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

ВГТУ

Воронежский государственный технический университет

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Химия, физика и механика материалов

Выпуск № 3(50), 2026

Уважаемые коллеги, дорогие читатели и авторы!



В 2026 году ВГТУ отмечает сразу несколько юбилейных дат: 95-летие Воронежского инженерно-строительного института, 70-летие Воронежского политехнического института и 10-летие присвоения ВГТУ статуса опорного университета Воронежской области. За эти годы вуз приобрел статус крупнейшего инженерного научно-образовательного центра региона. Научный журнал «Химия, физика и механика материалов» с 2008 года публикует результаты научных исследований по таким фундаментальным направлениям, как химия и физика материалов, химическая технология материалов, в том числе строительных, прикладная механика, методы контроля и диагностики материалов и изделий, техносферная и экологическая безопасность.

Учеными ВГТУ совместно со студентами и аспирантами в рамках бюджетных тем «Аналитический контроль качества и безопасности технических материалов, бытовой продукции и технологических процессов» (руководители — Рудаков О.Б., Хорохордина Е.А.) и «Термодинамика и кинетика химических процессов в конденсированных средах и на межфазных границах» (руководители — профессора Артамонова О.В., Рудаков О.Б., Небольсин В.А.) публикуются материалы по пиролитической хромато-масс-спектрометрии, газовой хроматографии, электрохимическим методам в контроле экотоксикантов, в том числе микропластика и нанопластика, формальдегида, летучих карбоновых кислот в окружающей среде, по идентификации полимеров в композиционных материалах.

В журнале опубликованы научные статьи, посвященные разработке неорганических и комплексных нанодобавок для модифицирования структур неорганических систем твердения и строительных композитов на их основе. Также представлены обзорные публикации по синтезу наноструктур и наноматериалов, нанотехнологиям в области самовосстанавливающихся материалов.

Под руководством доцентов Кукиной О.Б., Волкова В.В, Золотухина С.Н. опубликованы актуальные работы по созданию новых композитных материалов на основе алюмосиликатов и дисперсных систем различного генезиса, а также математическому моделированию технологий с их использованием. Академик Фиговский О.Л. регулярно освещает успехи 3D-технологий в строительстве.

Желаю редколлегии успешной работы, повышения рейтинга журнала и привлечения к публикациям в качестве авторов талантливых ученых!

С уважением, ректор Воронежского государственного технического университета, доктор технических наук, доцент Д.К. Проскурин

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

ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

Выпуск № 3(50), 2026

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

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 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

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Шабловский Я.О. Контролируемые нарушения пространственной чётности в асимметрических реакциях……..… 4

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Моргун Л.В., Дементьева Е.В. Физико-химические особенности массопереноса в одностадийно изготовляемых пенобетонных смесях…… 20

Цзыи Го, Ординарцев А.А., Кукина О.Б. Исследование механизма кристаллизации широкозонных перовскитов, регулируемого добавкой l-α-фосфатидилхолина, при изготовлении методом дозирующего лезвия…… 31

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Винокурова И.М., Хонькин Н.А., Четверикова Д.А., Титова Д.В. Перспективы разработки методов повышения долговечности работы оборудования автомобилестроения с учетом защиты от коррозионных разрушений…… 46

Лукин А.А., Штриккер Л.А., Николаев В.Н. Использование отходов животного происхождения в качестве перспективного сырья для производства биодизельного топлива…….. 69

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Золотухин С.Н., Борисова М.И., Бондарева А.С. Инженерно-технические аспекты стабилизации оползнеопасных склонов при жилищном строительстве…… 78

ПЕРСОНАЛИИ

Усачев А.М. Памяти Евгения Михайловича Чернышова…… 86

Рудаков О.Б., Селеменев В.Ф., Рудакова Л.В., Карпов С.И., Любарь А.В. К Юбилею профессора Клюева Виктора Григорьевича…….. 90

ХРОНИКА

Артамонова О.В., Шведова М.А. Всероссийская конференция «Актуальные проблемы строительного материаловедения и технологий» в Воронеже…….. 92

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 544.476

КОНТРОЛИРУЕМЫЕ НАРУШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧЁТНОСТИ В АСИММЕТРИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ

Я.О. Шабловский

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Белоруссия, 246746, г. Гомель, просп. Октября, 48

Адрес для переписки: Шабловский Ярослав Олегович, e-mail: ya.shablowsky@yandex.ru

Реакции, протекающие с нарушением пространственной чётности, продуцируют неравные количества правых и левых форм хирального вещества. Показано, что в гетерохиральной паре энантиомеров действует междипольное притяжение, а в гомохиральных парах – междипольное отталкивание. Если энергия междипольного притяжения в гетерохиральных парах энантиомеров компенсирует убыль энергии Гиббса в ходе гетерохиральной димеризации продукта, то будет иметь место энантиоселективный автокатализ: протекание реакции, продуцирующей энантиомеры, создаст избыток стереоформы продукта, преобладавшей изначально. Те же предпосылки имеет формальный аналог энантиоселективного автокатализа – рацемическая кристаллизация в пересыщенном растворе, создающая в нём избыток энантиомера, изначально преобладавшего в данном растворе. В случае равновозможности кристаллизации соединения в рацемической и в энантиомерной форме кристаллический рацемат имеет по сравнению с гомохиральными кристаллическими фазами того же соединения большую теплоёмкость, большую плотность, большую термодинамическую устойчивость и более высокую температуру плавления. Показано, что управляемая асимметрическая индукция возможна при осуществлении реакции на поверхности гиротропного ферроика, а также при образовании кристаллов из рацемического пересыщенного раствора в условиях макрохиральности (эффект Кондепуди).

При этом для осуществления эффекта Кондепуди детерминирующим является не физическое происхождение закрученности, а знак её хиральности.

Ключевые слова: асимметрическая реакция, асимметрический автокатализ, хиральность, пространственная чётность, нарушение чётности, реакция Соаи, эффект Кондепуди, энантиомер, энантиоморф.

CONTROLLABLE VIOLATIONS OF SPATIAL PARITY IN ASYMMETRIC REACTIONS

Ya.O. Shablovsky

Gomel State Technical University, prosp. Oktyabrya, 48, Gomel, 246746, Belorussia

Corresponding author: *Yaroslav O. Shablovsky*, *e-mail: ya.shablowsky@yandex.ru*

The paper deals with components of chemical systems that are chiral, i.e. can equiprobably exist in right- and left-handed structural modifications known as enantiomers (for molecules) or enantiomorphs (for crystals). A pair of enantiomers (or enantiomorphs) is the pair of mirror images of one another. Nevertheless, due to the energy difference between such ‘images’, or, to be more precise, between the ground states of enantiomers (or enantiomorphs), there exists a phenomenon of parity violation – the non-conservation of parity in reactions producing chiral substances. Here we propose a solution for the problem of ‘the chirality inducer’ in a chemical system. Special attention is paid to asymmetric autocatalysis, i.e. to chiral autoamplification processes in which a chiral compound acts as a catalyst for its own production and provides a high enantiomeric excess. In the crystallization of racemic compounds from supersaturated solutions the deposited crystals are racemic, while the resulting solution becomes highly enriched in one enantiomer. On the contrary, when restricted by macrochirality, the crystal phase in racemic supersaturated solutions gets enriched in one enantiomer (the Kondepudi effect).

