials, chemical technologies. Voronezh, 2015. pp. 54-59. (in Russian)

38. Ivanova D.E. Protection of the pipeline from hydraulic shock / D.E. Ivanova, V.V. Korotov, I.M. Vinokurova // Interuniversity collection of scientific tr.: Chemistry, new materials, chemical technologies. Voronezh, 2016. pp. 128-135.

39. Pliseina E.A. Development of methodological foundations of ecological and geological monitoring / E.A. Pliseina, L.B. Safonova, I.M. Vinokurova // Collection of scientific papers of the XVI International Scientific and Practical Conference: Complex problems of technosphere safety. The campaign "My city is getting ready": tasks, problems, prospects. 2020. pp. 188-190. (in Russian)

40. Yakovleva D.M. Prevention of emergency situations at oil and gas enterprises / D.M. Yakovleva, I.M. Vinokurova, S.N. Buksha // Chemistry, physics and mechanics of materials. 2023. No. 3 (38). pp. 113-129. (in Russian)
41. Naumova Yu.S. Development of measures to ensure the stable operation of potentially dangerous facilities when using high-precision weapons in modern conflicts of a geopolitical nature / Yu.S. Naumova, A.M. Milyutin, I.M. Vinokurova // collection of art. mater. XIX International Scientific and Practical Conference: Civil Defense and Natural and technical systems. Voronezh, 2023. pp. 40-43. (in Russian)
42. Ermilov A.V. The choice of electrolyte in electrochemical shaping / A.V. Ermilov, I.M. Vinokurova // In the book of the XVI All-Russian Scientific and Technical Conference and schools of young Scientists, postgraduates and students: Aerospace Technologies (ACT-2015). 2015. pp. 30-32. (in Russian)

Винокурова Ирина Михайловна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Хонькин Никита Андреевич – студент 3-го курса, группа бКТО-231, факультет Машиностроения и аэрокосмической техники Воронежского государственного технического университета

Титова Дарья Викторовна – студент 2-го курса, группа бНГД-232, факультет Машиностроения и аэрокосмической техники Воронежского государственного технического университета

УДК 543.054

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

Н.С. Ботова¹, Фам Тхи Гам^{1,2}, А.Н. Зяблов¹

¹ *ФГБОУ «Воронежский государственный университет», Воронеж
Российская Федерация, 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1*

² *Ханойский университет бизнеса и технологий, Вьетнам
Вьетнам, 11600, г. Ханой, Хай Ба Чунг, 124 Винь Туй*

**Адрес для переписки: Зяблов Александр Николаевич, e-mail: alex-n-z@yandex.ru*

В данной работе получены молекулярно-импринтированные полимеры на основе со-полимера диангидрида 1,2,4,5-бензолтетракарбоновой кислоты и 4,4'-диаминодифенилоксида в N,N-диметилформамиде (ДМФА). В качестве шаблона использовали цефазолин натрия. Морфология поверхности полимерных пленок была исследована с помощью сканирующей силовой микроскопии (ССМ). Термическую обработку проводили в два этапа: сначала при 80°C, затем при 120°C. После полимеризации пленки охлаждали до комнатной температуры и погружали в дистиллированную воду на 24 часа для удаления шаблона. В процессе синтеза ПМО-антибиотика изменяется структура полимера, что подтверждает изменение количества пор на поверхности: уменьшение микропор и увеличение мезо- и макропор. Проведенные исследования ССМ-изображений пленок молекулярно-импринтированных полимеров выявили отсутствие глобул на их поверхности, что свидетельствует о практически полном удалении в процессе экстракции молекул-шаблонов.

Ключевые слова: цефазолин натрия, полимиид, полимер с молекулярным отпечатком (ПМО), сканирующая силовая микроскопия (ССМ).

MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF POLYMER FILMS

N.S. Botova¹, Pham Thi Gam^{1,2}, A.N. Zyablov¹

¹ Voronezh State University, Voronezh

Universitetskaya sq., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation

² Hanoi University of Business and Technology, Vietnam

124 Vinh Tuy, Hai Ba Trung, Ha Noi, 11600, Vietnam

*Corresponding author: Zyablov Alexander Nikolaevich, E-mail: alex-n-z@yandex.ru

In this work, molecular imprinted polymers based on a copolymer of 1,2,4,5-benzenetetracarboxylic acid dianhydride and 4,4'-diaminodiphenyl oxide in N,N-dimethylformamide (DMFA) were obtained. Cefazolin sodium was used as a template. The surface morphology of the polymer films was studied using scanning force microscopy (SFM). The heat treatment was carried out in two stages: first at 80°C, then at 120°C. After polymerization, the films were cooled to room temperature and immersed in distilled water for 24 hours to remove the template. During the synthesis of the PMO antibiotic, the structure of the polymer changes, which is confirmed by a change in the number of pores on the surface: a decrease in micropores and an increase in meso- and macropores. Studies of SFM images of films of molecular imprinted polymers revealed the absence of globules on their surface, which indicates the almost complete removal of template molecules during extraction.

Keywords: cefazolin sodium, polyimide, molecularly imprinted polymer (MIP), scanning force microscopy (SFM).

Введение

Антибиотики представляют собой один из важнейших классов фармацевтических препаратов, обладающих способностью подавлять рост или уничтожать патогенные микроорганизмы. Их открытие и широкое внедрение в медицинскую практику в XX веке совершило революцию в борьбе с инфекционными заболеваниями, значительно снизив смертность и повысив качество жизни человечества. Сейчас антибиотики используются для лечения бактериальных инфекций у людей и животных, а также в качестве симуляторов роста в сельском хозяйстве.

Однако масштабное и зачастую неконтролируемое применение антибиотиков привело к возникновению глобальных проблем, таких как накопление их остаточного содержания в продуктах питания и окружающей среде, а также стремительное развитие антимикробной резистентности [1]. В связи с этим точный и своевременный анализ антибиотиков становится критически важной задачей. Это необходимо для контроля качества и безопасности лекарственных средств и пищевых продуктов (молока, мяса, меда), мониторинга их содержания в природных и сточных водах, проведения фармакокинетических исследований, а также для оценки степени загрязнения окружающей среды, которое способствует селекции устойчивых штаммов бактерий.

Традиционные методы определения антибиотиков, включая хроматографию и масс-спектрометрию, отличаются высокой точностью и чувствительностью, но зачастую требуют дорогостоящего оборудования, сложной пробоподготовки, длительного времени анализа, а также проведения анализа только в стационарной лаборатории [2, 3]. В качестве перспективной альтернативы в последние десятилетия активно развиваются экспресс-методы анализа, имеющие высокую доступность, чувствительность и избирательность. Сенсоры позволяют проводить экспрессный, селективный, часто неразрушающий анализ непосредственно в точке отбора проб. Для проведения экспресс-анализа все чаще используют амперометрические сенсоры на основе молекулярно-импринтированных полимеров (МИП). Их применение открывает новые возможности для создания портативных систем для скрининга, непрерывного мониторинга и децентрализованного контроля содержания антибиотиков в различных средах [4 – 6]. В связи с этим целью работы был анализ поверхности МИП на основе полиимида с отпечатками антибиотика.

Экспериментальная часть

В работе были получены молекулярно-импринтированные полимеры на основе сополимера диангидрида 1,2,4,5-бензолтетракарбоновой кислоты и 4,4'-диаминодифенилоксида в N,N-диметилформамиде (ДМФА), произведенного

ОАО МИПП НПО «Пластик», г. Москва [7, 8]. В качестве шаблона использовали цефазолин натрия. Для этого готовили полимеризационную смесь с водно-спиртовым раствором антибиотика; затем наносили смесь на подложку и подвергали двухступенчатой термической обработке в сушильном шкафу [9 – 11]. Затем охлаждали образец до комнатной температуры, промывали дистиллированной водой и оставляли в ней на 24 часа для удаления шаблона из полимерной пленки. После этого образец сушили при 50°C в течение 60 минут. Неимпринтированные полимеры (полимеры сравнения) были получены аналогично, но без использования шаблона [9 – 11].

Для анализа морфологии поверхности полученных полимеров использовали сканирующий силовой микроскоп (ССМ) «Solver P47 PRO», произведенный ЗАО «Нанотехнология-МДТ». Сканирование образцов выполняли в полуконтактном режиме зондом NSG03 длиной 150±10 мкм и жесткостью 1.74 Н/м. Обрабатывали результаты с помощью программы Фемто Скан-001 [12].

Результаты и их обсуждение

Морфологию поверхности полимерных пленок исследовали методом сканирующей силовой микроскопии (ССМ). Основное преимущество ССМ метода заключается в получении изображения поверхности с нанометровым пространственным разрешением как для проводящих, так и для непроводящих материалов.

ССМ-изображения поверхностей пленок полимеров показаны на рисунке 1. По полученным изображениям видно, что пленка неимпринтированного полимера обладает хорошей воспроизводимостью толщины и равномерной поверхностью с перепадом высот от 0,7 до 3,6 нм (рис. 1 а).

Сравнение количества пор (%) в полимерных пленках представлено на рисунке 2 и в таблице.

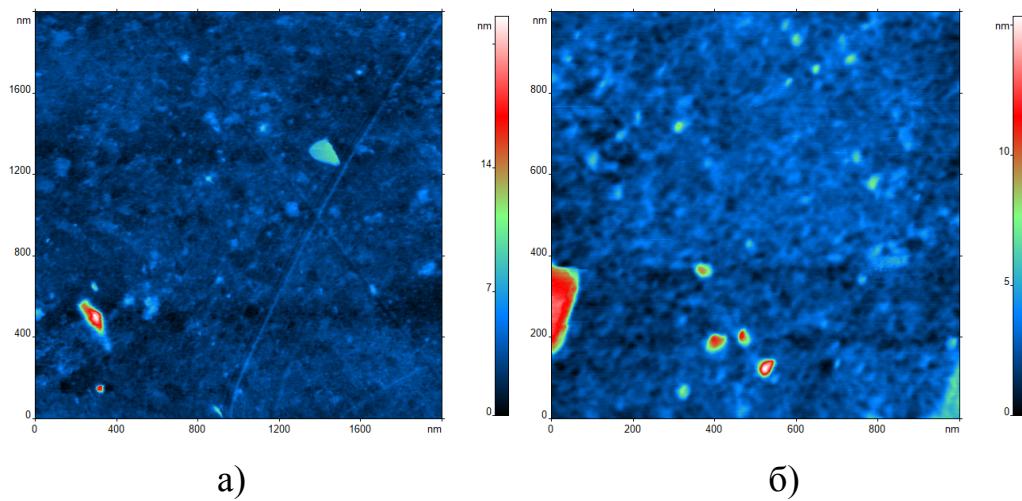


Рис. 1. ССМ-изображения поверхностей пьезосенсоров, модифицированных неимпринтированным полимером (а) и полимером с молекулярным отпечатком цефазолина натрия (б)

Таблица

Распределение пор в полимерных пленках

Классификация порт, нм		НП	МИП-Цефазолин
		n, %	n, %
ультра-	< 1	0	0
микро-	1-10	81,07	72,09
мезо-	10-25	16,57	22,29
макро-	25-150	2,37	5,62

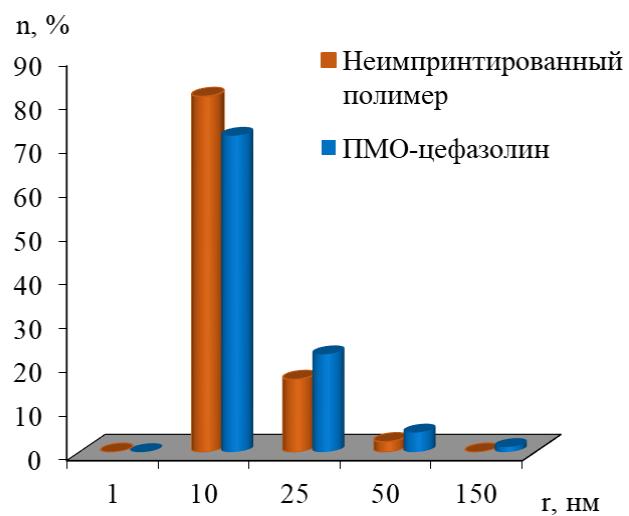


Рис. 2. Сравнение количества пор (%) в полимерных пленках

По результатам эксперимента видно, что синтез ПМО-антибиотика приводит к изменению количества пор полимера. Пленка неимпринтированного полиимида имеет 81,07 % микропор, в то время как в ПМО-цефазолин количество микропор снижается до 72,09 %, и увеличивается количество мезо- и макропор с 16,57 % до 22,29 % и с 2,37 % до 5,62 % соответственно. Это происходит из-за перестройки структуры полимера ПМО-цефазолин в процессе синтеза.

При удалении шаблона из МИП полимеров остается много пустот, поэтому их поверхность становится более пористой, чем у полиимида, на основе которого они получены. В результате количество микропор уменьшается, а количество мезо- и макропор ПМО-цефазолина увеличивается [13 – 15].

Заключение

Для анализа морфологии поверхностей полимерных пленок на основе полиимида был использован метод сканирующей силовой микроскопии. Сравнение ССМ-изображений пленок полимеров с молекулярными отпечатками и неимпринтированных полимеров показало различия в структуре поверхности. Проведенные исследования выявили отсутствие глобул на поверхности пленок молекулярно-импринтированных полимеров, что свидетельствует о практически полном удалении в процессе экстракции молекул-шаблонов. После экстракции остается высокоразвитая пористая поверхность полимеров с молекулярными отпечатками.

Эксперименты проводились с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета.

Список литературы

1. Yeginbergenova, D. M. Antibiotic resistance – the problem of modernity / D. M. Yeginbergenova, L. N. Manzhuova // International Journal of Antimicrobial Agents. – 2021. – Vol. 58, № Suppl. 1.

2. Ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry performance evaluation for analysis of antibiotics in natural waters / F. Tamtam, F. Mercier, J. Eurin [et al.] // Analytical and Bioanalytical Chemistry. – 2009. – Vol. 393, № 6. – P. 1709-1718.
3. Rapid and ultra-trace levels analysis of 33 antibiotics in water by on-line solid-phase extraction with ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry / F. Shen, Ya. Ju. Xu, Ye. Wang [et al.] // Journal of Chromatography A. – 2022. – Vol. 1677.
4. Past and Present of Electrochemical Sensors and Methods for Amphenicol Antibiotic Analysis / I. G. David, M. Buleandra, D. E. Popa [et al.] // Micromachines. – 2022. – Vol. 13, № 5.
5. Electrochemical and optical (bio)sensors for analysis of antibiotic residuals / E. Dezhakam, M. Tavakkol, T. Kafili [et al.] // Food Chemistry. – 2024. – Vol. 439. – P. 138145.
6. Graphene-based electrochemical sensors for antibiotic detection in water, food and soil: A scientometric analysis in CiteSpace (2011–2021) / Li. Fu, Sh. Mao, F. Chen [et al.] // Chemosphere. – 2022. – Vol. 297.
7. Бессонов М.И. Полиимида – новый класс термостойких полимеров. Ленинград: Наука. 1983. 328 с.
8. Као Ньят Линь, Дуванова О.В., Никитина С.Ю., Зяблов А.Н. Применение пьезосенсоров для определения карбоновых кислот в промежуточных продуктах производства пищевого этанола // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. №4. С. 11-16.
9. Меренкова А.А., Жужукин К.В., Зяблов А.Н., Бельчинская Л.И. Определение формальдегида в производственных растворах пьезоэлектрическими сенсорами // Аналитика и контроль. 2021. Т. 25. № 2. С. 140-145.
10. Као Ньят Линь, Дуванова О.В., Зяблов А.Н., Нгуен Ань Тьен. Применение пьезосенсоров на основе молекуларноимпринтированного полиимида для определения кофеина в чае // Химия растительного сырья. 2021. № 2. С. 173-180.