Keywords: asymmetric reaction, asymmetric autocatalysis, chirality, spatial parity, parity violation, the Soai reaction, the Kondepudi effect, enantiomer, enantiomorph.

Введение. Предмет нашего исследования – реакции, продуцирующие хиральные (гиротропные) вещества. Существование таких веществ равновозможно в правосторонней и в левосторонней форме – зеркальных

отражениях друг друга. У молекул эти зеркально антиподальные стереоизомеры – энантиомеры, а у кристаллов – энантиоморфы [1].

Актуальность феномена хиральности обусловлена тем, что химическая и в особенности биохимическая активность правой и левой форм вещества может коренным образом различаться. Хрестоматийный пример – биохимическая роль L-α-аминокислот и D-сахаров [2, 3].

При наличии в реакционной системе индуктора хиральности происходит нарушение пространственной чётности [4] – образование правых и левых форм продукта в неравных количествах. Реакции, протекающие с нарушением чётности, называют асимметрическими или стереоселективными [5].

Нарушение пространственной чётности может быть спонтанным (см. завершающий раздел); в противном случае имеет место асимметрическая индукция [6]. В данной работе выявлены возможности физического контроля таких процессов.

Управляемая асимметрическая индукция

В современной технологической практике воспроизводимое нарушение пространственной чётности в целевой реакции обеспечивается хиральным катализатором [6]. В работе [7] была продемонстрирована энантиоселективность адсорбции стереоизомеров на поверхности кристаллического триглицинсульфата $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$. Он обладает сегнетоэлектрической доменной структурой, и из-за её наличия авторы [7] столкнулись с «необратимой потерей гомохиральности» адсорбента при реверсировании температуры. Между тем, способность к доменизации можно эффективно использовать для физической реализации индуктора хиральности. Покажем это.

Все кристаллизуемые вещества из-за различия устойчивости комбинаторно регулярной укладки структурных единиц и метрически регулярной укладки того же набора структурных единиц обладают полиморфизмом. У подавляющего большинства веществ высокотемпературная модификация (**ВТМ**)

неполярна, что позволяет выделить два основных типа полиморфных превращений при понижении температуры: 1) переходы в полярную низкотемпературную модификацию (**НТМ**); 2) переходы в неполярную НТМ. Кристаллы с таким полиморфизмом разделяют на ферроики различного ранга $\mathfrak{R}$ [8]. Выделяют первичные ферроики ($\mathfrak{R}$ = 1 либо 2), средние ферроики ($\mathfrak{R}$ = 3 либо 4) и высшие ферроики ($\mathfrak{R} \geq 5$). Последние негиротропны и далее не затрагиваются.

При переходе в низкосимметричную модификацию полиморфный кристалл разбивается на домены [9, p. 36–43]. Если g – группа Гесселя низкосимметричной модификации, $g^{\bullet}$ – группа Гесселя высокосимметричной модификации, то структура отдельного домена имеет симметрию группы g, тогда как симметрия полидоменного кристалла в целом соответствует группе $g^{\bullet}$. Обозначим $\mathrm{I}_{\mathfrak{R}}$ инвариант низшего ранга в «разностном» множестве

$$\hat{\mathbf{I}} \in \left(\mathfrak{I} \backslash \mathfrak{I}^{\bullet}\right), \tag{1}$$

где $\mathfrak{I}$ и $\mathfrak{I}^{\bullet}$ – множества кристаллографических инвариантов групп g и $g^{\bullet}$ соответственно. Тогда ранг $\mathfrak{R}$ ферроика равен тензорному рангу инварианта $\mathrm{I}_{\mathfrak{R}}$, а сам инвариант $\mathrm{I}_{\mathfrak{R}}$ детерминирует анизотропию и тензорную природу характеристического воздействия $\aleph_{\mathfrak{R}}$ – статического силового поля, монодоменизирующего НТМ ферроика.

Множество (1) охватывает «разностные» свойства: ими обладает НТМ, но не обладает ВТМ, т.к. эти свойства запрещены симметрией структуры ВТМ. Существенно, что в силу фундаментального принципа Кюри расположение доменов в кристалле НТМ восстанавливает плоскости и/или оси кристаллографической симметрии структуры ВТМ, утраченные при переходе ВТМ → НТМ. С учётом данной особенности монодоменизирующая способность характеристического воздействия $\aleph_{\mathfrak{R}}$ означает, что под этим воздействием (в «зажатом» состоянии) кристалл ВТМ приобретёт свойства (1). Таким образом, можем констатировать следующее.

1. Если при температуре протекания реакции стабильна ВТМ гиротропного ферроика, то его в качестве индуктора хиральности целесообразно использовать в «зажатом» состоянии.

2. Если при температуре протекания реакции стабильна НТМ гиротропного ферроика, то его в качестве индуктора хиральности следует использовать после предварительной монодоменизации.

У первичных гиротропных ферроиков, в частности у вышеупомянутого триглицинсульфата, характеристическим воздействием служит электростатическое поле. Характеристические воздействия средних гиротропных ферроиков с неполярной НТМ указаны в таблице, где приняты следующие обозначения: E_l (l = 1, 2, 3) – напряжённость электрического поля, X_w (w = 1, 2, … , 6) – механическое напряжение, $\widehat{M}_l$ – момент кручения.

Реакции с участием правой и левой форм вещества приводят к продуктам разного химического или пространственного строения, т.е. протекают по неидентичным направлениям. Следовательно, в таких реакциях активные частицы оказываются в продуктивных взаимных расположениях с разной периодичностью (с разной характеристической частотой).

Общеизвестно, что гетерогенный катализ детерминируется принципом Сабатье – требованием сбалансированности связывания активируемых частиц на поверхности катализатора и последующей десорбции продукта поверхностного взаимодействия. Обеспечив регулярное чередование названных процессов, можно существенно повысить продуктивность гетерогенного катализа. Если это чередование происходит циклически с характеристической частотой целевой реакции, то имеет место каталитический резонанс [10]. Покажем, как осуществить такой резонанс у гиротропных диэлектрических катализаторов.

Гиротропные кристаллы ацентричны, а потому поляризуемы, по крайней мере за счёт пьезоэлектрического эффекта. Из общей электростатики известно, что плотность $\overline{\sigma}$ поверхностных зарядов диэлектрика подчиняется равенству

$$\overline{\sigma} = P_n,$$

где P_n – нормальная составляющая вектора электрической поляризации. В силу данного равенства у кристаллических диэлектриков каталитический резонанс совпадает с поляризационным резонансом. Благодаря этому стационарный каталитический оптимум будет обеспечен, если поляризация гетерогенного катализатора изменяется с частотой

$$f = \frac{\mathrm{k}\varpi}{\mathrm{N}}, \qquad (2)$$

ϖ – характеристическая частота целевой реакции, k, N – положительные целые числа.

Таблица

Индуцирование гиротропии и монодоменизация средних ферроиков

Тип полиморфного превращения	Гиротропные воздействия
$m\bar{3}m$ – 32	$E_1X_1=-E_1X_2=-E_2X_6;\ E_1X_4=-E_2X_5;\ E_1\hat{M}_1=E_2\hat{M}_2;\ \ E_3\hat{M}_3;$ $X_1X_4=-X_2X_4=X_5X_6$
$m\bar{3}$ – 32	
6/mmm – 32	
432 – 32	$E_1X_1=-E_1X_2=-E_2X_6;\ E_1X_4=-E_2X_5;\ X_1X_4=-X_2X_4=X_5X_6$
622 – 32	$E_1X_1=-E_1X_2=-E_2X_6;\ X_1X_4=-X_2X_4=X_5X_6$
$\bar{6}2m$ – 32	$E_1X_4=-E_2X_5;\ E_1\hat{M}_1=E_2\hat{M}_2;\ \ E_3\hat{M}_3;\ \ X_1X_4=-X_2X_4=X_5X_6$
$\bar{3}m$ – 32	$E_1X_1=-E_1X_2=-E_2X_6;\ \ E_1X_4=-E_2X_5;\ \ E_1\hat{M}_1=E_2\hat{M}_2;\ \ E_3\hat{M}_3$
6/mmm – $\bar{6}2m$	$E_1X_1=-E_1X_2=-E_2X_6$
$m\bar{3}$ – 23	$E_1X_4=E_2X_5=E_3X_6;\ \ \ E_1\hat{M}_1=E_2\hat{M}_2=E_3\hat{M}_3$
$m\bar{3}m$ – 23	
$m\bar{3}m$ – $\bar{4}2m$	$E_1X_4=E_2X_5;\ E_3X_6;\ \ \ E_1\hat{M}_1=-E_2\hat{M}_2$
4/mmm – $\bar{4}2m$	
$m\bar{3}m$ – 422	$E_1X_4=-E_2X_5;\ \ \ E_1\hat{M}_1=E_2\hat{M}_2;\ \ E_3\hat{M}_3$
4/mmm – 422	
6/mmm – 622	
6/mmm – 222	$E_1X_4;\ E_2X_5;\ E_3X_6;\ \ E_1\hat{M}_1;\ E_2\hat{M}_2;\ E_3\hat{M}_3$
4/mmm – 222	
mmm – 222	
$m\bar{3}$ – 222	
$m\bar{3}m$ – 222	
$\bar{4}3m$ – 222	
4/m – $\bar{4}$	$E_1X_4=E_2X_5;\ \ E_1X_5=-E_2X_4;\ \ \ E_3X_1=-E_3X_2;\ \ E_3X_6;\ \ E_1\hat{M}_1=-E_2\hat{M}_2;$ $E_1\hat{M}_2=E_2\hat{M}_1$
422 – 222	E_3X_6
622 – 222	

$432 - 23$	$E_1X_4 = E_2X_5 = E_3X_6$
$m\bar{3}m - \bar{4}3m$	
$m\bar{3}m - 432$	$E_1\widehat{M}_1 = E_2\widehat{M}_2 = E_3\widehat{M}_3$
$\bar{4}3m - 23$	
$\bar{4}3m - \bar{4}2m$	$E_1\widehat{M}_1 = -E_2\widehat{M}_2$
$\bar{4}2m - 222$	$E_3\widehat{M}_3$

В общем случае $k \neq N$, (3)

что позволяет повысить селективность катализа. Для этой цели следует использовать кратную поляризационную частоту ($k > N$), если характеристическая частота целевой реакции низка; в противном случае при осуществлении каталитического резонанса следует использовать субкратную поляризационную частоту ($k < N$).

Спонтанная энантиоселективность

Нарушение пространственной чётности может быть спонтанным (некаталитическим). K. Soai [11, 12] обнаружил и исследовал особый – автокаталитический – тип асимметрических реакций, в которых при всяком начальном преобладании продукта с определённой хиральностью (R либо S) именно эта стереоформа образует энантиомерный избыток. Выясним природу автокаталитических энантиоселективных процессов.

Поскольку ацентричные энантиомерные молекулы поляризуемы, в каждой паре энантиомеров возникает междипольное взаимодействие. Оно повышает внутреннюю энергию молекулярной системы на величину [13]

$$W = \frac{(\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2)r^2 - 3(\mathbf{p}_1\boldsymbol{r})(\mathbf{p}_2\boldsymbol{r})}{r^5}, \qquad (4)$$

где $\boldsymbol{r}$ – радиус-вектор относительного взаимного расположения диполей, $\mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_2$ – их электрические моменты, включающие первичную (собственную) и вторичную (индукционно наведённую) составляющие. В рассматриваемом нами случае оба диполя принадлежат хиральным молекулам, поэтому векторы $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$ и $\boldsymbol{r}$ неколлинеарны, так что энергетический излишек (4) минимален при

$$\mathbf{p}_1 \downarrow\uparrow \mathbf{p}_2. \qquad (5)$$

Характер междипольного взаимодействия определяется знаком произведения [13]

$$\Pi_W = (\pi_1 - \pi_0)\cdot(\pi_2 - \pi_0), \qquad (6)$$

где π_1 и π_2 – молекулярные поляризуемости, отвечающие индукционно-наведённым составляющим электрических моментов $\mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_2$, π_0 – поляризуемость молекул среды, в которой находятся диполи. При $\Pi_W > 0$ междипольные силы создают притяжение, а при $\Pi_W < 0$ – отталкивание.

Энантиомер превращается в свою хиральную противоположность при инверсии пространства и неинвариантен к инверсии времени. Вследствие этого у правых и у левых энантиомеров продольные составляющие поляризуемости равны, а её поперечные составляющие антиравны. С учётом отмеченной антиподальности молекулярной поляризуемости зеркальных энантиомеров из соотношений (5) и (6) вытекает: в гетерохиральной паре энантиомеров (R + S) имеет место дипольное притяжение, а в гомохиральных парах (R + R либо S + S) – дипольное отталкивание.

Данный факт позволяет констатировать следующее. Во-первых, образование гомохирального кристалла возможно только при

$$\frac{N_\mathrm{A} W_-}{2\mathcal{E}} \ll 1, \qquad (7)$$

где W_- – энергия отталкивания в гомохиральных парах энантиомеров, $\mathcal{E}$ – молярная энергия теплового движения энантиомеров в кристалле, N_A – постоянная Авогадро.