11. By Хоант Иен, Зяблов А.Н. Определение сорбата калия и бензоата натрия в безалкогольных напитках пьезосенсорами на основе молекулярноимпринтированных полимеров // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. № 10. С. 14-20.
12. Scanning Probe Microscopy Image Processing Software «FemtoScan Online». M. Advanced Technologies Center. spm@nanoscopy.org
13. Abdollah N.A., Ahmad A., Omar T.F.T. Synthesis and Characterization of Molecular Imprinted Polymer for the Determination of Carbonate Ion // Biointerface Research in Applied Chemistry. 2021. Vol. 11. № 3. pp. 10620-10627.
14. Majdi M., Mizani F., Mohammad-khah A. Quantitative Monitoring of Cefotaxim Ions by a New Potentiometric Sensor Based on Molecularly Imprinted Polymer // Anal. Bioanal. Electrochem. 2022. Vol. 14. № 1. pp. 100-115.
15. Qronfla M.M., Jamoussi B., Chakroun R., Al-Mur B.A., Halawani R.F., Aloufi F.A. Synthesis of a New Molecularly Imprinted Polymer and Optimisation of Phenylglyoxylic Acid Extraction from Human Urine Samples Using a Central Composite Design within the Response Surface Methodology // Polymers. 2023. Vol. 15. № 15. pp. 1-24.

Reference

1. Yeginbergenova, D. M. Antibiotic resistance – the problem of modernity / D. M. Yeginbergenova, L. N. Manzhuova // International Journal of Antimicrobial Agents. – 2021. – Vol. 58, № Suppl. 1.
2. Ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry performance evaluation for analysis of antibiotics in natural waters / F. Tamtam, F. Mercier, J. Eurin [et al.] // Analytical and Bioanalytical Chemistry. – 2009. – Vol. 393, № 6. – P. 1709-1718.
3. Rapid and ultra-trace levels analysis of 33 antibiotics in water by on-line solid-phase extraction with ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry / F. Shen, Ya. Ju. Xu, Ye. Wang [et al.] // Journal of Chromatography A. – 2022. – Vol. 1677.

4. Past and Present of Electrochemical Sensors and Methods for Amphenicol Antibiotic Analysis / I. G. David, M. Buleandra, D. E. Popa [et al.] // *Micromachines.* – 2022. – Vol. 13, № 5.
5. Electrochemical and optical (bio)sensors for analysis of antibiotic residuals / E. Dezhakam, M. Tavakkol, T. Kafili [et al.] // *Food Chemistry.* – 2024. – Vol. 439. – P. 138145.
6. Graphene-based electrochemical sensors for antibiotic detection in water, food and soil: A scientometric analysis in CiteSpace (2011–2021) / Li. Fu, Sh. Mao, F. Chen [et al.] // *Chemosphere.* – 2022. – Vol. 297.
7. Bessonov M.I. Polyimides – a new class of heat-resistant polymers. □ Leningrad : Nauka, 1983. 328 p.
8. Cao Nhat Linh, Duvanova O.V., Nikitina S.Yu., Zyablov A.N. The use of piezosensors for determination of carboxylic acids in the intermediate products of edible ethanol production // *Industrial laboratory. Diagnostics of materials.* 2019. Vol. 85. № 4. pp. 11-16.
9. Merenkova A.A., Zhuzhukin K.V., Zyablov A.N., Belchinskaya L.I. Determination of formaldehyde in production solutions using the piezoelectric sensors // *Analitics and control.* 2021. Vol. 25. № 2. pp. 140-145.
10. Cao Nyat Linh, Duvanova O.V., Zyablov A.N., Nguyen Anh Tien. Application of piezosensors based on molecularly imprinted polyimide for the determination of caffeine in tea // *Chemistry of plant raw materials.* 2021. № 2. pp. 173-180.
11. Vu Hoang Yen, Zyablov A.N. Determination of potassium sorbate and sodium benzoate in soft drinks using piezosensors based on molecularly imprinted polymers // *News of universities. Chemistry and chemical technology.* 2022. Vol.65. № 10. pp. 14-20.
12. Scanning Probe Microscopy Image Processing Software «FemtoScan Online». M. Advanced Technologies Center. spm@nanoscopy.org
13. Abdollah N.A., Ahmad A., Omar T.F.T. Synthesis and Characterization of Molecular Imprinted Polymer for the Determination of Carbonate Ion // *Biointerface Research in Applied Chemistry.* 2021. Vol. 11. № 3. pp. 10620-10627.

14. Majdi M., Mizani F., Mohammad-khah A. Quantitative Monitoring of Cefotaxim Ions by a New Potentiometric Sensor Based on Molecularly Imprinted Polymer // Anal. Bioanal. Electrochem. 2022. Vol. 14. № 1. pp. 100-115.
15. Qronfla M.M., Jamoussi B., Chakroun R., Al-Mur B.A., Halawani R.F., Aloufi F.A. Synthesis of a New Molecularly Imprinted Polymer and Optimisation of Phenylglyoxylic Acid Extraction from Human Urine Samples Using a Central Composite Design within the Response Surface Methodology // Polymers. 2023. Vol. 15. № 15. pp. 1-24.

Ботова Нелли Сергеевна – студент кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета

Фам Тхи Гам – аспирант кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета, преподаватель фармацевтического факультета, Ханойский университет бизнеса и технологий

Зяблов Александр Николаевич – д-р хим. наук, профессор кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МИКРОПЛАСТИКОВ (ЧАСТЬ 1)

O.B. Рудаков¹, A.A. Лукин^{2,3}, A.L. Вебер⁴

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

²*Южно-Уральский государственный аграрный университет, Россия, 454080,
г. Челябинск, проспект Ленина, 75*

³*Южно-Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет), Россия, 454080, Челябинск,
проспект Ленина, 76*

⁴*Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина,
Россия, 644008, г. Омск, Институтская пл., д. 1.*

**Адрес для переписки: Лукин Александр Анатольевич, e-mail: lukin3415@gmail.com*

Микропластик представляет собой серьезную проблему окружающей среды, загрязняя воду и почву, вызывая негативные последствия для здоровья живых организмов. Основной источник загрязнения включает бытовые отходы, косметику, продукцию из полимеров и очищающих средств, промышленные сточные воды и распад больших пластмасовых изделий вследствие механических повреждений и воздействия ультрафиолета. Наиболее распространённые компоненты МП включают полиэтилен, полипропилен, полистирол, полиэтилентерефталат, поливинилхлорид.

Традиционные методы анализа, такие как спектроскопические и хроматографические, обладают высокими пределами обнаружения, но они дороги, трудоемки и зависят от квалифицированного персонала. Электрохимические методы предлагают альтернативу благодаря своей доступности, надежности и способности проводить мониторинг прямо на местах отбора проб. Их использование возможно даже в небольших и недорогих переносных устройствах, обеспечивая быстрый и точный анализ качества воды в реальном времени.

Данная статья посвящена различным электрохимическим методам идентификации микропластика в водной среде, включая резистивные датчики импульсов, импедансную спектроскопию и одиночные микрочастичные электроды. Приведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков каждого метода, подчеркивая важность разработки дешёвых, эффективных и удобных инструментов для быстрого анализа содержания микропластика в окружающей среде. Эти методы способны обеспечить эффективные решения для борьбы с глобальным загрязнением микропластиком, предлагая технологии мониторинга и контроля, необходимые для устойчивого управления ресурсами и защиты экологии.

Ключевые слова: электрохимические методы, идентификация, микропластик, сенсоры, чувствительность, селективность, импедансная спектроскопия

ELECTROCHEMICAL METHODS OF MICROPLASTIC IDENTIFICATION (PART 1)

O.B. Rudakov¹, A.A. Lukin^{2,3}, A.L. Weber⁴

¹*Voronezh State Technical University, Russia, 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya St., 84*

²*South Ural State Agrarian University, Russia, 454080, Chelyabinsk, Lenin Ave., 75*

³*South Ural State University (National Research University), Russia, 454080, Chelyabinsk, Lenin Ave., 76*

⁴*Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Russia, 644008, Omsk, Institutskaya Pl., Bldg. 1*

**Corresponding author: Lukin Aleksander Anatolyevich, e-mail: lukin3415@gmail.com*

Microplastics pose a serious environmental problem, contaminating water and soil and causing adverse health effects on living organisms. The main sources of contamination include household waste, cosmetics, polymer and cleaning products, industrial wastewater, and the degradation of large plastic items due to mechanical damage and ultraviolet exposure. The most common components of microplastics include polyethylene, polypropylene, polystyrene, polyethylene terephthalate, and polyvinyl chloride.

Traditional analytical methods, such as spectroscopic and chromatographic, have high detection limits, but are expensive, labor-intensive, and rely on qualified personnel. Electrochemical methods offer an alternative due to their availability, reliability, and ability to conduct monitoring directly at the sampling site. They can even be used in small, inexpensive, portable devices, providing rapid and accurate water quality analysis in real time. This article examines various electro-

chemical methods for identifying microplastics in aquatic environments, including resistive pulse sensors, impedance spectroscopy, and single microparticle electrodes. A comparative analysis of the advantages and disadvantages of each method is provided, highlighting the importance of developing affordable, effective, and convenient tools for rapid analysis of microplastic content in the environment. These methods have the potential to provide effective solutions for combating global microplastic pollution, offering monitoring and control technologies necessary for sustainable resource management and environmental protection.

Keywords: electrochemical methods, identification, microplastics, sensors, sensitivity, selectivity, impedance spectroscopy.

Введение

Перенос микропластика (МП) на значительные расстояния происходит благодаря природным явлениям, таким как ветры и океанские потоки, что приводит к его обнаружению в самых разных количествах в прибрежных зонах и водных экосистемах по всему миру. Основными источниками загрязнения МП являются сточные воды, поступающие из домохозяйств, микрочастицы полимеров, входящие в состав косметических и чистящих средств, первичное сырье для производства пластиковой продукции, а также пластиковые гранулы и порошки, используемые в абразивной очистке.

Кроме того, значительный объем МП попадает в окружающую среду из-за постепенного распада крупных пластиковых предметов под воздействием природных факторов, таких как механическое разрушение и ультрафиолетовое излучение. Это ведет к увеличению потребления пластикового мусора различными живыми организмами и возникновению новых экологических проблем.

Очистные сооружения также являются важным источником попадания МП в окружающую среду. Хотя крупные частицы пластика эффективно удаляются в процессе очистки сточных вод, микропластик часто проходит через фильтры и попадает в водоемы. Важно отметить, что многие водоочистные станции располагаются вблизи морей и океанов, что значительно увеличивает вероятность попадания МП в морские экосистемы. Например, в континентальной части Китая примерно 1873 очистных сооружения (56 % из

3340), расположены в прибрежных зонах, откуда их сточные воды могут напрямую или косвенно попадать в водные экосистемы [1 – 5].

Существуют многочисленные исследования, посвященные изучению поведения, распространения, обнаружения и удаления микропластика на очистных сооружениях. Микрогранулы (размером менее 1 мм), используемые в составе чистящих средств, косметики и бытового мыла, являются дополнительным источником загрязнения МП. Основными компонентами этих частиц являются полиэтилен (PE), полипропилен (PP), полистирол (PS), полиэтилентерефталат (PET), поливинилхлорид (PVC) и полиэфиры, которые в конечном итоге попадают в океан.

Теоретический анализ

Для выявления МП в комплексных матрицах широко используются спектроскопические техники, отличающиеся исключительной чувствительностью. Эти методы демонстрируют высокую адаптивность, когда требуется одновременное определение концентраций различных МП. Дополнительным преимуществом является крайне низкий предел обнаружения, достигающий фемтомолярного диапазона. Однако стоит отметить, что необходимость многократного отбора проб, потребность в сложных аналитических протоколах, а также обязательное наличие высококвалифицированных специалистов для работы с комплексным оборудованием – все это существенные недостатки, делающие эти спектроскопические подходы довольно дорогостоящими [6].

Более того, данные методы зачастую требуют интеграции с дополнительными хроматографическими техниками для полной подготовки образца и пригодны в основном для количественного анализа. Это, в свою очередь, повышает риск изменений в образце во время обработки и хранения. Важно учитывать, что оптические методы требуют высокоточных и энергоемких операций, что ограничивает их применение в полевых условиях. Необходимость использования дорогостоящего и сложного оборудования, такого как лазеры и фотодетекторы, также является ограничением. В связи с этим, актуальны исследования,

направленные на создание быстрых, экономичных, простых и надежных методов для оперативных измерений МП непосредственно на месте отбора проб [7].

В отличие от них, электрохимические методы отличаются большей доступностью, надежностью и пригодностью для полевых измерений. Эти методы характеризуются простотой процедур и идеально подходят для создания миниатюрных мобильных устройств, предназначенных для мониторинга загрязнений непосредственно на месте. Кроме того, электрохимический анализ занимает меньше времени по сравнению с традиционными спектроскопическими методами, что позволяет осуществлять мониторинг водных проб в режиме реального времени. Для улучшения эффективности обнаружения МП электрохимические методы активно совершенствуются с точки зрения конструкции. В сравнении со спектроскопическими и оптическими подходами, они показывают более низкую чувствительность и пределы обнаружения (LOD). Для модификации материалов электродов и повышения чувствительности и LOD используются различные биосенсорные электроды в сочетании с разными электрохимическими методами. В данном обзоре рассматриваются различные электрохимические методы, используемые для обнаружения МП в водных пробах, а также последние достижения в разработке различных интерфейсных материалов, которые могут быть использованы для замены электродов, применяемых в этих методах.

Доступные по цене сенсоры и электрохимические подходы представляют собой привлекательные инструменты анализа для определения МР. Химические сенсоры, как правило, конструируются путем интеграции электрохимического преобразователя с компонентами идентификации и сенсорным веществом. Когда целевая молекула взаимодействует с поверхностью сенсора из-за ковалентного или нековалентного связывания с аналитом, происходит химическое или физическое изменение. Обнаружение мишени, качественное или количественное, обеспечивается преобразованием этого связывания в понятный сигнал, который может быть измерен электрохимически. При разработке электрохимических сенсоров для субселективной и количественной оценки электрохимических параметров необходимо проявлять осторожность.

Важно уделять внимание выбору и пониманию материалов, используемых для создания сенсора, а также химическим или биологическим процессам, происходящим при контакте. Элементы распознавания, сконструированные и выбранные на поверхности электрода, определяются их аффинностью и совместимостью с целевым аналитом. Физические свойства чувствительного материала, такие как способность поглощать свет, электропроводность, диэлектрическая проницаемость и работа выхода, меняются в процессе идентификации компонентов и аналита. Эти изменения трансформируются в обнаруживаемые сигналы, например, изменения цвета, напряжения, тока, сопротивления или импеданса.

Работа выхода определяет количество термодинамической энергии, необходимой для удаления электрона с уровня Ферми материала, а диэлектрическая проницаемость указывает на легкость прохождения электромагнитного излучения через материал. Для обнаружения МР электрохимические сенсоры требуют преобразователей, интегрированных в тщательно разработанный чувствительный интерфейс. В идеале, такие сенсоры могут быть реализованы в виде портативного устройства [8].