Во-вторых, при равновозможности кристаллизации соединения в рацемической и в энантиомерной форме кристаллический рацемат этого соединения имеет по сравнению с его гомохиральными кристаллическими фазами: 1) большую теплоёмкость; 2) большую плотность; 3) большую термодинамическую устойчивость; 4) более высокую температуру плавления. Этими четырьмя закономерностями однозначно разрешается дискутируемая до сих пор [14] проблема эмпирического правила Валлаха.

В-третьих, структура метастабильного хирально-молекулярного кристалла может иметь низкий кристаллохимический приоритет, и тогда в этой структуре возможна спонтанная стереотрансформация. Кинетическая устойчивость метастабильной кристаллической структуры соразмерна её приоритету, поэтому её трансформация, не ведущая к образованию термодинамически устойчивой фазы, происходит в направлении повышения кристаллохимического приоритета [15]. Такую трансформацию претерпит структура метастабильной хирально-молекулярной кристаллической фазы, если в результате изменения температуры возникнет состояние

$$\frac{N_{\mathrm{A}} W_{+}}{2\mathcal{E}} > 1 \qquad (8)$$

либо

$$\frac{N_{\mathrm{A}} W_{+}}{2\mathcal{E}} << 1. \qquad (9)$$

Условие (8) относится к трансформации метастабильной гомохиральной кристаллической фазы в метастабильную рацемическую кристаллическую фазу, а условие (9) – к трансформации метастабильной рацемической кристаллической фазы в метастабильную гомохиральную кристаллическую фазу. Иллюстрацией к сказанному может служить 3-(4-(бензо[d]тиазол-2-ил)фенил)-10-пропил-10*H*-фенотиазин [16]: его рацемическая кристаллическая фаза (пр.гр. $Pna2_1$) при нагревании до температуры ~ 180 °C превращается в гомохиральную кристаллическую фазу (пр.гр. $P2_1$). Данному превращению согласно [15] соответствует прирост кристаллохимического приоритета

$$Pna2_1 : P2_1 = 1 : 3{,}73.$$

В-четвёртых, необходимое условие энантиоселективности автокаталитической реакции – способность хиральных молекул её продукта к димеризации. Тогда антиподальность междипольных взаимодействий в альтернативных парных сочетаниях энантиомеров обусловит образование гетерохиральных димеров RS. Гетерохиральная димеризация выводит из реакционного объёма эквимолярные количества правых и левых

энантиомеров. В результате в реакционной системе будет преобладать энантиоформа продукта, возникшая первой (преобладавшая изначально), а альтернативная энантиоформа, появляющаяся позже, расходуется на образование димеров. Сказанное позволяет заключить: достаточное условие энантиоселективности автокаталитической реакции – компенсация убыли энергии Гиббса в ходе (R–S)-димеризации энергией междипольного притяжения в гетерохиральных парах энантиомеров, т.е.

$$\Delta_r G_{R-S} + \frac{N_\mathrm{A} W_+}{2} > 0, \qquad (10)$$

где $\Delta_r G_{R-S}$ – убыль молярной энергии Гиббса при гетерохиральной димеризации, W_+ – энергия притяжения в гетерохиральной паре энантиомеров.

Таким образом, энантиоселективный автокатализ детерминируется подчинённой требованию (10) гетерохиральной димеризацией молекул продукта. Её формальный аналог – спонтанная кристаллизация рацемата в пересыщенном растворе. Следовательно, при такой кристаллизации должен иметь место формальный аналог энантиоселективного автокатализа. А именно, кристаллизация рацемата из его пересыщенного раствора создаст в этом растворе избыток энантиомера, преобладавшего изначально. Это подтверждено экспериментально [17-20].

В завершение вернёмся к проблеме физической реализации индуктора хиральности и проанализируем эффект Кондепуди [21] – образование энантиочистых кристаллов из рацемического пересыщенного раствора в условиях макрохиральности, т.е. при наличии физического воздействия, создающего макроскопическую закрученность.

В классической методике Кондепуди [21] закрученность создаётся ротационным перемешиванием раствора, но её можно создать и иными способами, например, воздействием вращающегося электрического поля. Для осуществления эффекта Кондепуди детерминирующим является не физическое происхождение закрученности, а знак её хиральности.

Чтобы убедиться в сказанном, будем руководствоваться тем, что кристаллическая (т.е. трёхмерно-периодическая) структура образуется только при строго определённой ориентации атомных группировок в каждом решёточном слое, выстраиваемом в процессе роста кристалла из раствора. В случае эффекта Кондепуди речь идёт о формировании хирального кристалла из нехиральных структурных единиц, что обусловливает дополнительное требование: ориентация структурных единиц в кристаллической решётке должна быть хиральной. В силу фундаментального суперпозиционного принципа Кюри макрохиральность определённого вида – R либо S – допускает только идентичную ей хиральность выстраиваемых решёточных слоёв. Вследствие этого знак энантиоморфизма растущих кристаллов задаётся знаком макрохиральности, а её хиральные антиподы – кристаллические зародыши с противоположной хиральностью – растворяются в ходе оствальдовского созревания.

Заключение

1. Управляемая асимметрическая индукция возможна при осуществлении реакции на поверхности гиротропного ферроика [таблица; формулы (2), (3)], а также при образовании кристаллов из рацемического пересыщенного раствора в условиях макрохиральности (эффект Кондепуди). При этом для осуществления эффекта Кондепуди детерминирующим является не физическое происхождение закрученности, а знак её хиральности.

2. В гетерохиральной паре энантиомеров (R + S) имеет место междипольное притяжение, а гомохиральных парах (R + R либо S + S) – междипольное отталкивание. Вследствие этого образование гомохирального кристалла возможно только при условии (7).

3. В случае равновозможности кристаллизации соединения в рацемической и в энантиомерной форме кристаллический рацемат этого соединения имеет по сравнению с его гомохиральными кристаллическими фазами: 1) большую теплоёмкость; 2) большую плотность; 3) большую термодинамическую устойчивость; 4) более высокую температуру плавления.

4. Кинетическая устойчивость метастабильной структуры хирально-молекулярного кристалла соразмерна кристаллохимическому приоритету этой структуры, вследствие чего её трансформация, не ведущая к образованию термодинамически устойчивой фазы, происходит в направлении повышения кристаллохимического приоритета при возникновении состояния (8) либо (9).

5. Необходимое условие энантиоселективности автокаталитической реакции – способность хиральных молекул её продукта к димеризации. Достаточное условие энантиоселективности автокаталитической реакции – компенсация убыли энергии Гиббса в ходе (R–S)-димеризации энергией междипольного притяжения в гетерохиральных парах энантиомеров [неравенство (10)]. При выполнении этих условий в реакционной системе будет преобладать энантиоформа продукта, возникшая первой (преобладавшая изначально). Формальный аналог энантиоселективного автокатализа – рацемическая кристаллизация в пересыщенном растворе, создающая в нём избыток энантиомера, преобладавшего в данном растворе изначально.