Этим сенсорам необходимы сенсорные материалы с определенными участками связывания и способностью распознавания для селективной идентификации целевого аналита. Достижение требуемой чувствительности и селективности требует возможности создания специализированных распознающих участков. Успешный сенсор для мониторинга МР должен работать на уровне или превосходить традиционные хроматографические методы. Эти сенсоры должны быть легкими, доступными по цене и простыми в использовании. Они должны предоставлять точные данные в режиме реального времени при минимальной подготовке образцов.

Электрохимические методы идентификации МП

Электрохимическая идентификация МП основывается на различиях в его электронных характеристиках по сравнению с другими частицами в электриче-

ском поле. Анализируя характеристики реакции смешанных частиц, такие как изменения тока и импеданса, можно одновременно идентифицировать материал МП и определить его размер. В таблице 1 представлен обзор свойств трех систем образцов, используемых в электрохимических методах определения МП, которые будут рассмотрены далее.

Таблица 1
Обзор некоторых электрохимических методов, используемых
для обнаружения МП

Метод	Тип МП	Достоинства	Недостатки	Ссылка
Резистивный датчик импульсов	PS	- диапазон обнаружения высокой концентрации - простота использования - подходит для большинства МП	- ограниченный диапазон размеров - сложная процедура изготовления датчиков	[9]
Импедансная спектроскопия	PE	- простота выполнения - высокая точность - подходит для большинства МП - широкий выбор датчиков	- сравнительно низкий уровень восстановления МП - сложная обработка данных	[11]
Одиночный микрочастичный электрод	PE	- диапазон обнаружения высокой концентрации - широкий диапазон измерения концентрации	- ограниченный диапазон размеров - сложная процедура идентификации	[12]

1. **Резистивный датчик импульсов (РДИ)**, фиксируя кратковременные колебания тока, вызванные прохождением аналита через ограниченную область чувствительности, позволяют различать различные типы МП по размеру, форме, заряду и концентрации. Сообщается о создании РДИ с использованием технологий аддитивного производства. Этот метод позволяет измерять различные частицы при высоких скоростях потока (1 мл жидкости в минуту) и в широком диапазоне концентраций солей (от $2,5 \times 10^{-4}$ до 0,1 М). Размер частиц может варьироваться от 2 до 30 мкм. При прохождении калибрующих веществ, водорослей и МП через зону чувствительности наблюдаются существенные изменения тока. В образцах чая с использованием РДИ были обнаружены частицы со средним размером 21,9 мкм и концентрацией $6,52 \times 10^3$ частиц на мл. Важно отметить, что на сигнал оказывает влияние ионная сила электролита (KCl), при

этом более низкая ионная сила приводит к проводящим импульсам и обратным импульсам. Кроме того, пористость, проводимость и форма МП также влияют на характеристики сигнала [13].

2. Импедансная спектроскопия (рис. 1) в сенсорных устройствах основана на измерении изменений импеданса, возникающих при движении микрочастиц через среду. Полученные данные об импедансе используются для изучения свойств частиц.

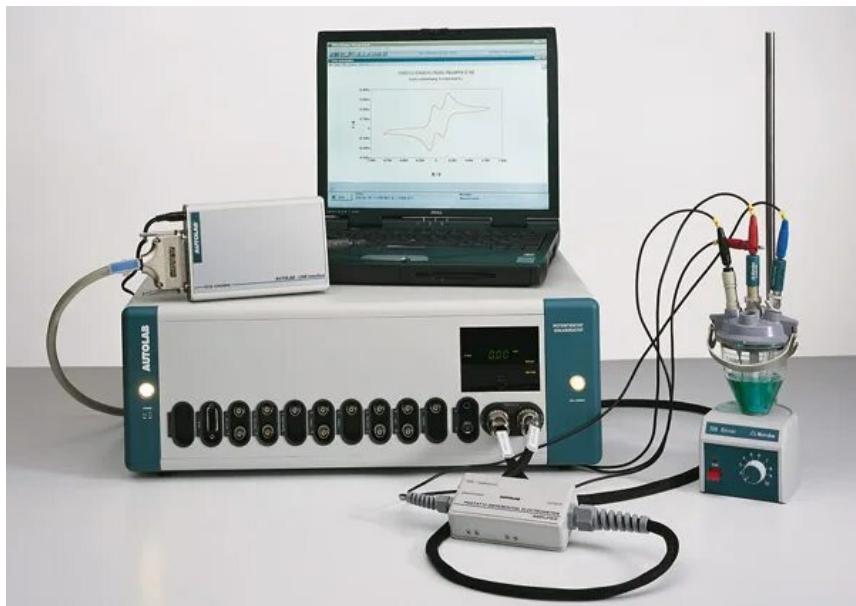


Рис. 1. Импедансный спектрометр

Смещение импеданса на высоких частотах может отражать как размер, так и внутренние электрические свойства частиц, в то время как на низких частотах оно пропорционально объему или размеру частиц. Для разделения влияния размера и типа частиц измерения проводят одновременно на низких и высоких частотах. Использование импедансной спектроскопии позволяет, к примеру, отличать РЕ размером 212 – 1000 мкм от сопоставимых по размеру помех (например, организмов и семян) в водопроводной воде (при средней скорости потока 103 ± 8 мл/мин⁻¹), анализируя изменения сопротивления на частотах 1,1 МГц и 10 кГц. Пространственное расположение частиц и соответствующие изменения импеданса позволяют дифференцировать МП, семена и живые организмы в воде. Несмотря на то что методика измерения не является абсолютно точной, она может быть использована для оценки количества частиц в пробе.

ря на то, что неправильная классификация встречается примерно в 1% случаев, микроконтроллер может сортировать МП на основе этого принципа. Установлена прямая связь между диаметром МП и кубическим корнем изменения реальной части импеданса на частоте 10 кГц, что дает возможность одновременного определения размеров и идентификации МП в воде [14].

3. Другой подход основан на использовании *одиночных микрочастичных электродов* (ОМЧЭ), когда удар электрода о биомолекулу или микро-/наночастицу вызывает изменение токовой реакции. В системе ОМЧЭ, когда электроизолирующие частицы РЕ сталкиваются с угольным электродом, возникают кратковременные скачки тока. Содержание растворенного кислорода внутри микрочастиц РЕ, пропорциональное объему частицы, коррелирует с возникающими пиками тока. Форма и частота этих пиков предоставляют информацию о количестве и размере частиц РЕ. Результаты измерений размера соответствуют данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) для частиц размером менее 2 мкм, при концентрации $0,74 \text{ г/л}^{-1}$ РЕ в 20 мМ электролите NaCl. Метод ОМЧЭ демонстрирует более высокое стандартное отклонение для крупных фракций, что может быть связано с образованием кластерных МП. Количество регистрируемых событий столкновения частиц можно использовать для точного измерения концентрации РЕ в широком диапазоне, от $3,6 \times 10^9$ до $1,4 \times 10^{11}$ частиц на литр [15]. В целом, метод ОМЧЭ выглядит перспективным для эффективного количественного определения размера и количества изолирующих МП в воде. РДИ, импедансная спектроскопия и ОМЧЭ используют различные принципы, что позволяет с высокой точностью определять электрохимическое состояние МП.

Заключение

Микропластик становится серьезной экологической проблемой, оказывая негативное воздействие на здоровье водных экосистем и живых организмов. Традиционные методы анализа, такие как спектроскопические и хроматографические, обладают ограниченными возможностями из-за высоких затрат, трудо-

затратности и зависимости от квалифицированного персонала. Электрохимические методы становятся привлекательной альтернативой благодаря своей доступности, надежности и способности проводить мониторинг прямо на местах отбора проб.

Анализ различных электрохимических методов показал, что каждый из них имеет свои преимущества и ограничения. Резистивные датчики импульсов обеспечивают широкий диапазон обнаружения и простую эксплуатацию, однако имеют ограниченный диапазон размеров частиц. Импедансная спектроскопия отличается высокой точностью и универсальностью, но требует сложной обработки данных. Одиночные микрочастичные электроды позволяют точно определять размеры и концентрацию частиц, но могут иметь проблемы с классификацией крупных фракций.

Таким образом, разработка эффективных и экономичных электрохимических методов для быстрой идентификации, и мониторинга микропластика является актуальной задачей, способствующей борьбе с глобальным загрязнением и обеспечению устойчивого развития. Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на улучшении точности, упрощении эксплуатации и снижении стоимости технологий, что позволит внедрить их в повседневную практику охраны окружающей среды.

Список литературы

1. Okoffo, E.D., Ribeiro, F., Brien, J.W.O., Brien, S.O., Tscharke B.J., Gallen, M., Samanipour, S., Mueller, J.F., Thomas, K.V. Identification and quantification of selected plastics in biosolids by pressurized liquid extraction combined with double-shot pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry // Sci. Total Environ. 2020. № 71(5). P. 136924.
2. Miller, M.E., Kroon, F.J., Motti, C.A. Recovering microplastics from marine samples: a review of current practices // Mar. Pollut. Bull. 2017. № 12(3). P. 6 –18.

3. Medrano, D., Leslie, H.A., Quinn, B. Microplastics in drinking water: A review and assessment // Current Opinion in Environmental Science and Health. 2019. № 7. P. 69–75.
4. Li, J., Liu, H., Paul Chen, J. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection // Water Res. 2018. № 137. P. 362–374.
5. Eerkes-Medrano, D., Thompson, R.C., Aldridge, D.C. Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs // Water Res. 2015. № 75. P. 63–82.
6. Collard, F., Gilbert, B., Eppe, G., Parmentier, E., Das, K. Detection of Anthropogenic Particles in Fish Stomachs: An Isolation Method Adapted to Identification by Raman Spectroscopy // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2015. № 69. P. 331–339.
7. Shimizu, K., Sokolov, S.V., Kätelhön, E., Holter, J., Young, N.P., Compton, R.G. In situ Detection of Microplastics: Single Microparticle-electrode Impacts // Electroanalysis. 2017. № 29. P. 2200–2207.
8. Schuldt, T., Gkatzelis, G.I., Wesolek, C., Rohrer, F., Winter, B., Kuhlbusch, T.A.J., Kiendler-Scharr, A., Tillmann, R. Electrochemical sensors onboard a Zeppelin NT: In-flight evaluation of low-cost trace gas measurements // Atmos. Meas. Tech. Discuss. 2022. № 20. P. 8-22.
9. Pollard, M., Hunsicker, E., Platt, M. A tunable three-dimensional printed microfluidic resistive pulse sensor for the characterization of algae and microplastics // ACS Sensors. 2020. № 5(8). P. 2578-2586.
10. Brazey, B., Cottet, J., Bolopion, A., Van Lintel, H., Renaud, P., Gauthier, M. Impedance-Based Real-Time Position Sensor for Lab-on-a-Chip Devices // Lab Chip. 2018. № 18. P. 818–831.
11. Cabernard, L., Roscher, L., Lorenz, C., Gerdts, G., Primpke, S. Comparison of Raman and Fourier Transform Infrared Spectroscopy for the Quantification of Microplastics in the Aquatic Environment // Environ. Sci. Technol. 2018. № 52. P. 13279–13288.

12. Shimizu, K., Sokolov, S.V., Kätelhön, E., Holter, J., Young, N.P., Compton, R.G. In situ Detection of Microplastics: Single Microparticle-electrode Impacts // *Electroanalysis*. 2017. № 29. P. 2200–2207.
13. Elert, A.M., Becker, R., Duemichen, E., Eisentraut, P., Falkenhagen, J., Sturm, H., Braun, U. Comparison of Different Methods for MP Detection: What Can We Learn from Them, and Why Asking the Right Question before Measurements Matters? // *Environ. Pollut.* 2017. № 231. P. 1256–1264
14. Löder, M.G.J., Kuczera, M., Mintenig, S., Lorenz, C., Gerdts, G. Focal Plane Array Detector-Based Micro-Fourier-Transform Infrared Imaging for the Analysis of Microplastics in Environmental Samples. *Environ. Chem.* 2015. № 12. P. 563–581
15. Zhang, X., et al. Rapid Monitoring Approach for Microplastics Using Portable Pyrolysis-Mass Spectrometry // *Anal. Chem.* 2020. № 92. P. 4656–4662.

References

1. Okoffo, E.D., Ribeiro, F., Brien, J.W.O., Brien, S.O., Tscharke B.J., Gallen, M., Samanipour, S., Mueller, J.F., Thomas, K.V. Identification and quantification of selected plastics in biosolids by pressurized liquid extraction combined with double-shot pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry // *Sci. Total Environ.* 2020. № 71(5). P. 136924.
2. Miller, M.E., Kroon, F.J., Motti, C.A. Recovering microplastics from marine samples: a review of current practices // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. № 12(3). P. 6–18.
3. Medrano, D., Leslie, H.A., Quinn, B. Microplastics in drinking water: A review and assessment // *Current Opinion in Environmental Science and Health.* 2019. № 7. P. 69–75.
4. Li, J., Liu, H., Paul Chen, J. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection // *Water Res.* 2018. № 137. P. 362–374.

5. Eerkes-Medrano, D., Thompson, R.C., Aldridge, D.C. Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs // Water Res. 2015. № 75. P. 63–82.
6. Collard, F., Gilbert, B., Eppe, G., Parmentier, E., Das, K. Detection of Anthropogenic Particles in Fish Stomachs: An Isolation Method Adapted to Identification by Raman Spectroscopy // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2015. № 69. P. 331–339.
7. Shimizu, K., Sokolov, S.V., Kätelhön, E., Holter, J., Young, N.P., Compton, R.G. In situ Detection of Microplastics: Single Microparticle-electrode Impacts // Electroanalysis. 2017. № 29. P. 2200–2207.
8. Schuldt, T., Gkatzelis, G.I., Wesolek, C., Rohrer, F., Winter, B., Kuhlbusch, T.A.J., Kiendler-Scharr, A., Tillmann, R. Electrochemical sensors onboard a Zeppelin NT: In-flight evaluation of low-cost trace gas measurements // Atmos. Meas. Tech. Discuss. 2022. № 20. P. 8-22.
9. Pollard, M., Hunsicker, E., Platt, M. A tunable three-dimensional printed microfluidic resistive pulse sensor for the characterization of algae and microplastics // ACS Sensors. 2020. № 5(8). P. 2578-2586.
10. Brazey, B., Cottet, J., Bolopion, A., Van Lintel, H., Renaud, P., Gauthier, M. Impedance-Based Real-Time Position Sensor for Lab-on-a-Chip Devices // Lab Chip. 2018. № 18. P. 818–831.
11. Cabernard, L., Roscher, L., Lorenz, C., Gerdts, G., Primpke, S. Comparison of Raman and Fourier Transform Infrared Spectroscopy for the Quantification of Microplastics in the Aquatic Environment // Environ. Sci. Technol. 2018. № 52. P. 13279–13288.
12. Shimizu, K., Sokolov, S.V., Kätelhön, E., Holter, J., Young, N.P., Compton, R.G. In situ Detection of Microplastics: Single Microparticle-electrode Impacts // Electroanalysis. 2017. № 29. P. 2200–2207.
13. Elert, A.M., Becker, R., Duemichen, E., Eisentraut, P., Falkenhagen, J., Sturm, H., Braun, U. Comparison of Different Methods for MP Detection: What Can We Learn from Them, and Why Asking the Right Question before Measurements Matters? // Environ. Pollut. 2017. № 231. P. 1256–1264

14. Löder, M.G.J., Kuczera, M., Mintenig, S., Lorenz, C., Gerdts, G. Focal Plane Array Detector-Based Micro-Fourier-Transform Infrared Imaging for the Analysis of Microplastics in Environmental Samples. Environ // Chem. 2015. № 12. P. 563–581
15. Zhang, X., et al. Rapid Monitoring Approach for Microplastics Using Portable Pyrolysis-Mass Spectrometry // Anal. Chem. 2020. № 92. P. 4656–4662.

Рудаков Олег Борисович – доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Лукин Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пищевые и биотехнологии, ЮУрГУ (НИУ)

Вебер Анна Леонидовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии агротехнологического факультета, Омский ГАУ

УДК 691.3

**СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

A.M. Усачев*, Е.А. Мильниченко, А.В. Телегина

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

**Адрес для переписки: Усачев Александр Михайлович, e-mail: ausachev@cchgeu.ru*

Космическое строительство представляет собой амбициозное перспективное направление, которое сейчас видится трудно реализуемым. Однако будущее формируется постепенно, и к нему необходимо идти поэтапно.

Строительные материалы на основе лунного грунта (реголита) позволяют создавать прочные, устойчивые и долговечные конструкции. Такие материалы экономически выгодны, так как позволяют существенно сократить расходы на доставку ресурсов с Земли и обеспечивают автономию будущих космических экспедиций.

Однако известные традиционные технологии получения строительных материалов, применяемые в земных условиях, не подходят для специфических условий космического пространства. Наиболее эффективными способами получения изделий из реголита являются методы расплавления исходного материала при высоких температурах за счет применения электрической дуги и энергии светового луча. При плавлении с помощью электрической дуги установка по конструкции представляющую собой печь, оборудованную графитовым днищем и графитовым электродом. Применение энергии светового луча основано на принципах сварочных технологий.

Космическое строительство, технологии плавления реголита и разработка эффективных строительных материалов являются ключевыми элементами успешного освоения космоса.

Ключевые слова: космос, лунный грунт, реголит, химический состав, технология по-

лучения, спекание, высокая температура, симиналы.

METHODS OF OBTAINING SPACE BUILDING MATERIALS

A.M. Usachev*, E.A. Milnichenko, A.V. Telegina

*Voronezh State Technical University, ul. 20-letiiia Oktiabria, 84, Voronezh,
394006, Russian Federation*

*Corresponding author: Alexander M. Usachev, E-mail: usachevam@vgasu.vrn.ru

Space construction is an ambitious and promising direction, which is now seen as difficult to implement. However, the future is being shaped gradually, and it needs to be approached in stages.

Building materials based on lunar soil (regolith) make it possible to create strong, stable and durable structures. Such materials are economically beneficial, as they significantly reduce the cost of delivering resources from Earth and ensure the autonomy of future space expeditions.

However, the well-known traditional technologies for the production of building materials used in terrestrial conditions are not suitable for the specific conditions of outer space. The most effective methods of obtaining products from regolith are methods of melting the starting material at high temperatures through the use of an electric arc and the energy of a light beam. When melting with the help of an electric arc, the installation is designed as a furnace equipped with a graphite bottom and a graphite electrode. The application of the energy of the light beam is based on the principles of welding technology.

Space construction, regolith melting technologies, and the development of efficient building materials are key elements of successful space exploration.

Key words: space, lunar soil, regolith, chemical composition, production technology, sintering, high temperature, siminals.

Введение

На фоне усиливающихся экологических проблем на нашей планете Земля человечеству приходится задумываться о переносе промышленного производства в космос. Чтобы успешно освоить космическое пространство, необходимы инновационные и эффективные строительные материалы, способные противо-

стоять экстремальным условиям, таким как воздействие вакуума и радиации, колебаниям температур, оставаясь при этом экономически выгодными.

В работе [1] нами уже показаны результаты изучения состава, структура и основных свойств лунного грунта (реголита), который является вполне приемлемым сырьем для производства космических строительных материалов.

В данной статье мы подробно рассмотрим технологические приемы изготавления строительных материалов из лунного сырья.

Экспериментальная часть

Как известно [2 – 6] ученые разделяют лунный реголит на два типа – морской и материковый. Они отличаются друг от друга топологией поверхности участков: моря, как правило, имеют более гладкий и ровный рельеф; материки, наоборот, более шероховатые и неровные.

Благодаря последним научным достижениям отечественных и зарубежных исследователей [2, 6 – 8], химический состав лунного грунта достаточно хорошо изучен. Данные о химическом составе лунного грунта различных районов спутника Земли представлены в таблице 1, где также указаны данные о составе аналогичных земных горных пород [2].

Таблица 1

Химический состав образцов лунных пород, доставленных на Землю,
в сравнении с составом земных пород

Оксиды, %	Лунные породы				Земные породы		
	«Морские» районы		«Материковые» районы		Базальт	Габбро, диабаз	Гранит
	Луна-16	Апполон-15	Луна-20	Апполон-17			
SiO ₂	42,9	45,0	44,2	48,5	47,0	45,0	72,2
TiO ₂	5,5	2,5	0,3	0,9	1,8	2,5	0,2
Al ₂ O ₃	13,9	8,9	19,1	17,2	14,5	11,8	13,4
FeO	20,2	22,2	6,9	14,4	7,4	1,8	0,6
MgO	6,1	9,1	13,4	8,9	7,7	0,2	0,6
CaO	10,8	10,3	13,3	11,6	10,0	4,5	2,2
Na ₂ O	0,2	0,3	0,5	0,4	1,6	2,0	3,0
K ₂ O	0,2	0,03	0,5	0,3	1,1	1,3	4,5

Представленная информация показывает значительное сходство между составом земных и лунных пород, что предполагает возможность применения реголита в качестве сырья для получения строительных материалов.

Лунный грунт также богат редкими металлами и содержит гелий-3, один из редких изотопов гелия. В верхних слоях лунного грунта содержится большое количество этого вещества, что обеспечит землян топливом на многие-многие десятилетия [2, 3].

Однако традиционные методы изготовления строительных материалов из земных пород оказываются неприемлемыми в условиях космоса из-за экономических ограничений, связанных с необходимостью доставки дополнительных ресурсов. Наиболее эффективными среди прочих технологических приемов способами получения изделий из лунного реголита являются методы расплавления исходного материала при высоких температурах за счет применения электрической дуги или энергии светового луча.

При плавлении с помощью электрической дуги мелкокусковой реголит загружают в установку (рис. 1), по конструкции представляющую собой печь. Печь имеет безтигельное рабочее пространство, оборудованное специальным графитовым днищем и водоохлаждаемым корпусом. В верхней части установки помещается графитовый электрод, способный передвигаться по вертикали. Поскольку твёрдый реголит не проводит электричество, вначале дугу зажигают между дном печи и электродом. После частичного расплавления реголита, ставшего проводником, дуга переходит на взаимодействие с жидкой массой. Водоохлаждение стенок способствует образованию защитного слоя, предотвращающего контакт расплава с материалом печи. В результате процесса формируются синтетические минеральные материалы, получившие название – си-миниалы [1, 7].

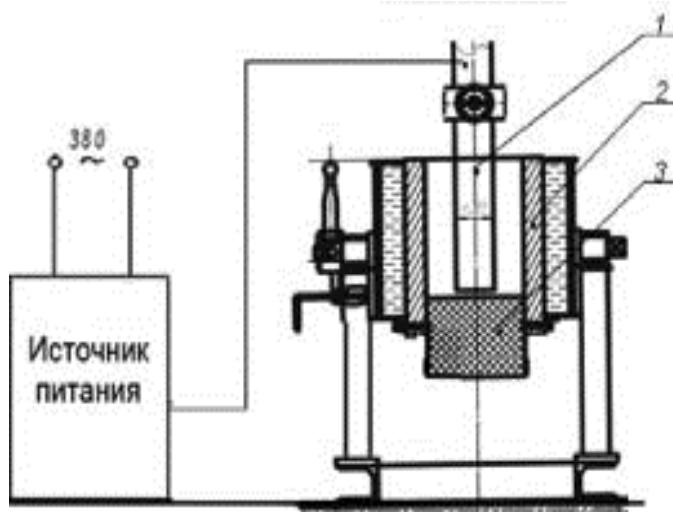


Рис. 1. Схема устройства для плавления с применением электрической дуги.

Обозначено: 1 – электрод, 2 – корпус водоохлаждаемый, 3 – графитовое днище

Применение энергии светового луча основано на принципах сварочных технологий, когда световой луч высокой мощности создается путем фокусировки излучения с помощью специализированных оптических систем, обеспечивающих необходимую интенсивность для плавления твердого реголита. Дан-ный способ перспективен, так как позволяет применять прямое солнечное излучение для технологических нужд без каких-либо дополнительных тепловых источников.

Нагрев световым лучом обладает преимуществами по сравнению с другими видами нагрева, а именно: возможностью термообработки материалов независимо от их электрических и магнитных свойств; возможностью получения высоких плотностей энергии; бесконтактным способом подвода энергии к изделию и незначительным механическим воздействием на нагреваемый объект [3, 6 – 8].

По характеристике луча различают сварку монохроматическим остронаправленным лучом (лазер) и сварку световым лучом, который состоит из электромагнитных волн разной длины.

Монохроматический луч можно сфокусировать на очень малой площади, обеспечив тем самым высокую плотность энергии в пятне нагрева и, как следствие, высокие температуры. Использование светового (полихроматического)

луча не может обеспечить столь высокую плотность из-за рассеивания электромагнитной энергии [3]. Концентрировать световую энергию можно различными способами (рис. 2). Однако еще не разработаны способы для плавления крупных объемов материала. Тем не менее, этот способ всегда может рассматриваться как метод соединения отдельных строительных изделий из симиналов.

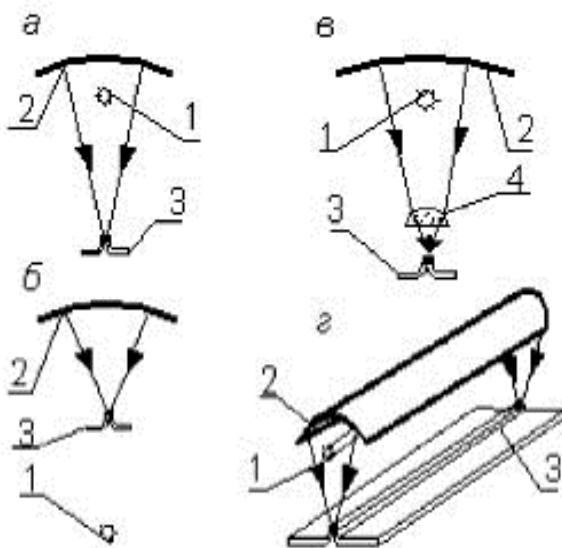


Рис. 2. Система концентрации световой энергии: *а* – длиннофокусная моноэллиптическая (точечный нагрев); *б* – короткофокусная моноэллиптическая (точечный нагрев); *в* – длиннофокусная моноэллиптическая (точечный нагрев); *г* – эллипсоцилиндрическая (полосовой нагрев).

Обозначено: 1 – источник теплоты; 2 – отражатель; 3 – плавящийся реголит; 4 – линзовый концентратор

Различные методы спекания имеют свои положительные и отрицательные стороны [1], поэтому выбор технологии определяется поставленными целями. Если приоритетом являются высокие механические показатели, целесообразно применить спекание в печи. Однако если задача сводится к экономичной сборке сложных конструкций, предпочтительнее окажется лазерное спекание.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время уже получены и применяются материалы из симиналов. Это и крупногабаритные изделия, такие как несущие фундаментные блоки,

отделочные плиты, износостойкие трубы. Также довольно широко используются облицовочная плитка, химически стойкие желоба, элементы циклонов и мультициклонов. Данные изделия обладают высокими физико-механическими свойствами и долговечностью [1, 4].

Были проведены многочисленные испытания по определению механических свойств у материалов на основе реголита. Средние значения показателей у бетонных образцов следующие: прочность на сжатие – 0,90…76,80 МПа; прочность на изгиб – 2,30…47,80 МПа; прочность на растяжение – 1…4 МПа. Показатели спеченных образцов: прочность на сжатие – 2,31…428,10 МПа; прочность на изгиб – 0,23…129,50 МПа; прочность на растяжение – 2,26…6,25 МПа. Из этих данных следует, что механические свойства спеченных образцов значительно лучше, чем у бетонных образцов, что делает их более подходящими в качестве несущих элементов [4].

Заключение

Рассматривая перспективы и проблемы использования реголита как строительного материала, стоит обратить внимание на несколько важных аспектов:

1) предсказание долговечности материалов в условиях космоса на основании имеющихся результатов с использованием теории подобия; изучение этой теории и определение ключевых факторов влияния путем предварительных тестов позволяет разработать критерии соответствия, которые помогут сравнивать результаты лабораторных экспериментов с реальными условиями;

2) для получения всесторонних характеристик реголита рекомендуется применять современные высокопроизводительные методики многофакторного анализа, в которых исследуемый материал помещается в специально созданную искусственную среду, полностью имитирующую процессы космических воздействий;

3) проведение экспериментальных исследований в реальных внеземных условиях, например, на МКС или непосредственно на Луне.

Список литературы

1. Усачев А.М., Мильниченко Е.А., Телегина А.В. Изучение состава и свойств лунного грунта для производства космических строительных материалов // Научный журнал ВГТУ. Химия, физика и механика материалов. Выпуск № 3(46), 2025. С.49-58.
2. Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М. Об освоении Луны. Планы и ближайшие перспективы // Земля и Вселенная. 2019. № 4. С. 16 – 37.
3. Виноградов А.П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-16» // Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974. С. 7 – 19.
4. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги. Модель 1974 года. М.: Издательство ВИНТИ РАН, 1975. 72 с.
5. Papike J.J., Simon S.B., Laul J.C. The lunar regolith: chemistry, mineralogy, and petrology // Rev Geophys, 20 (4) (1982), pp. 761-826.
6. Zheng W., Qiao G. Microstructure, thermophysical, and mechanical properties of bulk glass prepared from molten lunar regolith stimulant // Adv Space Res, 69 (8), (2022), pp. 3130-3139.
7. Whittington A., Parsapoor A. Lower cost lunar bricks: energetics of melting and sintering lunar regolith stimulants // New Space, 10 (2) (2022), pp. 193-204.
8. Ferguson R.E., Shafirovich E., Mantovani J.G. Combustion joining of regolith tiles for in situ fabrication of launch/landing pads on the moon and Mars // Earth and Space: Proceedings of the 16th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. American Society of Civil Engineers, 2018, Reston, pp. 281-288.

References

1. Usachev A.M., Milnichenko E.A., Telegina A.V. Studying the composition and properties of lunar soil for the production of space building materials // Scientific Journal of VSTU. Chemistry, physics and mechanics of materials. Issue No. 3(46), 2025. pp.49 – 58. (in Russian)

2. Mitrofanov I.G., Zeleny L.M. On the exploration of the Moon. Plans and immediate prospects // Earth and the Universe. 2019. No. 4. pp. 16-37. (in Russian)
3. Vinogradov A.P. Preliminary data on the lunar soil delivered by the Luna-16 automatic station // Lunar soil from the Sea of Abundance. Moscow: Nauka, 1974. pp. 7-19. (in Russian)
4. Florensky K.P., Bazilevsky A.T., Nikolaeva O.V. Lunar soil: properties and analogues. Model of 1974. Moscow: VINITI RAS Publishing House, 1975. 72 p. (in Russian)
5. Papike J.J., Simon S.B., Laul J.C. The lunar regolith: chemistry, mineralogy, and petrology // Rev Geophys, 20 (4) (1982), pp. 761-826.
6. Zheng W., Qiao G. Microstructure, thermophysical, and mechanical properties of bulk glass prepared from molten lunar regolith stimulant // Adv Space Res, 69 (8), (2022), pp. 3130-3139.
7. Whittington A., Parsapoor A. Lower cost lunar bricks: energetics of melting and sintering lunar regolith stimulants // New Space, 10 (2) (2022), pp. 193-204.
8. Ferguson R.E., Shafirovich E., Mantovani J.G. Combustion joining of regolith tiles for in situ fabrication of launch/landing pads on the moon and Mars // Earth and Space: Proceedings of the 16th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. American Society of Civil Engineers, 2018, Reston, pp. 281-288.