Список литературы

1. Avalos M., Babiano R. From parity to chirality: chemical implications revisited // Tetrahedron: Asymmetry. 2000. Vol. 11, № 14. P. 2845–2874.

2. Рудаков О.Б., Королькова Н.В., Полянский К.К., и др. Технохимический контроль в технологии жиров и жирозаменителей. Санкт-Петербург: "Лань", 2020. 576 с.

3. Селеменев В.Ф., Рудакова Л.В., Рудаков О.Б., Беланова Н.А., Мироненко Н.В. Витамины как объекты пищевой химии и фармакологии. Воронеж: "Научная книга", 2022. 212 с.

4. Quack M., Stohner J. Parity violation in chiral molecules // CHIMIA. 2005. Vol. 59, № 7/8. P. 530–538.

5. Izumi Yo., Tai A. Stereo-differentiating reactions: The nature of asymmetric reactions. Tokyo: Kodansha Ltd, 1977. 344 p.

6. Павлов В. А. Асимметрическая индукция в реакциях, катализируемых комплексами металлов // Успехи химии. 2012. Т. 81, № 9. С. 823–854.

7. Швыркова А. С., Садыков Р. У., Гуськов В. Ю. Изотермы адсорбции энантиомеров лимонена на поверхности хиральных кристаллов триглицинсульфата // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2024. № 5. С. 493–500.

8. IUPAC Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1997. P. 582.

9. Tagantsev A. K., Cross L. E., Fousek J. Domains in ferroic crystals. New York-Dordrecht-Heidelberg-London: Springer, 2010. 822 p.

10. Shetty M. The catalytic mechanics of dynamic surfaces: stimulating methods for promoting catalytic resonance // ACS Catalysis. 2020. Vol. 10, № 21. P. 12666–12695.

11. Soai K. Asymmetric autocatalysis. Chiral symmetry breaking and the origins of homochirality of organic molecules // Proceedings of the Japan Academy, Series B. 2019. Vol. 95, № 3. P. 89–110.

12. Asymmetric autocatalysis: The Soai reaction. Eds K. Soai, T. Kawasaki, A. Matsumoto. London: The Royal Society of Chemistry, 2023. 366 p.

13. Дзялошинский И. Е., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Общая теория ван-дер-Ваальсовых сил // Успехи физических наук. 1961. Т. 73, № 3. С. 381–422.

14. Yoshida H., Yuge H. Extending Wallach’s rule: quasi-racemate stability in liquid crystalline metal complexes // ChemPhysChem. 2026. Vol. 27, № 5. P. e202500761-1– e202500761-11.

15. Шабловский Я.О. Преемственность структур при топохимическом синтезе кристаллических материалов // Химия, физика и механика материалов. 2020. Т. 25, № 2. С. 48–78.

16. Oketani R. Spontaneous chiral symmetry breaking in a single crystal // Chemical Science. 2025. Vol. 16, № 38. P. 17621–17629.

17. Blackmond D. G. Asymmetric autocatalysis and its implications for the origin of homochirality // The Proceedings of the National Academy of Sciences. 2004. Vol. 101, № 16. P. 5732–5736.

18. Ushio T., Tamura R. Unusual enantiomeric resolution phenomenon observed upon recrystallization of a racemic compound // Angewandte Chemie. International Edition. 1996. Vol. 35, № 20. P. 2372–2374.

19. De Saint Jores C. Reinvestigating the preferential enrichment of DL-arginine fumarate: new thoughts on the mechanism of this far from equilibrium crystallization phenomenon // Molecules. 2022. Vol. 27, № 24. P. 8652-1–8652-15.

20. Михайлов О. А., Гриднев И. Д. Асимметрическая автоамплификация в реакции Соаи // Успехи химии. 2026. Т. 95, № 5. С. RCR5219-1–RCR5219-39.

21. Kondepudi D. K., Bullock K. L., Digits J. A., Yarborough P. D. Stirring rate as a critical parameter in chiral symmetry breaking crystallization // Journal of the American Chemical Society. 1995. Vol. 117, № 1. P. 401–404.

References

1. Avalos M., Babiano R. From parity to chirality: chemical implications revisited. Tetrahedron: Asymmetry, 2000, vol. 11, no. 14, pp. 2845–2874.

2. Rudakov O.B., Korol'kova N.V., Poljanskij K.K., et al. Tehnohimicheskij kontrol' v tehnologii zhirov i zhirozamenitelej. SPb: "Lan'", 2020. 576 p. (in Russian)

3. Selemenev V.F., Rudakova L.V., Rudakov O.B., Belanova N.A., Mironenko N.V. Vitaminy kak obyekty pishhevoj himii i farmakologii. Voronezh, "Nauchnaja kniga", 2022. 212 p. (in Russian)

4. Quack M., Stohner J. Parity violation in chiral molecules. CHIMIA, 2005, Vol. 59, no. 7/8, pp. 530–538.

5. Izumi Yo., Tai A. Stereo-differentiating reactions: The nature of asymmetric reactions. Tokyo: Kodansha Ltd, 1977. 344 p.

6. Pavlov V. A. Asymmetric induction in reactions catalyzed by metal complexes. Russian Chemical Reviews, 2012, vol. 81, no. 9, pp. 823-854.

7. Shvyrkova A. S., Sadykov R. U., Gus'kov V. Yu. Adsorption isotherms of limonene enantiomers on the surface of chiral triglycinesulphate crystals. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2024, vol. 60, no. 5, pp. 493–500.

8. IUPAC Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1997. P. 582.

9. Tagantsev A. K., Cross L. E., Fousek J. Domains in ferroic crystals. New York-Dordrecht-Heidelberg-London: Springer, 2010. 822 p.

10. Shetty M. The catalytic mechanics of dynamic surfaces: stimulating methods for promoting catalytic resonance. ACS Catalysis, 2020, vol. 10, no. 21, pp. 12666–12695.

11. Soai K. Asymmetric autocatalysis. Chiral symmetry breaking and the origins of homochirality of organic molecules. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 2019, vol. 95, no. 3, pp. 89–110.

12. Asymmetric autocatalysis: The Soai reaction. Eds K. Soai, T. Kawasaki, A. Matsumoto. London: The Royal Society of Chemistry, 2023. 366 p.

13. Dzjaloshinskij I. E., Lifshic E. M., Pitaevskij L. P. General theory of van der Waals forces. Soviet Physics Uspekhi, 1961, vol. 73, no. 3, pp. 381–422.

14. Yoshida H., Yuge H. Extending Wallach's rule: quasi-racemate stability in liquid crystalline metal complexes. ChemPhysChem., 2026, vol. 27, no. 5, pp. e202500761-1– e202500761-11.