Усачев Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой Технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

Мильниченко Евгения Александровна – студент группы бМСО-222 факультета экономики, менеджмента и информационных технологий Воронежского государственного технического университета

Телегина Анастасия Владимировна - студент группы бМСО-222 факультета экономики, менеджмента и информационных технологий Воронежского государственного технического университета

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОБЕТОНОВ
С ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ЗАМКНУТОЙ ПОРИСТОСТЬЮ**

В.Н. Моргун¹, Л.В. Моргун², В.В. Нагорский^{2*}, Е.В. Дементьев²

¹Южный федеральный университет,

Российская Федерация, 344001, Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42

²Донской государственный технический университет,

Российская Федерация, 344003, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

**Адрес для переписки: Нагорский Виктор Владимирович, E-mail: nagorskiyv@bk.ru*

Кратко обозначены цель и эффективность применения ячеистых бетонов в строительстве. Перечислены этапы эволюции их эксплуатационных свойств и причины практических предпочтений. Отмечено влияние мировых энергетических кризисов на содержание требований, предъявляемых к свойствам изделий из ячеистых бетонов, и изменение их номенклатуры. Показано, что эксплуатационная надежность многослойных стен, включающих кладку из газобетонов D400, далека от совершенства. Кратко обозначены социально-технические причины ограниченного применения на практике изделий из фибропенобетонов. Сформулировано, что важнейшей причиной накопления влаги в слоистых стеновых конструкциях является мера замкнутости газовых пор, формирующаяся в ячеистом бетоне на этапе фазового перехода «из вязкого в упругое». Рассмотрены различия в процессах массопереноса двух- и одностадийно изготавливаемых пенобетонов, которые управляют мерой замкнутости их пористости в затвердевших материалах. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие адекватность теоретических обоснований, представленных в статье. Выполненные научные рассуждения и экспериментальные исследования доказали, что установленные в физической химии закономерности поведения ПАВ в трехфазных дисперсных системах управляют их структурой. Поэтому практическое использование установленных закономерностей может приносить пользу обществу.

Ключевые слова: газобетон, двух- и одностадийная технология пенобетона, трехфазная структура пенобетонных смесей, сорбционная влажность, капиллярное всасывание одностадийно изготавляемых пенобетонов

**TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR PRODUCING FOAM CONCRETE
WITH PREDOMINANT CLOSED POROSITY**

V.N. Morgun¹, L.V. Morgun², V.V. Nagorsky², E.V. Dementyeva²*

¹st Federal University

Russian Federation, Rostov-on-Don, 344001, B. Sadovaya St., 105/42

²Don State Technical University

Russian Federation, 344003, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1

**Corresponding author: Nagorsky Victor Vladimirovich, E-mail: nagorskiyv@bk.ru*

The purpose and effectiveness of using cellular concrete in construction are briefly described. The stages of evolution of their performance properties and the reasons for practical preferences are listed. The influence of global energy crises on the requirements for the properties of cellular concrete products and changes in their nomenclature is noted. It is shown that the operational reliability of multi-layer walls that include D400 cellular concrete masonry is far from perfect. The results of experimental studies are presented, confirming the adequacy of the theoretical justifications presented in the article. The scientific reasoning and experimental studies performed have proven that the patterns of the behavior of surfactants in three-phase dispersed systems established in physical chemistry control their structure. Therefore, the practical use of the established patterns can benefit society.

Key words: aerated concrete, two- and one-stage foam concrete technologies, three-phase structure of foam concrete mixtures, sorption moisture, capillary suction of one-stage foam concrete

Введение

Пено- и газобетоны, как материалы, предназначенные для улучшения теплоизоляционных свойств стен зданий и уменьшения нагрузок на грунты, стали применять в строительстве в XX веке [1, 2]. Целесообразность их производства и применения периодически изменялись в зависимости от наличия не-

обходного сырья, уровня знаний и развития технологий, способных обеспечивать стабильность и качество формирования в них, необходимых практике эксплуатационных свойств.

Со второй половины XX века абсолютный приоритет получили строительные изделия из автоклавного газобетона D600...700, из которых построены многоэтажные панельные здания в РФ и за рубежом [3]. Они успешно эксплуатируются и в настоящее время. К перечню важнейших причин широкого применения в строительстве этого материала относят следующие:

- распространность сырья;
- относительная простота технологии;
- возможность изготовления крупноразмерных железобетонных изделий;
- удовлетворительная эксплуатационная надежность.

Энергетические кризисы [4, 5] в сочетании с климатическими проблемами глобального потепления предопределили потребность в стеновых материалах меньшей теплопроводности по сравнению с автоклавным газобетоном D600. Массовый переход от крупноразмерных изделий к мелкоштучным блокам был обусловлен тем, что прочности на растяжение, достаточной для распалубки и транспортирования на объекты у автоклавного газосиликата марки D400 достичь не удалось. Поэтому предприятия стали изготавливать блоки [6].

Опыт применения газобетонных блоков в слоистых конструкциях зданий показал, что слоистые стены, содержащие кладку из газобетонных блоков D400, сравнительно быстро при эксплуатации зданий утрачивают свою тепло-техническую эффективность. Поэтому в проектах и на практике появились варианты стен из автоклавного газобетона с наружным утеплением [7 – 10].

В последней четверти XX века проблема малой трещиностойкости автоклавного пенобетона, применяемого для теплоизоляции подземных трубопроводов в Ленинграде, привела к изобретению одностадийной технологии пенобетонов [11]. Полученный в лаборатории кафедры «Технология строительных материалов, изделий и конструкций» материал – фибропенобетон (ФПБ) перестал требовать для обретения прочности автоклавных условий обработки [12].

Важно отметить, что предприятия по изготовлению автоклавного газобетона стablyно работают во всех регионах страны. Тот факт, что выпускаемая ими продукция не способна обеспечивать энергосбережение в течение всего срока эксплуатации жилых зданий, пока не достиг критического уровня остроты, которая жестко потребует использования на практике одностадийной технологии изготовления пенобетонных смесей.

Преимущества эксплуатационных свойств дисперсно армированных одностадийно изготавляемых пенобетонов не учитываются при проектировании потому, что стоимость изготовления кубометра фибропенобетона и автоклавного газобетона практически одинаковы. Доходность предприятий строиндустрии традиционно низкая.

Проблемы появления в помещениях плесени через некоторый период эксплуатации объектов [13], обрушения фасадных облицовок [9], размножения блох в комнатах с мокрыми стенами [7 – 9] решают не застройщики, а граждане, купившие и эксплуатирующие жилье. Перечисленные проблемы корреляционно связаны со структурой материалов, используемых для устройства стен в современных зданиях.

Экспериментальная часть

В рамках данной работы планируется выполнить экспериментальные исследования, результаты которых позволяют осуществить анализ влияния технологии изготовления пенобетонных смесей на структурные особенности газовых пор в затвердевших бетонах. Необходимость выполнения такой работы обусловлена проблемами эксплуатации многослойных стен, выражающихся в способности теплоизоляционных слоев ограждающих конструкций зданий накапливать влагу.

Экспериментальную оценку одностадийно изготовленных пенобетонных смесей теплоизоляционного назначения, твердевших в нормальных условиях, осуществляли в соответствии с требованиями ГОСТ 12852.6 – 2020 «Бетон ячеистый. Метод определения сорбционной влажности» и ГОСТ Р 56505-2015

«Материалы строительные. Методы определения показателей капиллярного всасывания воды». Расчет состава пенобетонной смеси осуществлялся по методике В.Н. Моргуна. Рецептурное соотношение между расходом цемента и заполнителей составляло 1:1.

Результаты и обсуждение

Любой газонаполненный бетон после отвердевания представляет собой каменный материал [2, 14], макроструктура которого возникла на этапах перемешивания сырья и перехода полученной смеси из вязко-пластичного состояния в упругое. Трехфазная структура получаемых смесей формируется в смесительных агрегатах. Практика показывает, что после формования пенобетонные смеси могут, как сохранять в своем объеме вовлеченный воздух [14], так и утрачивать его полностью или частично.

Эти обстоятельства позволяют рассматривать технологию изготовления пенобетонных смесей как сложную иерархически многоуровневую систему. Свойства таких систем зависят от способа изготовления.

В настоящее время пенобетоны изготавливают по следующим основным технологиям:

- двухстадийной, при которой в отдельных резервуарах приготовляют шликер (водную смесь портландцемента и дисперсного заполнителя) заданной текучести и техническую пену. Полученные полуфабрикаты осторожно смешивают с целью получения пенобетонной смеси;

- одностадийной, при которой в высокоскоростном турбулентном смесителе смешивают воду, портландцемент, заполнитель, пенообразователь и в ходе этого процесса происходит газонасыщение смеси [15].

Причиной получения структурно устойчивой пенобетонной смеси является способность поверхностно активных веществ (ПАВ), входящих в состав пенообразователей, при турбулентном перемешивании сырья перемещаться в его объеме только в направлении газовой фазы [16]. Таким образом в объем

цементно-песчаного шликера вовлекаются порции воздуха, упакованные в пенные пленки.

В физике растворов пенные пленки считают лиотропными жидкими кристаллами [17], которые состоят из молекул анионактивных ПАВ, которые своей гидрофобной частью захватили воздух, а гидрофильной способны физически прочно связывать несколько слоев воды. Такие материалы в технике называют пенами. Способность пен длительно сохранять свою форму и объем в любых дисперсных системах зависит от энергетического соответствия между количеством ПАВ, расположенных в пеновых пленках и отдельными молекулами, находящимися в дисперсионной среде [16 – 18].

Если рассматривать массоперенос ПАВ, развивающийся в пенобетонных смесях, изготавляемых двухстадийно, то важно отметить, что при смещивании шликера с пеной обязательно имеет место реструктуризация пеновых пленок, которая идет через их разрушение. Причиной отмеченного события является начальное отсутствие ПАВ в шликере. Нарушение энергетического соответствия требует перемещения части ПАВ в дисперсионную среду двухстадийно изготавляемой смеси.

Следствием обозначенного процесса, на который накладывается адсорбционная и химическая гидратация клинкерных минералов, является образование мицелл ПАВ в структуре межпоровых перегородок [16]. Мицеллы негативно влияют на структурную устойчивость пенобетонных смесей, потому что способствуют понижению вязкости дисперсионной среды.

В одностадийной технологии изготовления пенобетонных смесей учитывается фундаментальное свойство ПАВ в условиях турбулентного перемешивания перемещаться только в направлении «жидкость-воздух» [16]. На границе раздела фаз ПАВ своей гидрофобной частью сорбируют воздух, а гидрофильной - физически прочно в структуре пеновых пленок связывают свободную воду затворения. Именно этот процесс управляет величиной начальной структурной устойчивости одностадийно изготовленных смесей.

Процесс газонасыщения должен продолжаться до обретения энергетического равновесия между ПАВ в пенных пленках и межчастичной жидкости. Он позволяет исключать возникновение мицелл в дисперсионной среде смесей и, как следствие, дополнительных пор в межпоровых перегородках затвердевшего пенобетона.

Поэтому формирование структуры твердой фазы одностадийно изготовленных пенобетонов происходит в более комфортных условиях по сравнению с двухстадийно изготовленными.

Результаты экспериментальной оценки влияния технологий изготовления пенобетонных смесей на меру замкнутости газовой пористости по показателям гигроскопичности и капиллярного всасывания в равноплотных пенобетонах представлены в таблице.

Таблица

Влияние технологии изготовления пенобетонов на их гидрофизические свойства (сорбционную влажность и капиллярное всасывание)

Средняя плотность сухого пенобетона, кг/м ³	Сорбционная влажность (об.%) при относительной влажности воздуха		Коэффициент насыщения пор влагой при сорбции водяных паров	Капиллярное всасывание (объемные %), через (час) контакта с поверхностью воды		Коэффициент насыщения пор влагой
	60%	97%		1 час	24 часа	
Пенобетон изготовлен двухстадийно						
415	5,018	11,457	0,136	10,12	15,01	0,178
607	5,821	10,113	0,132	11,75	17,00	0,222
809	6,916	10,003	0,145	12,42	16,12	0,234
Пенобетон изготовлен одностадийно						
408	4,827	8,262	0,097	9,42	13,78	0,163
613	5,633	9,044	0,118	10,12	15,23	0,199
821	6,709	9,715	0,141	11,01	15,51	0,225
Фибропенобетон изготовлен одностадийно. В качестве заполнителей содержит 1% полипропиленовой фибры длиной 18 мм, диаметром 18 мкм и 99% песка фракции мельче 0,315 мм						
398	3,196	4,625	0,046	3,42	8,17	0,097
605	4,069	6,293	0,082	3,67	9,22	0,120
795	4,314	7,111	0,103	4,11	9,87	0,143

Экспериментальные данные, приведенные в таблице, отражают меру влияния технологии изготовления пенобетонных смесей на гидрофизические свойства затвердевших пенобетонов. Из полученных экспериментальных данных

следует, что пенобетоны, изготовленные двухстадийно, в связи с необходимостью перестройки структуры технической пены и за счет образования мицелл ПАВ в межпоровых перегородках на этапе фазового перехода характеризуются в затвердевших пенобетонах повышенной активностью к сорбции парообразной влаги и капиллярному всасыванию.

Причиной установленного факта является нарушение замкнутости газовых пор, сформированных пенообразователем на этапе приготовления смесей. После отвердевания двухстадийно изготовленных пенобетонных смесей мицеллы ПАВ, расположенные в объеме межпоровых перегородок, при высушивании пенобетонов постепенно утрачивают физически связанную ими воду. Таким образом, в двухстадийно изготовленном пенобетоне образуется дополнительная капиллярная пористость.

При одностадийном изготовлении пенобетонных смесей причины для образования мицелл ПАВ в межпоровых перегородках отсутствуют. Согласно экспериментальным данным (табл.), это позволяет снижать сорбционную влажность в теплоизоляционных бетонах на 40,0%, в конструкционно-теплоизоляционных не менее чем на 12,0%.

Дисперсное армирование пенобетонных смесей, возможное только при использовании одностадийной технологии их изготовления, за счет ускоренного массопереноса и формирования в межпоровых перегородках трубчатых, а не зернистых кластеров [19], позволяет получать более существенный практический эффект. Для теплоизоляционных пенобетонов он состоит в снижении сорбции парообразной влаги более чем в 2 раза (табл.). Для конструкционно-теплоизоляционных снижение сорбционной влажности составило уже 61,0% вместо 12,0%, установленных для одностадийно изготовленного пенобетона без фибры. И в конструкционном фибропенобетоне снижение склонности к сорбции парообразной влаги достигло 41,0%.

Наблюдается аналогичная закономерность к снижению капиллярного подсоса в исследованных пенобетонах (табл.) потому, что именно технология их изготовления предопределяет меру замкнутости пор в затвердевших матери-

алах. В теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных бетонах уменьшение капиллярного всасывания за счет одностадийного изготовления и введения фибры достигает практически двух раз. В пенобетонах конструкционного назначения эффект превышает 1,5 раза.