15. Shablovsky Ya.O. Succession of structures at topochemical synthesis of crystalline materials. Himiya, fizika i mekhanika materialov [Chemistry, physics and mechanics of materials], 2020. vol. 25, no. 2. pp. 48–78. (in Russian)

16. Oketani R. Spontaneous chiral symmetry breaking in a single crystal // Chemical Science, 2025, vol. 16, no. 38, pp. 17621–17629.

17. Blackmond D. G. Asymmetric autocatalysis and its implications for the origin of homochirality. The Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, vol. 101, no. 16, pp. 5732–5736.

18. Ushio T., Tamura R. Unusual enantiomeric resolution phenomenon observed upon recrystallization of a racemic compound. Angewandte Chemie. International Edition. 1996, vol. 35, no. 20, pp. 2372–2374.

19. De Saint Jores C. Reinvestigating the preferential enrichment of DL-arginine fumarate: new thoughts on the mechanism of this far from equilibrium crystallization phenomenon. Molecules, 2022, vol. 27, no. 24, pp. 8652-1–8652-15.

20. Mikhaylov O. A., Gridnev I. D. Asymmetric autoamplification in the Soai reaction. Russian Chemical Reviews, 2026, vol. 95, no. 5, pp. RCR5219-1–RCR5219-38.

21. Kondepudi D. K., Bullock K. L., Digits J. A., Yarborough P. D. Stirring rate as a critical parameter in chiral symmetry breaking crystallization. Journal of the American Chemical Society, 1995, vol. 117, no. 1, pp. 401–404.

Шабловский Ярослав Олегович – канд. физ.-мат. наук, доцент энергетического факультета Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 691.327.333

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАССОПЕРЕНОСА В ОДНОСТАДИЙНО ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ ПЕНОБЕТОННЫХ СМЕСЯХ

Л.В. Моргун*, Е.В. Дементьева

Донской государственный технический университет,
Российская Федерация, 3440003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

**Адрес для переписки: Моргун Любовь Васильевна, E-mail: konst-lvm@yandex.ru*

Обосновано, что физико-химические особенности массопереноса, протекающие в пенобетонных смесях на этапах гомогенизации сырья и перехода полученных дисперсных систем в упругое состояние, управляют качеством затвердевших бетонов. Выполнен анализ влияния индивидуальных свойств ПАВ на их способность размещаться в объеме газонаполненной пенобетонной смеси и управлять структурой дисперсной газовой фазы. Приведены экспериментальные данные, отражающие влияние одно- и двухстадийной технологий изготовления пенобетонных смесей на скорости их фазовых переходов и сорбционную влажность в затвердевших бетонах. Показано, что эффект снижения сорбционной влажности пенобетона теплоизоляционного назначения за счет одностадийного изготовления может достигать 45,8%. Перечислены причины, обуславливающие установленное различие.

Ключевые слова: массоперенос, пенобетонная смесь, пластическая прочность, сорбционная влажность

PHYSICO-CHEMICAL FEATURES OF MASS TRANSFER IN SINGLE-STAGE FOAM CONCRETE MIXTURES

L.V. Morgun*, E.V. Dementieva

Don State Technical University, Gagarin Square, 1, Rostov-on-Don, 3440003, Russian Federation

**Corresponding author*: *Lyubov V. Morgun, E-mail: konst-lvm@yandex.ru*

It has been substantiated that the physicochemical characteristics of mass transfer occurring in foam concrete mixtures during the stages of homogenization of the raw materials and the transition of the resulting three□phase dispersed systems to an elastic state control the quality of hardened concretes. An analysis has been carried out of the influence of the individual properties of surfactants on their ability to be distributed within the volume of the gas□filled foam concrete mixture and to control the structure of the dispersed gas phase obtained at the stage of raw material homogenization. Experimental data are presented that reflect the influence of single-stage and two-stage technologies for producing foam concrete mixtures on the rate of their phase transitions and the sorption moisture content in hardened concretes. It has been shown that the effect of reducing the sorption moisture content of foam concrete intended for thermal insulation due to single-stage production can reach 45.8%. The reasons that account for the observed difference are listed.

Keywords: mass transfer, foam concrete mixture, plastic strength, sorption moisture content

Введение. Существующие технологии изготовления пенобетонов формально позволяют создавать газонаполненные макроструктуры, состоящие из воздуха, дисперсно распределенного в объеме мелкозернистого бетона [1-3]. Однако по параметрам структурной устойчивости на этапе фазового перехода, показателям достигнутой прочности и ряда других эксплуатационных свойств, согласно ГОСТ 31359, равноплотные материалы могут различаться в разы.

Этот пример показывает, что знание приемов создания макроструктуры недостаточно для прогнозирования конечных свойств материала. Очевидно, что для создания высокопрочного ячеистого бетона необходимо правильно учитывать влияние всех физико-химических взаимодействий, которые управляют компонентами сырья на этапах гомогенизации; фазового перехода получаемых смесей в твердую фазу и т.д.

Без учета перечисленных взаимодействий невозможно объяснить, а затем и разработать технологические приемы, необходимые для получения конкурентных эксплуатационных свойств создаваемых материалов.

Рассмотрим особенности микро- и макроскопических свойств пенобетонных смесей, изготовляемых двух- и одностадийно. Анализ установленных раз-

личий позволит понять влияние особенностей взаимодействия компонентов сырья на эксплуатационные свойства пенобетонов.

Теоретический анализ физико-химических взаимодействий при формировании дисперсной газовой структуры в пенобетонных смесях

Двухстадийная технология пенобетона возникла на рубеже XIX-XX веков как результат смешивания мыльной пены с цементным тестом. До настоящего времени большинство исследователей [1, 2, 5-7] продолжает следовать этому принципу и рассматривать формирование макроструктуры пенобетонов согласно модели «бронирования» пенных пленок [5].

Современные исследователи [8-10] пеносодержащих дисперсных систем относят пены к жидкокристаллическим соединениям, способным проявлять механические свойства, находясь в жидком фазовом состоянии. К условиям сохранения прочности пенных пленок, способных длительно удерживать воздух в дисперсионных средах, А.И. Русанов [8] относил такое соотношение между количеством молекул поверхностно активных веществ (ПАВ) в пенных пленках и межчастичной жидкости, которое не превышает в последней критической концентрации мицеллообразования (ККМ).

В двухстадийной технологии отдельно изготовленная техническая пена при изготовлении пенобетонной смеси должна осторожно смешиваться с цементно-песчаным шликером, жидкая фаза которого **не содержит ПАВ вообще**. Следовательно, в этот момент самый лучший пенообразователь, ранее сформировавший идеальную пену, оказывается в энергетически нестабильной ситуации [9, 10], требующей срочного изменения концентрационного соответствия между ПАВ в пенных пленках и межчастичной жидкости. Поэтому на практике в этой технологии всегда наблюдается **перестройка** структуры дисперсной газовой фазы, которая деструктивно влияет на агрегативную устойчивость трехфазной дисперсной системы потому, что при смешивании шликера с пеной часть молекул ПАВ, ранее расположенных в пенных пленках, переходит в воду цементно-песчаного шликера.

Этот процесс предопределяет разрыв пенных пленок, частичную утрату газовой фазы и неконтролируемый переход молекул ПАВ в воду цементно-песчаного шликера. Возникновение мицелл в жидкой фазе межпленочного пространства обуславливает существенное снижение вязкости воды [8] и, как следствие, сил капиллярного сцепления между дисперсными частицами обеих фаз в период перехода двухстадийно изготовляемых пенобетонных смесей «из вязкого в упругое».

Начальное водосодержание при двухстадийном изготовлении смесей, согласно СН-277, устанавливается по расплыву лепешки и отдельно приготовленная пена дозируется по объему, т.е. весьма приблизительно. Это не позволяет на практике точно дозировать сырье и обеспечивать смесям достаточную структурную устойчивость.

Важно понимать, что после приготовления и укладки смесей в опалубку между дисперсными фазами (пенными пленками, твердыми частицами вяжущего и заполнителей) и дисперсионной средой (водой и расположенными в ней молекулами или мицеллами ПАВ) начинается активный процесс массопереноса, который обусловлен: 1) процессами химического взаимодействия воды с цементом, в результате протекания которого растет концентрация ПАВ в дисперсионной среде; 2) флокуляцией дисперсных частиц твердой фазы, расположенных в дисперсионной среде.

Оба процесса направлены на формирование прочности твердой фазы пенобетона. К причинам того, что при двухстадийном изготовлении пенобетонных смесей не всегда достигается обозначенный результат, относятся:

- погрешности в дозировании воды затворения и пены, предопределенные методами регламентированными СН 277;

- при смешивании технической пены со шликером индивидуальные свойства ПАВ [8, 10] предопределяют возникновение физико-химического процесса по перемещению части молекул ПАВ из структуры пенных пленок в межпленочную жидкость;

- в тех случаях, когда число молекул ПАВ, переместившихся из пенных пленок в межпленочную жидкость, превышает ККМ, они образуют мицеллы

[10], понижающие её вязкость и, как следствие, структурную устойчивость пенобетонной смеси;

- существенное различие в размерах между молекулами воды (0,256 нм) и мицеллами ПАВ (100-200 нм), при наличии последних (рис. 1) в межпленочной жидкости тормозит процесс флокуляции твердых дисперсных частиц, что ведет к увеличению продолжительности фазового перехода пенобетонной смеси «из вязкого в упругое» и создает предпосылки для её расслоения по высоте формуемого слоя.

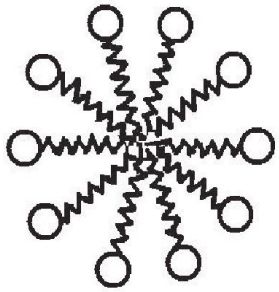
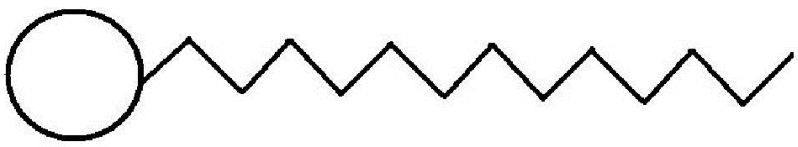


Рис. 1. Схема мицеллы анионактивной ПАВ

При одностадийном изготовлении пенобетонных смесей в высокоскоростных бетоносмесителях пенообразователи вводят после того, как вода затворения физически прочно адсорбирована частицами дисперсной твердой фазы (цементом и заполнителем). Пенообразователь (гетерогенная смесь, состоящая из молекул воды и ПАВ), добавленный к двухфазной смеси (шликеру, состоящему из вяжущего и заполнителя), начинает вовлекать в объем шликера дисперсную газовую фазу.

Причиной воздухововлечения является способность молекул ПАВ в условиях турбулентного (высокоскоростного) перемещаться **только** в направлении поверхности раздела фаз «газ- жидкость» [10].



Гидрофильная часть Гидрофобная часть

Рис. 2. Схема молекулы ПАВ

Ассиметричная структура (рис. 2) и избыточная свободная энергия молекул ПАВ [10, 11] предопределяют их способность физически прочно связывать молекулы газа и свободной воды затворения **только** при высокоскоростном перемешивании.

Экспериментальная часть

В рамках выполнения экспериментальных исследований пенобетонные смеси изготовлялись двух- и одностадийно. Соотношения между расходами цемента и заполнителя 1:1. Расходы воды затворения и пенообразователя для каждой плотности одинаковые. В ходе исследований у пенобетонных смесей контролировались следующие свойства:

- средняя плотность сразу после изготовления в смесителях и после укладки в опалубку, кг/л;

- динамика изменения пластической прочности в течение 3-х часов после укладки смесей в формы.

Контрольные образцы в количестве 6 шт. от каждого замеса твердели в нормальных условиях 28 дней. У затвердевших пенобетонов контролировали:

- среднюю плотность сразу после окончания твердения и в сухом состоянии;

- прочность на сжатие в состоянии равновесной влажности с окружающей образцы лабораторной средой;

- сорбционную влажность по ГОСТ 12852.6-2020. Бетон ячеистый. Метод определения сорбционной влажности (Cellular concrete. Method of hygroscopic moisture determination).

Результаты проведенных работ представлены в таблицах 1 и 2.

Анализ данных, приведенных в табл.1 показывает, что плотность смесей, изготовляемых по обеим технологиям, незначительно различается. Тем не менее в диапазоне проектных марок D500…700 видно, что по величинам плотности сухих затвердевших пенобетонов одностадийно изготовляемые, обладают на 2…5% меньшей плотностью. Полагаем, что причиной обозначенного системного результата являются различия в особенностях массопереноса, изложенные выше.

Таблица 1

Влияние технологии изготовления на скорость фазового перехода в пенобетонных смесях

Средняя плотность пенобетонной смеси, кг/м^3		Плотность сухого бетона, кг/м^3	Пластическая прочность, Па					
сразу после приготовления	уложенной в формы		0	15	30	60	120	180
Пенобетонная смесь изготовлена двухстадийно								
775	780	530	42	50	70	92	145	198
816	843	612	42	52	71	96	147	217
934	938	729	42	55	44	105	172	254
Пенобетонная смесь изготовлена одностадийно								
732	733	504	44	55	73	98	167	225
798	806	567	42	55	77	110	184	241
923	925	717	46	59	84	123	208	317

Динамика фазового перехода (табл. 1), контролируемая через показатели пластической прочности смесей, количественно регистрирует влияние технологии изготовления на свойства пенобетонных смесей. Начальная пластическая прочность всех исследуемых марок практически не различается и находится в диапазоне ошибок измерений. Через 1 час твердения (табл. 1) начинают проявляться количественные различия в скорости отвердевания.