Заключение

Научно обосновано, что суть процессов массопереноса в пенобетонных смесях зависит от технологии их изготовления и управляет плотностью межпопровых перегородок в затвердевших пенобетонах. Учет физико-химических особенностей поведения анионактивных веществ в водных растворах трехфазных дисперсных систем позволил объяснить закономерности их поведения на различных этапах изготовления смесей. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили, что именно ПАВ в трехфазных дисперсных системах управляют мерой замкнутости пор в затвердевших пенобетонах.

Список литературы

1. Бикбаева К. А., Савинкова К.С. История развития газобетона // Молодой ученый. 2018. № 6 (192). С. 24 – 25. URL: <https://moluch.ru/archive/192/48309>.
2. Пинскер В.А., Вылегжанин В.П. Ячеистый бетон, как испытанный временем материал для капитального строительства // Строительные материалы. 2004. №3. С. 44 – 45.
3. Вишневский А.А., Гринфельд Г.И. Основные тенденции развития производства автоклавного газобетона в России // Современный автоклавный газобетон: сборник докладов науч.-практ. конференции. 2015. С. 8 – 13.
4. ДИРЕКТИВА №2002/91/ЕС ЕВРОПЕЙСКОГО ПАРЛАМЕТА И СОВЕТА от 16 декабря 2002 года по энергопараметрам зданий // Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings //1 OJ L 1, 4.1.2003, p. 65)

5. Алоян Р.М., Федосов С.В., Опарина Л.А. Энергоэффективные здания – состояние, проблемы и пути решения. Иваново: ПресСто, 2016. 276 с.
6. Гринфельд Г.И., Куптараева П.Д. Кладка из автоклавного газобетона с наружным утеплением. Особенности влажностного режима в начальный период эксплуатации // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8. С.41 – 51.
7. Ватин Н.И., Горшков А.С., Корниенко С.В., Пестряков И.И. Потребительские свойства стеновых изделий из автоклавного газобетона // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 1. С. 78 – 101.
8. Крутилин А.Б., Рыхленок Ю. А., Лешкевич В.В. Техофизические характеристики автоклавных ячеистых бетонов низких плотностей и их влияние на долговечность наружных стен зданий // Инженерно-строительный журнал. 2015. №2. С. 46 – 118.
9. Орлова Н.С., Улыбин А.В., Федотов С.Д. Влияние температурных воздействий на кирпичную облицовку стен // ООО «ОЗИС-Венчур». 2018. С. 160 – 184.
10. Лобанов И.А., Пухаренко Ю.В. Авторское свидетельство №863545 «Сыревая смесь для получения ячеистых бетонов». Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 14.05.1981 г.
11. Лобанов И.А., Пухаренко Ю.В., Моргун Л.В. Особенности структуры и свойства безавтоклавных ячеистых бетонов, армированных синтетическими волокнами // Бетон и железобетон. 1983. №9. С. 12 – 14.
12. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Нагорский В.В. Одностадийная технология пенобетона и её влияние на качество стеновых материалов // Инженерный вестник Дона. 2025. №9. С. 537 – 555.
13. Богомолова Е.В., Комарова В.Л. Чем пахнет плесень? // Светопрозрачные конструкции. Наука. 2009. № 1,2. С. 8 – 11.
14. Шахова Л.Д. Технология пенобетона. Теория и практика: монография. М.: Изд-во АСВ, 2010. 248 с.
15. Моргун Л.В., Смирнова П.В. Моргун В.Н., и др. Способ приготовления сырьевой смеси для получения пенобетона. Патент на изобретение

№2337084. Зарегистрирован в Госреестре изобретений РФ 27.10.2008 по заявке №2007106520 от 20.02.2007 г.

16. Веденов А.А. Физика растворов. М.: Наука, 1984. 112 с.
17. Перцев В.Т. Управление процессами раннего структурообразования бетонов: монография. ВоронежГАСУ, 2006. 234 с.
18. Блинов Л. М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2013. 480 с.
19. Моргун Л.В. Причины комплексного улучшения эксплуатационных свойств пенобетонов при их дисперсном армировании волокнами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 10 (790). С. 76 – 86.

References

1. Bikbaeva K. A., Savinkova K.S. The history of the development of aerated concrete // Young scientist. 2018. No. 6 (192). Pp. 24 – 25. URL: <https://moluch.ru/archive/192/48309>. (in Russian)
2. Pinskere V.A., Vylegzhannin V.P. Cellular concrete as a time-tested material for capital construction // Construction Materials. 2004. No. 3. Pp. 44 – 45. (in Russian)
3. Vishnevsky A.A., Grinfeld G.I. The main trends in the development of the production of autoclaved aerated concrete in Russia // Modern autoclaved aerated concrete: collection of reports of the scientific and practical conference. 2015. Pp. 8 – 13. (in Russian)
4. DIRECTIVE No. 2002/91/EC of the EUROPEAN PARLIAMENT and of the COUNCIL of December 16, 2002 on energy parameters of buildings// 1 (Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of December 16, 2002 on the energy performance of buildings // OJ L 1, 4.1.2003, p. 65)
5. Aloyan R.M., Fedosov S.V., Oparina L.A. Energy-efficient buildings - status, problems and solutions. Ivanovo: PresSto, 2016. 276 p. (in Russian)
6. Grinfeld G.I., Kuptarayeva P.D. Molding from autoclave gas concrete with external insulation. Features of the moisture regime in the initial period of

operation // Engineering and Construction Journal. 2011. No. 8. Pp. 41 – 51. (in Russian)

7. Vatin N.I., Gorshkov A.S., Kornienko S.V., Pestryakov I.I. Consumer properties of wall products made of autoclaved aerated concrete // Construction of unique buildings and structures. 2016. No. 1. Pp. 78 – 101. (in Russian)

8. Krutilin A.B., Rykhlenok Yu. A., Leshkevich V.V. Thermophysical characteristics of low-density autoclaved cellular concretes and their influence on the durability of exterior walls of buildings // Engineering and Construction Journal. 2015. No. 2. Pp. 46 – 118. (in Russian)

9. Orlova N.S., Ulybin A.V., Fedotov S.D. Influence of temperature effects on brick wall cladding // OZIS-Venture LLC. 2018. Pp. 160 – 184. (in Russian)

10. Lobanov I.A., Pukharenko Yu.V. Certificate of Authorship No. 863545 "Raw Material Mixture for Production of Cellular Concretes". Registered in the State Register of Inventions of the USSR on May 14, 1981. (in Russian)

11. Lobanov I.A., Pukharenko Yu.V., Morgun L.V. Features of the Structure and Properties of Non-Autoclaved Cellular Concretes Reinforced with Synthetic Fibers // Concrete and reinforced concrete. 1983. No. 9. Pp. 12 – 14. (in Russian)

12. Morgun V.N., Morgun L.V., Nagorsky V.V. One-stage technology of foam concrete and its influence on the quality of wall materials // Engineering Bulletin of the Don. 2025. No. 9. Pp. 537 – 555. (in Russian)

13. Bogomolova E.V., Komarova V.L. What Does Mold Smell Like? // Translucent Structures. Science. 2009. No. 1,2. Pp. 8 – 11. (in Russian)

14. Shakhova L.D. Technology of Foam Concrete. Theory and Practice: Monograph. Moscow: ASV Publishing House, 2010. 248 p. (in Russian)

15. Morgun L.V., Smirnova P.V. Morgun V.N., Batsman M.O. The method of preparing a raw mixture for obtaining foam concrete. Patent for invention No. 2337084. Registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on 27.10.2008 according to application No. 2007106520 dated 20.02.2007. (in Russian)

16. Vedenov A.A. Physics of Solutions. M.: Nauka, 1984. 112 p. (in Russian)

17. Pertsev V.T. Management of Processes of Early Structure Formation of Concretes: Monograph. VoronezhGASU, 2006. 234 p. (in Russian)
18. Blinov L. M. Liquid Crystals: Structure and Properties. M.: Book House "LIBROKOM". 2013. 480 p. (in Russian)
19. Morgun L.V. Reasons for the complex improvement of the performance properties of foam concrete when it is dispersed reinforced with fibers // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo. 2024. No. 10 (790). Pp. 76 – 86. (in Russian)

Моргун Владимир Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры инженерных дисциплин Южного федерального университета

Моргун Любовь Васильевна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета

Нагорский Виктор Владимирович - аспирант кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета

Дементьева Екатерина Владимировна – ассистент кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета

УДК 504.05

ЯВЛЕНИЕ СВЕТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ. Часть 1

O.M. Тепоян, С.Г. Колюкаева, В.В. Корнеева

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

**Адрес для переписки: Тепоян Оганес Мкртичевич, E-mail: Otepoian2006@gmail.com*

В статье рассмотрено явление светового загрязнения в условиях современной городской среды, в частности, на примере города Воронежа. Проанализированы основные виды и источники светового загрязнения, такие как уличное освещение, архитектурная подсветка, рекламные конструкции, промышленные и транспортные объекты. Исследовано влияние избыточного искусственного освещения на экологическое состояние города, здоровье населения, биоритмы живых организмов и энергопотребление.

Проведена сравнительная характеристика подходов к снижению светового загрязнения в крупных мировых городах, включая Париж и Лондон. Выявлены ключевые меры по минимизации негативного воздействия: законодательное регулирование, внедрение энергоэффективных технологий, использование теплых спектров освещения и интеллектуальных систем управления светом. Предложены рекомендации по адаптации успешного международного опыта для российских городов, в том числе Воронежа.

Ключевые слова: световое загрязнение, городская среда, экология, искусственное освещение.

THE PHENOMENON OF LIGHT POLLUTION. PART 1

O.M. Tepolian, S.G. Koljukaeva, V.V. Korneeva

*Address for correspondence: Oganes M. Tepoian, E-mail: Otepoian2006@gmail.com

The phenomenon of light pollution in the modern urban environment is studied, in particular, using the example of the city of Voronezh. The main types and sources of light pollution, such as street lighting, architectural lighting, advertising structures, industrial and transport facilities, are analyzed. The influence of excessive artificial lighting on the ecological state of the city, public health, biorhythms of living organisms and energy consumption is considered.

A comparative characteristic of approaches to reducing light pollution in major global cities, including Paris and London, has been carried out. Key measures to minimize the negative impact have been identified: legislative regulation, the introduction of energy-efficient technologies, the use of warm lighting spectra and intelligent light control systems. Recommendations on adapting successful international experience for Russian cities, including Voronezh, are proposed.

Keywords: light pollution, urban environment, ecology, artificial lighting.

Исследование явления светового загрязнения

Что такое световое загрязнение?

Бурное развитие в современных городах архитектурной подсветки на зданиях и сооружениях, уличного освещения, рекламных конструкций и инфраструктуры для транспорта уже привело к тому, что ночное небо в Воронеже, а также в других крупных городах стало практически невидимым. Излишнее искусственное освещение нарушает естественные биоритмы жителей города и животных, оказывает влияние на растения, дезориентирует насекомых и птиц, а также влечет к увеличению энергетических потерь.

В мировом масштабе изучение светового загрязнения городов актуально также в контексте строительной и градостроительной деятельности. Специалистам строительного профиля важно понимать, как проектируемые системы освещения и различные архитектурные решения могут повлиять на качество городской среды, комфорт пользователей инфраструктуры и энергопотребление.

Таким образом, исследование проблемы светового загрязнения позволяет выявить ее влияние на экологическое состояние города, определить пути ра-

онального использования искусственного света и предложить меры по улучшению состояния городской среды.

Цель исследования – изучение уровня светового загрязнения в городе Воронеж, определить его влияние на качество жизни населения и окружающую среду, сравнить искусственную освещенность различных городов мира, а также предложить возможные пути снижения уровня светового загрязнения на основе опыта других крупных российских и зарубежных городов.

Световое загрязнение - чрезмерное или неправильно направленное искусственное освещение, изменяющее естественный уровень освещенности ночного неба и негативно влияющее на окружающую среду. Иными словами, световое загрязнение это форма антропогенного воздействия, действующая вследствие нерационального использования искусственных источников света в городской среде.

Оно возникает вследствие нерационального использования источников света (уличные фонари, архитектурная подсветка, рекламные вывески, прожекторы, витрины магазинов). В результате часть света направляется не на освещаемые участки, а в стороны или вверх, и, рассеиваясь в атмосфере, создает световой купол над городом. В самом городе его не видно, но если смотреть на город с расстояния в ночное время суток, то отчетливо можно увидеть оранжевый «купол» над всем городским пространством.

Основными видами светового загрязнения являются:

1. Избыточное освещение – использование слишком мощных светильников, когда уровень освещенности превышает значения нормативов.
2. Световой поток вверх – рассеивание света в атмосфере, из-за чего снижается видимость звездного неба и повышается яркость горизонта.
3. Световое вторжение – попадание света в те зоны, где он не нужен (например, в окна жилых домов)
4. Слепящий свет – чрезмерно яркие источники света, препятствующие нормальному зрительному восприятию, и создают дискомфорт.

5. Динамическое или мерцающее освещение – значительное количество ярких рекламных вывесок, экранов и витрин, которые создают визуальную перегрузку.

Световое загрязнение имеет не только эстетические, но и экологические последствия: у человека оно влияет на циркадные ритмы (физиологические и неврологические изменения в организме человека, которые происходят циклами, в зависимости от того, как день сменяет ночь, они регулируют циклы сна и бодрствования), нарушает биоритмы у животных, влияет на поведение видов, ведущих ночной образ жизни, увеличивает энергопотребление и способствует повышенным выбросам парниковых газов при производстве энергии [1].

Изучать проблему светового загрязнения начали во второй половине XX века, когда по мере развития крупных мегаполисов ученые заметили исчезновение звезд с ночного неба. Сегодня этот вид загрязнения уже признан экологической проблемой глобального масштаба. По оценкам специалистов, не менее 80 % жителей Земли проживают в условиях постоянного избыточного освещения, а в крупных городах и мегаполисах уровень освещенности часто превышает естественный в десятки раз.

Значение проблемы заключается в ее комплексном, неизбирательном влиянии на состояние окружающей среды и человека. Световое загрязнение нарушает естественные биоритмы живых организмов, дезориентирует животных и влияет на естественный рост растений. У человека постоянное воздействие света вызывает нарушения в выработке гормона мелатонина, что приводит к сбоям в циркадных биоритмах, а значит к нарушению сна, повышению утомляемости и стрессу.

Помимо того, чрезмерное освещение увеличивает расход электроэнергии, способствует избыточным выбросам углекислого газа в атмосфере при ее производстве, и, следовательно, усиливает совокупный экологический след города. Таким образом, световое загрязнение - это проблема не только эстетическая, но и экологическая и энергетическая, которая требует повышенного внимания со стороны специалистов в области архитектуры, градостроительства [2].

Световое загрязнение формируется под воздействием многочисленных искусственных источников света, используемых в городской инфраструктуре. Главной причиной его появления является нерациональное проектирование и эксплуатация осветительных систем, где значительная часть светового потока рассеивается в атмосфере.

К основным источникам светового загрязнения в городах относят:

1. Уличное освещение.

Наиболее распространенный источник. Не вымеренное расположение фонарей, использование светильников без отражателей и направляющих элементов приводит к тому, что значимая часть света теряется, создавая купол над городом.

- Лос-Анджелес, США: В середине 2010-х годов город начал масштабную программу по замене более 200 000 старых натриевых фонарей на светодиодные. Изначально новые фонари имели очень холодную цветовую температуру (4000K), что привело к резкому увеличению яркости неба и жалобам астрономов и экологов.

- Берлин, Германия: В отличие от Лос-Анджелеса, Берлин активно внедряет «умное» уличное освещение с датчиками движения, которое приглушает свет в отсутствие людей и транспорта, значительно снижая световое загрязнение и энергопотребление.

2. Архитектурная и декоративная подсветка зданий.

Подсветка фасадов зданий, сооружений, памятников, мостов и других объектов часто используется для создания эстетического эффекта, но одновременно свет направлен вверх или рассеивается, усиливая ночную засветку атмосферы в окрестностях города. Сюда также относятся лазерные шоу и прожектора, направленные в небо для промо-акций и мероприятий. Такой свет напрямую уходит в атмосферу, создавая гигантские «световые столбы» [3].

- Москва, Россия: Масштабная программаочной подсветки исторических зданий, таких как Московский Кремль, Храм Христа Спасителя и небо-

скрёбы «Москва-Сити», создаёт мощный купол засветки. Особенно это заметно в пасмурные ночи, когда свет отражается от облаков.

- Париж, Франция: Знаменитая подсветка Эйфелевой башни является символом города, но также и значительным источником света. Власти идут на компромисс, выключая основную декоративную подсветку после 1 часа ночи, оставляя только мерцающие огни на 5 минут в начале каждого часа.

3. Рекламные конструкции и электронные экраны.

Светодиодные щиты, вывески баннеры и витрины работают в круглосуточном режиме, создавая яркое и постоянно мерцающее освещение. Это вызывает зрительный дискомфорт, а также визуальное перенасыщение городской среды. Особую проблему представляют огромные, постоянно меняющиеся медиафасады, которые полностью покрывают здания. Их яркость часто не регулируется в ночное время, создавая эффект «вечного дня» в центрах мегаполисов [4].

- Токио, Япония: районы Сибуя и Синдзюку – мировые лидеры по плотности неоновых вывесок и гигантских видеоэкранов. Рекламный экран на здании штаб-квартиры компании Sony в Гиндзе или бесчисленные вывески в районе Кабуки-тё создают интенсивное световое поле, практически исключающее видимость звёзд.

- Нью-Йорк, США: Таймс-сквер – хрестоматийный пример «визуального перенасыщения». Сотни цифровых билбордов площадь с яркостью, в сотни раз превышающей нормальную для ночного времени.

4. Промышленные зоны и транспортная инфраструктура.

Заводы, железнодорожные станции, склады, аэропорты, автомагистрали и автозаправки часто используют мощные прожекторы для обеспечения безопасности. Но из-за мощности и неправильного направленного светового потока они становятся крупными источниками светового загрязнения. Крупные транспортные узлы – аэропорты, порты, сортировочные железнодорожные станции – требуют освещения больших открытых площадей для обеспечения безопасности, что часто приводит к использованию неэкранированных прожекторов заливающего света.

- Дубай, ОАЭ: ярко освещённые виллы и парковки вносят огромный вклад в засветку пустынного неба.
- Торговые центры и склады: круглосуточно освещённые логистические центры Amazon и гипермаркеты видны как отдельные яркие острова на окраинах городов.

5. Жилые и коммерческие здания.

Свет, выходящий из окон домов и витрин коммерческих зданий, также вносит вклад в совокупную засветку города. Особенно это заметно в густонаселенных микрорайонах и деловых центрах городов [5].

- Спальные районы Дубая, ОАЭ: ярко освещённые виллы с декоративной подсветкой стен и ландшафта, парковки и подъездные пути в совокупности создают огромное световое пятно в пустыне, где естественная темнота могла бы быть абсолютной.

Таким образом, световое загрязнение является следствием комплексного влияния различных городских источников освещения. Проблему усугубляет отсутствие единых стандартов светового проектирования и недостаточный контроль за уровнем освещения «на местах». Сокращение числа неэффективных источников света и переход к «умным» системам освещения являются важнейшими направлениями уменьшения негативного воздействия на окружающую среду.

Сравнительная характеристика светового потока различных городов мира

Париж и Лондон выбраны как примеры крупных европейских столиц, где проблема светового загрязнения рассматривается как важная часть экологической и экономической политики. Оба города разрабатывают и внедряют комплексные системы мер, направленных на снижение избыточной освещенности, снижение энергопотребления и сохранение качестваочной среды для населения.

Париж традиционно называют «городом огней», что указывает на проблему переизбытка ночной подсветки. Однако в последние годы муниципальные власти активно пересматривают подходы к организации наружного осве-

щения. Ключевым решением стало принятие программы «Париж – город зеленого неба», направленной на снижение уровня искусственного уровня света в ночное время суток. С 2013 года на территории Франции действует муниципальный закон, который ограничивает использование наружной рекламы и архитектурной подсветки зданий вочные часы: витрины магазинов и офисов должны быть выключены с 01:00 до 07:00, за исключением туристических зон и объектов критической инфраструктуры. Также власти Парижа активно занимаются внедрением энергоэффективных LED-светильников с регулирующимся уровнем яркости и теплыми спектрами, уменьшающими влияние на экосистемы и здоровье человека. На некоторых улицах введены в эксплуатацию датчики движения, позволяющие снижать уровень освещенности при отсутствии пешеходов в данной зоне.

Лондон, как один из крупнейших городов Европы, также столкнулся с проблемой светового загрязнения. Для ее решения действует программа «Lighting the Way» (освещая путь), устанавливающая стандарты по установке осветительных приборов направленного света, минимизирующая рассеивание потока вверх. Большинство районных советов Лондона активно внедряют осветительные приборы с цветовой температурой 2700 – 3000 К, которое безопаснее для здоровья людей и животных. Большое внимание уделяется архитектурной подсветке: большинство зданий и мостов разрешается освещать строго до полуночи, после этого яркость автоматически снижается или подсветка вовсе отключается. В Лондоне также применяются «умные» системы управления освещением, которые позволяют адаптировать яркость фонарей в зависимости от погодных условий и уровня активности.

Опыт Парижа и Лондона показывает, что снижение уровня светового загрязнения возможно осуществить без ущерба безопасности и эстетики города. Ключевыми мерами здесь являются: законодательное ограничение избыточной подсветки, использование современных энергоэффективных технологий, применение теплой световой температуры и внедрение интеллектуальных автоматических систем управления освещением города. Все эти подходы могут быть

адаптированы и в российских городах, включая Воронеж. Это поможет создать более экологически устойчивую световую среду.

Список литературы

1. Буренкова О.А. Влияние цвета на психофизиологическое состояние личности // Успехи современного естествознания. 2013. № 10. С. 153 – 154.
2. International Dark-Sky Association. Visibility, Environmental, and Astronomical Issues Associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting, Tucson, Arizona, 2010.
3. Курочкина В.А., Калиниченко Е.К., Белова М.О. Малые архитектурные формы в структуре открытых общественных пространств города // Вестник Евразийской науки. 2021. № 5.
4. Петрухин В.А., Черноусов П.С., Дмитриенко С.С., и др. Сравнительный анализ пульсации светового потока современных источников света // Вестник науки и образования. 2019. № 12 (66). С. 18 – 23.
5. Макгрегор Каллум Дж., Эванс Даррен М., Рочева В. Неблагоприятное экологическое воздействие светового загрязнения: роль светодиодов в минимизации последствий. 2020.

References

1. Burenkova O.A. The influence of color on the psychophysiological state of personality // Successes of modern natural science. 2013. No. 10. Pp. 153 – 154. (in Russian)
2. International Dark-Sky Association. Visibility, Environmental, and Astronomical Issues Associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting, Tucson, Arizona; 2010.
3. Kurochkina V.A., Kalinichenko E.K., Belova M.O. Small architectural forms in the structure of open public spaces of the city // Bulletin of Eurasian Science; 2021 No. 5. (in Russian)

4. Petrukhin V.A., Chernousov P.S., Dmitrienko S.S., et al. Comparative analysis of the pulsation of the luminous flux of modern light sources // Bulletin of Science and Education. 2019. No. 12 (66). Pp. 18-23. (in Russian)

5. Mc Gregor Callum J., Evans Darren M., Rocheva V. Adverse environmental effects of light pollution: the role of LEDs in minimizing consequences; 2020.

Тепоян Оганес Мкртичевич – студент группы бПГС-255 строительного факультета Воронежского государственного технического университета

Колюкаева София Геннадьевна – студент группы бВМ-251 факультета информационных технологий и компьютерной безопасности Воронежского государственного технического университета

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

ПЕРСОНАЛИИ

ПАМЯТИ СЕРГЕЯ МИХАЙЛОВИЧА УСАЧЕВА



22.01.1981-31.10.2024

Люди, которых любишь,

не умирают никогда.

(Мэтт Хэйг)

31 октября 2025 года исполняется годовщина со дня трагической смерти Сергея Михайловича Усачева.

С.М. Усачев родился 22 января 1981 года в городе Воронеж. Папа, Михаил Дмитриевич, работал шофером, мама, Валентина Николаевна - домохозяйкой. В большой семье было трое детей: братья близнецы Сергей и Александр и младшая сестра Галина (рис. 1). Сергей считался старшим ребенком в семье. Родители всегда служили для детей примером трудолюбия и порядочности.



Рис. 1. Родители, брат и сестра Сергея

В 1998 г. после обучения (рис. 2) и блестящего окончания средней школы №50 Сергей и Александр, а в дальнейшем и сестра, поступили и окончили Воронежский государственный архитектурно-строительный университет по специальности «Производство строительных материалов, изделий и конструкций». Сергей всегда отмечал востребованность строительных специальностей и созидательную сторону этой профессии.



Рис. 2. Первый класс

В период с 1998 по 2003 гг. Сергей Михайлович обучался на Строительно-технологическом факультете по специальности «Производство строительных материалов, изделий и конструкций». В период учебы он зарекомендовал себя добросовестным и ответственным студентом, принимавшим активное участие в общественной жизни ВУЗа.

В 2003 г. Сергей Михайлович с красным дипломом окончил ВГАСУ (рис. 3) и поступил в очную аспирантуру, где под руководством профессора Виктора Тихоновича Перцева начал свою научно-педагогическую деятельность, результатом которой в 2007 г. явилась успешная защита кандидатской диссертации по направлению 05.23.05 «Строительные материалы и изделия».



Рис. 3. Вручение дипломов с отличием

В этот период Сергей Михайлович сформировался как ученый с высоким потенциалом. Это позволило ему в дальнейшем определить свое научное направление в исследованиях, успешно руководить работой аспирантов. Сергей Михайлович вел активную научную деятельность, опубликованы статьи, монографии, учебные пособия. Список публикаций составляет более 80 наименований. Под его руководством подготовлены к защите две кандидатские диссертации.

Не менее значима была работа Сергея Михайловича на преподавательском и административном поприще.

С 2005 по 2010 гг. С.М. Усачев прошел путь от ассистента до доцента кафедры Технологии строительных изделий и конструкций. Длительное время работал заместителем декана сначала факультета заочного обучения, а после – строительно-технологического факультета. В 2017 г. Сергей Михайлович возглавил строительно-технологический факультет. С 01.09.2019 г. по 31.10.2024 г. заведующий кафедрой Технологии строительных материалов, изделий и конструкций. На должности заведующего кафедрой он проявил себя как умелый организатор учебного процесса и научных исследований.

Сергея Михайловича всегда отличало уважительное и добroe отношение к коллегам и, особенно, к студентам. Он всегда с огромной радостью проводил занятия, делился своим практическим опытом и знаниями со студентами (рис. 4).



Рис. 4. С.М. Усачев со студентами на конференции

Студенты, в свою очередь, чувствуя его доброту, отзывчивость, стремление помочь, всегда только положительно отзывались о нем. Недаром проститься с С.М. Усачевым и проводить его в последний путь пришли, помимо многочисленных родственников, друзей и коллег по работе, около 100 студентов, которых он учил и которые отзывались о нем следующим образом:

- «Сергей Михайлович оставил неизгладимый след в жизни многих людей. Его доброта и мудрость будут жить в наших сердцах всегда» (Бражникова Валерия, староста группы бПСК-181, выпускница 2022 г.);
- «... в моей памяти он останется лучшим наставником!» (Мачулка Наталья, выпускница 2015 г.).

Сергей Михайлович удостоен множества наград и благодарностей (рис. 5).



Рис. 5. Награды, грамоты и благодарности Усачева С.М.

Сергей Михайлович – человек очень обширных интересов. В годы учебы он принимал активное участие в самодеятельности и выступал в Студенческой Весне и соревнованиях команды КВН (рис. 6).



Рис. 6. Выступление на Студенческой весне

Также он со студенческих лет активно занимался спортом – баскетболом и футболом. Поступив в аспирантуру, заинтересовался волейболом и стал активно заниматься в секции преподавателей, которую возглавлял Евгений Иванович Ханкин. Последние 15 лет был капитаном команды ВГТУ по волейболу среди сотрудников и преподавателей. Команда под его руководством неоднократно участвовала в соревнованиях различного уровня и занимала призовые места (рис. 7).



Рис. 7. Усачев С.М. – капитан волейбольной команды ВГТУ

Сергей Михайлович был примерным семьянином, замечательным мужем и отцом (рис. 8).



Рис. 8. Сергей с женой Ольгой и сыновьями Львом (2014 г.р.)
и Никитой (2020 г.р.)

Сергей Михайлович был примером преданности делу и трудолюбия, внимательным наставником и замечательным человеком. Память о нем навсегда сохранится в сердцах родных, близких, коллег.

Список наиболее значимых научных и учебно-методических работ Усачева Сергея Михайловича

1. Перцев В.Т., Крылова А.В., Усачев С.М. и др. Исследование влияния плотных упаковок заполнителей и добавок модификаторов на свойства мелкозернистых бетонов // Материалы третьей Междунар. науч.-практ. конф. «Бетон и железобетон в третьем тысячелетии». РГСУ, Ростов-на-дону, Т.2, 2004, С. 471-480.
2. Перцев В.Т., Усачев С.М., Птицына А.В. Исследование процессов вибропрессования мелкозернистых бетонных смесей // Научный вестник ВГАСУ «Колебательные, вибрационные, акустические процессы в строительном комплексе и градостроительстве». Воронеж. 2004, С. 53-56.

3. Перцев В.Т., **Усачев С.М.** Формирование структуры дисперсно-зернистых систем в условиях внешних воздействий // Международный симпозиум «Фракталы и прикладная синергетика». Москва, 2005, С. 241-244.
4. **Усачев С.М.** Особенности формирования ранней структуры бетона в процессе вибропрессования // Труды XIII междунар. сем. Азиатско-Тихоокеанской академии материалов. НГАСУ «Строительные и отделочные материалы Стандарты XXI века» (Сибстрин). Т.2. Новосибирск, 2006, С. 140-142.
5. **Усачев С.М.**, Поликарпов И.Н. Процессы структурообразования вибропрессованных бетонов: обоснование направлений исследований // Материалы 58-й Республиканской научной конференции. Сборник научных трудов докторантов и аспирантов. КГАСУ. Казань, 2006, С. 174-177.
6. **Усачев С.М.** Совершенствование технологии и свойств вибропрессованных бетонов // Матер. 11-го Всероссийского слета студентов, аспирантов и молодых ученых – лауреатов конкурса Министерства образования и науки РФ и Государственного Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. «Студенты, аспиранты и молодые ученые – малому научоемкому бизнесу» (Ползуновские гранты). АлтГТУ, Барнаул, 2006, С. 158-162.
7. Перцев В.Т., **Усачев С.М.** Реализация нанотехнологического подхода для вибропрессованных бетонов // Строительные материалы, 2007. №1, С. 45 – 47.
8. Перцев В.Т., **Усачев С.М.** Совершенствование технологии вибропрессованных бетонов // Монография. Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. Воронеж, 2007, 143 с.
9. Рудаков О.Б., Перцев В.Т., Барсукова Л.Г., **Усачев С.М.** Синтез наноразмерных частиц кремнезема и олигомерных пленок на основе тетрафурфурилокси- силана // Материалы VIII международной научной конференции «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии». Кисловодск – Ставрополь: СевКавГТУ, 2008, С. 94-95.
10. Perzhev V.T., Rudakov O.B., Usachev S.M., Baidicheva O.V. The modification of concrete to nano-sized carbonic agent // IV International Summer School “Supramolecular Systems in Chemistry and Biology. Russia, Tuapse, 2008, p. 135.
11. Леденев А.А., Перцев В.Т., **Усачев С.М.** Повышения эффективности применения органоминеральных добавок в технологии бетонов // Материалы между-

народного конгресса «Наука и инновации в строительстве» SIB-2008, Т.1, кн. 1, Воронеж, 2008, С. 283-287.

12. Леденев А.А., Перцев В.Т., **Усачев С.М.** Структурно-реологические свойства строительных смесей // Строительные материалы, 2009. № 7, С. 68-70.
13. Перцев В.Т., Рудаков О.Б., **Усачев С.М.** Наноструктурирующее связующее на основе минеральных вяжущих средств // Нанотехнологии Воронежской области. Воронеж. 2010. С. 23-24.
14. Черноусова О.В., Рудаков О.Б., **Усачев С.М.** Исследования структуры поверхности строительных материалов // Материалы V Всерос. конф. «Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах». Фагран-2010, Воронеж, Научная книга. Т.2., С. 845-848 .
15. Подольский В.П., **Усачев С.М.**, Черноусов Д.И. Исследование свойств битумно-шунгитового вяжущего на сканирующем микроскопе // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. №4 (20), 2010, С. 93-99 .
16. Рудаков О.Б., Кукина О.Б., **Усачев С.М.**, Черноусова О.В. Сканирующая зондовая микроскопия // Метод. указания к выполнению лабор. работ по дисциплинам «Концепции современного естествознания», «Физика и концепции современного естествознания», «Современная аналитическая химия» для студентов всех специальностей / Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, кафедра физики и химии, Воронеж, 2010. – 28 с.
17. Шмитько Е.И., Славчева Г.С., Акулова И.И., Воронин А.И. **Усачев С.М.** Управление качеством на предприятиях строительной отрасли // Учеб-метод. пособие по выполнению выпускной квалификационной работы для студентов специальности «Стандартизация и сертификация» / Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, Воронеж, 2011. – 108 с.
18. Усачев А.М., **Усачев С.М.** Строительные материалы и изделия. Технология строительных изделий и конструкций // Учеб. Пособие для студентов специальности «Информационные системы и технологии» / Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, Воронеж, 2011. – 252 с.
19. Козодаев С.П., Перцев В.Т., Акулова И.И., Зуев Б.М., **Усачев С.М.** Проектирование смесительных производств // Учеб.-метод. пособие для студентов специальности «ПСК» и «СиС» Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, Воронеж, 2011. – 60 с.

20. Патент RU 2443648. Комплексная добавка для бетонной смеси . Заяв. 28.05. 2010; Опубл. 27.02. 2012. Авторы: Леденев А.А., Перцев В.Т., Рудаков О.Б., Барсукова Л.Г., **Усачев С.М.**
21. Патент RU 2454381. Способ приготовления комплексного органо-минерального модификатора бетона. Заяв. 30.11.2009; Опубл. 27.06. 2012, Авторы: Леденев А.А., Перцев В.Т., **Усачев С.М.**
22. Леденев А.А., Перцев В.Т., Рудаков О.Б., **Усачев С.М.** Повышение эффективности применения химических добавок для бетонов на основе поликарбаксилатов // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. – Выпуск №2 (30), 2013.- С.49-54.
23. Перцев В.Т., **Усачев С.М.**, Мебония Р.И., Мачулка Н.В. Основные научные подходы к получению высококачественных бетонов на основе минеральных вяжущих веществ // Научный вестник ВГАСУ Серия «Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения». Выпуск №1(8), Воронеж 2014, С. 3-9.
24. Рёсснер Ф., Рудаков О.Б., **Усачев С.М.** Теплофизические свойства микрокапсулированных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом в оболочке на органической и кремнийорганической основе // Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах (ФАГРАН-2015): мат. VII Всероссийской конф. Воронеж, 2015. - С. 53-59.
25. **Усачев С.М.**, Власов В.В., Беспалов Н.А. Управление структурой высококачественных бетонов на основе минеральных вяжущих веществ // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура.- Выпуск №1 (41), 2016.- С.56-62.
26. **Усачев С.М.**, Левина Ю.С., Усачев А.М. Получение энергосберегающих строительных материалов на основе традиционного сырья и теплоаккумулирующих добавок // Международный научно-исследовательский журнал International Research Journal - №4 (46). – Часть 2 . – Екатеринбург, Апрель, 2016. – С. 124-126. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.218.
27. Перцев В.Т., **Усачев С.М.**, Леденев А.А., Усачев А.М. Оценка реологических свойств строительных смесей с получением дополнительных количественных

характеристик // Конденсированные среды и межфазные границы. Том 18, №3. 2016. С. 394-401.

28. Чернушкин О.А., Усачев А.М., **Усачев С.М.**, Черкасов С.В. Строительные материалы / Учебное пособие для студентов бакалавриата заочной формы обучения направления подготовки «Строительство». Воронеж, 2016. – 140 с.

29. Усачев А.М., **Усачев С.М.**, Баранов Е.В. Специальные конструкционные и функциональные строительные материалы / Учебное пособие для студентов бакалавриата направления подготовки «Химия, физика и механика материалов». Воронеж, 2016. – 244 с.

30. **Усачев С.М.**, Перцев В.Т., Хавьяримана С. Теплоаккумулирующие материалы для строительных изделий и конструкций // Научный журнал строительства и архитектуры. - Выпуск № 2 (50), 2018. - С. 68-75

31. Перцев В.Т., **Усачев С.М.**, Стенюхин Л.В. Топологический подход в исследовании структуры строительных композитов // Строительное материаловедение: настоящее и будущее [Электронный ресурс]: сборник материалов I Всероссийской научной конференции, посвящённой 90-летию выдающегося учёного-материаловеда, академика РААСН Ю.М. Баженова (г. Москва, 1–2 октября 2020 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, институт строительства и архитектуры. — Электрон. дан. и прогр. (11 Мб). — Москва : Издательство МИСИ — МГСУ, 2020. С. 100-108 - Режим доступа: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskayadeyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/> — Загл. с титул. экрана. ISBN 978-5-7264-2473-6.

32. **Усачев С.М.** Топология как инструмент в оценке структуры строительного композита статьяISSN 0536–1052. Известия вузов. Строительство. 2020. № 7 – С. 91-101.

33. Степanova М.П., Славчева Г.С., **Усачев С.М.**, Белькова Н.А. Вяжущие вещества / Лабораторный практикум. Воронежский государственный технический университет, Воронеж, 2020. - 56 с.

34. Леденев А.А., Перцев В.Т., Рудаков О.Б., **Усачев С.М.** Структурно-феноменологический анализ взаимосвязи показателей микроструктуры и свойств за-

твердевших цементных систем // Конденсированные среды и межфазные граници, 2022. Т.24. № 3. С. 326–334. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9855>.

35. Усачев С.М., Кукина О.Б., Килперик Ками. Исследование свойств сырьевых материалов для бетонов в Республике Бурунди // Научный журнал строительства и архитектуры. - 2023. - № 1 (69). - С. 36-46. - DOI: 10.36622/VSTU.2023.69.1.003

36. Килперик Ками, Усачев С.М. Основные факторы износа конструкций из бетона в климатических условиях Республики Бурунди // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 1(54). С. 102–111.

37. К. Ками, Усачев С.М. Изменение структуры и свойств бетонов в различных условиях эксплуатации (на примере Республики Бурунди) // Научный журнал строительства и архитектуры. - 2024. - № 2 (74). - С. 58-67. - DOI 10.36622/2541-7592.2024.74.2.005.

Усачев А.М., Белькова Н.А., Перцев В.Т.

Усачев Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

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

Перцев Виктор Тихонович – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Воронежского государственного технического университета

**АКАДЕМИК ФИГОВСКИЙ О.Л. УДОСТОЕН
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАГРАДЫ**

Олег Львович Фиговский, член редакционной коллегии журнала «Химия, физика и механика материалов», д-р техн. наук, специалист в области создания новых композиционных материалов, академик EAS, РИА и РААСН, почётный доктор КНИТУ, почетный профессор КГТУ, ВГТУ и WSG, глава Департамента по науке инновационного центра «Альянс народов мира» (Израиль, г. Хайфа) в ноябре 2025 г. на ежегодном собрании Евроазиатской Академии Инженерных Наук (Китай, Пекин) был отмечен академической наградой «The Outstanding Academic Award for Lifetime Achievement».



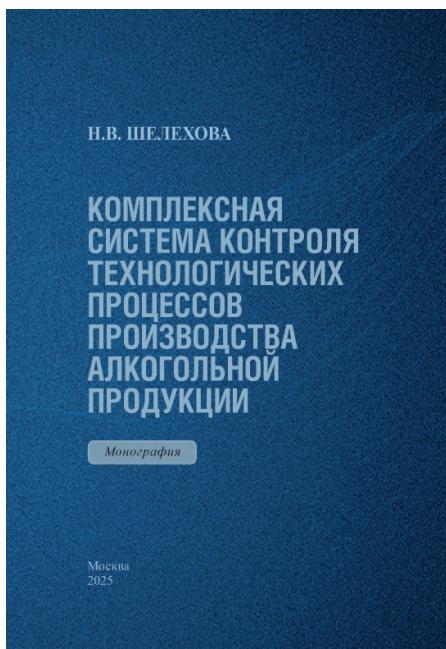
*Редакционная коллегия журнала «Химия, физика и механика материалов»
искренне поздравляет Олега Львовича с этим событием и желает дальнейших
научных и творческих успехов!*

Рудаков О.Б., Небольсин В.А., Кукина О.Б., Шведова М.А.

Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, проф., зав кафедрой Химии и химической технологии материалов ВГТУ
Небольсин Валерий Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры 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
Шведова Мария Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

БИБЛИОГРАФИЯ

О НОВОЙ МОНОГРАФИИ ШЕЛЕХОВОЙ Н.В., ЧЛЕНА РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА «ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ»



Вышла в свет монография Шелеховой Наталии Викторовны «Комплексная система контроля технологических процессов производства алкогольной продукции». В этой монографии обобщены материалы по созданию научно-практических основ и разработке комплексной системы контроля и регулирования технологических процессов производства этилового спирта и спиртных напитков, основанной на применении новых методик анализа и цифровых технологий. Изложены результаты исследований, проведенных за счет средств субсидии на выполнение государственного задания (тема № FGMF-2025-0009.). Продемонстрированы возможности модулей разработанной комплексной системы контроля, позволяющие проводить мониторинг основных этапов технологических и биотехнологических процессов производства этилового спирта и спиртных напитков, приготовленных на его основе. Разработаны инструментальные методики анализа сложных многокомпонентных сред, которые нашли применение в научных иссле-

дованиях, направленных на изучение биотехнологических процессов биосинтетической и биокаталитической конверсии полимеров зернового сырья в этанол. Приведены новые научные данные о химическом составе продуктов, полупродуктов и отходов спиртового и ликероводочного производства, полученные с применением разработанных методик.

Монография состоит из семи глав, введения, заключения и списка литературы. Тема данной монографии актуальна и заслуживает особого внимания в контексте современных тенденций развития производственного контроля алкогольной продукции. В ней рассматривается использование методов газовой хроматографии, капиллярного электрофореза, хромато-масс-спектрометрии, а также информационные технологии для оценки качества алкогольной продукции.

Монография предназначена для широкого круга читателей, интересующихся данной проблемой: для руководителей, специалистов предприятий, производящих алкогольную продукцию, для научных работников, аспирантов и студентов с целью использования в образовательной деятельности в области производства спиртных напитков, в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Биотехнология», «Пищевая биотехнология», «Технология брёдильных и сахаристых производств», «Аналитическая химия», «Информатика», «Искусственный интеллект», «Системы автоматизированного управления» и др.

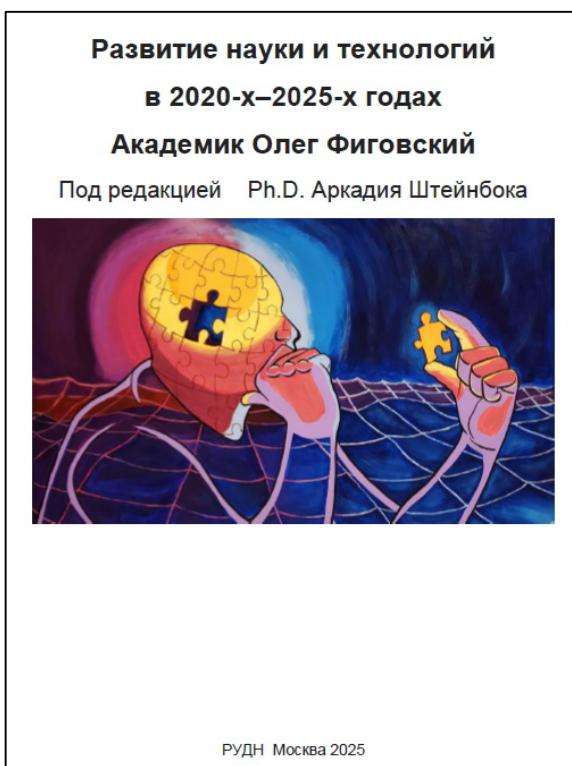
Ссылка для цитирования: Шелехова, Н. В. Комплексная система контроля технологических процессов производства алкогольной продукции / Н. В. Шелехова. – Москва : Первое экономическое издательство, 2025. 288 с. ISBN 978-5-91292-553-5. DOI 10.18334/9785912925535. EDN UNLBOS.

Полянский К.К., Рудаков О.Б.

Полянский Константин Константинович – д-р техн. наук, профессор Воронежского филиала РЭУ им. Г.В. Плеханова

Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, проф., зав кафедрой химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

МОНОГРАФИЯ АКАДЕМИКА ОЛЕГА ЛЬВОВИЧА ФИГОВСКОГО



Вышла в свет монография академика Олега Львовича «Новые технологии и наука в современном мире» (Т. 3, изд. РУДН, Москва, 2025, 500 с.), которая предлагает читателю его оригинальные обзорные работы последних лет в различных областях современной науки и технике. Данная книга даст читателю достаточно полное и объективное представление о новой идеологии в науке и технике, в том числе о систематическом анализе патентов, созданных в различных странах мира. В частности, в ней рассмотрены такие направления как: 3D-печать в строительстве, промышленности и медицине; наука и технологии в различных странах мира, таких как Франция, Германия, Израиль, США, Индия, Канада, Япония, а также в странах БЕНИЛЮКС и странах арабского мира; прогресс Китая в области AI. Приведены примеры новых патентов в области инноваций новых материалов, например, полимерный бетон RUBCON.

В заключение поднимаются темы новой научной идеологии и направлений: управление инновациями, идеология Кремниевой долины, пути развития военных технологий, век искусственного интеллекта, применение лазеров в обороне и промышленности и пути развития военных технологий.

Рудаков О.Б.

Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, проф., зав кафедрой химии и химической технологии материалов Воронежского государственного технического университета

Научное издание

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

Выпуск № 4(47), 2025

Научный журнал

В авторской редакции

*Дата выхода в свет: 25.12.2025.
Формат 60×84 1/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 17,9. Уч.-изд. л. 13,5.
Тираж 25 экз. Заказ № 298
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