Причины, обуславливающие замедленный рост пластической прочности в двухстадийно изготовленных пенобетонных смесях, заключаются в том, что на этапе смешивания технической пены с цементно-песчаным шликером часть ПАВ из пенных пленок вынуждено перемещается в межчастичную жидкость. Ориентировочный расход начального водосодержания шликера (СН 277) в сочетании с принципом введения пены по объему и низкоскоростным перемешиванием сырья создают предпосылки для образования мицелл ПАВ в межчастичной жидкости пенобетонных смесей. Возникновение мицелл в межчастичной жидкости ведет к замедлению фазового перехода смесей «из вязкого в упругое».

Через три часа твердения различия в показателях (табл. 1) пластической прочности равноплотных бетонных смесей, изготовленных по разным технологиям, достигают 13,6…24,8%, что весьма важно для практической технологии и экономики изготовления изделий из газонаполненных бетонов.

О мере влияния рассматриваемых технологий изготовления пенобетонов на плотность их твердой фазы предлагаем судить по диапазону их сорбционной влажности потому, что пористость, доступная парообразной влаге предельно достоверно отражает качество твердой фазы в ячеистых бетонах [12].

В табл. 2 приведены результаты экспериментальной проверки сорбционных свойств пенобетонов, изготовленных одно и двухстадийно.

Таблица 2

Влияние технологии изготовления на сорбционную влажность пенобетонов

Плотность бетона, кг/м^3		Прочность на сжатие, МПа	Сорбционная влажность (об. %) при относительной влажности воздуха		Коэффициент насыщения пор влагой при максимальной влажности $К_н = W_o/П$
После твердения при φ>97%	сухого		60%	97%	
Пенобетон изготовлен двухстадийно					
706	**530**	1,90	5,031	12,457	0,156
807	**612**	2,48	5,812	10,110	0,132
912	**729**	3,05	6,316	9,703	0,135
Пенобетон изготовлен одностадийно					
654	**504**	1,93	4,929	8,568	0,107
725	**567**	2,41	5,343	8,944	0,116
893	**717**	3,21	6,207	9,115	0,127

Самым информативным показателем качества межпоровых перегородок в полученных пенобетонах является их коэффициент насыщения парообразной влагой, установленный после стабилизации масс контрольных образцов, хранившихся в среде с относительной влажностью воздуха при φ = 97%. Данные, представленные в табл. 2 дают основание утверждать, что межпоровые перегородки одностадийно изготовленных пенобетонов характеризуются худшей способностью сорбировать парообразную влагу. Это чрезвычайно важно для пенобетонов теплоизоляционного назначения, в которых эффект снижения сорбционной влажности достигает 45,8%.

При одностадийном изготовлении слабо связанная вода в процессе химико-физических взаимодействий компонентов сырья оказывается на периферии кластеров из твердых частиц цемента и заполнителя [13], образующих межпоровые перегородки в пенобетонных смесях. При двухстадийном изготовлении

смесей «лишние» молекулы ПАВ при смешивании шликера и пены **не могут** [9, 10] возвращаться на границу раздела «газ-жидкость» из-за низких скоростей гомогенизации сырья. Они образуют обводненные мицеллы внутри межпоровых перегородок, которые после отвердевания смесей превращаются в дополнительные поры, способные сорбировать влагу.

Заключение

Применение закономерностей фундаментальных наук (физической химии, теории кластеров и жидких кристаллов) показали принципиальные различия в процессах структурообразования пенобетонов, изготовленных по разным технологиям. Обоснована управляющая роль ПАВ при сохранении или утрате дисперсной газовой фазы в зависимости от технологии изготовления пенобетонной смеси. Экспериментально подтверждены:

- закономерность избыточного содержания ПАВ в межчастичной жидкости пенобетонных смесей, изготовляемых двухстадийно;

- пониженная склонность к сорбции парообразной влаги в пенобетонах изготовленных одностадийно.

Список литературы

1. Аниканова Т.В., Рахимбаев Ш.М. Пенобетоны для интенсивных технологий строительства: монография. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. 128 с.

2. Шахова Л.Д. Технология пенобетона. Теория и практика: монография. М.: Изд. АСВ. 2010. 248 с.

3. Моргун Л.В. Пенобетон: монография. Ростов-на-Дону, РГСУ. 2012. 154 с.

4. Лаптев Б.И., Горленко Н.П., Сидоренко Г.Н., Дунаевский Г.Е. Информационные взаимодействия в неживой и живой природе. Томск: Изд-во ТГУ, 2000. 107 с.

5. Меркин А.П. Ячеистые бетоны: научные и практические предпосылки дальнейшего развития//Строительные материалы. 1995. №2. С.11-15.

6. Весова Л.М., Кулеш А.Д. Совершенствование ресурсосберегающих технологий на основе использования конструкционно-теплоизоляционных ячеистых бетонов// Инженерный вестник Дона. 2019. №3. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5835

7. Мордич М. М., Батяновский Э. И. Основы оптимизации структуры и свойств пенобетона. С.286-290. https://docviewer.yandex.ru/view/96330080/

8. Русанов А.И. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. СПб: химия, 1992. 280 с.

9. Перцев В.Т. Управление процессами раннего структурообразования бетонов: монография. ВоронежГАСУ, 2006. 234 с.

10. Блинов Л. М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 480 с.

11. Дремук А.П. Коллоидно-химические свойства двойных и тройных смесей ПАВ различной природы. Диссерт. на соиск. уч. ст. к.х.н. по спец. 02.00.11 «Коллоидная химия». М. 2018. 151 с.

12. Перехоженцев А.Г. Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий. Волгоград: ВолгГАСА, 1997. 273 с.

13. Моргун Л.В., Нагорский В.В., Моргун В.Н. Влияние энергетического потенциала фибры на структуру и свойства пенобетонов, изготовляемых по одностадийной технологии // Строительные материалы. 2025. № 5. С. 68–72. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-835-5-68-72

References

1. Anikanova T.V., Rakhimbaev Sh.M. Foam concrete for intensive construction technologies: monograph. Belgorod, BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. 128 p.

2. Shakhova L.D. Technology of foam concrete. Theory and practice: a monograph. Moscow: Publishing House of the DIA. 2010. 248 p.

3. Morgun L.V. Foam concrete: a monograph. Rostov-on-Don, RGSU. 2012. 154 p.

4. Laptev B.I., Gorlenko N.P., Sidorenko G.N., Dunaevsky G.E. Informational interactions in inanimate and living nature. Tomsk: TSU Publishing House, 2000. 107 p.

5. Merkin A.P. Cellular concretes: scientific and practical prerequisites for further development//Building materials. 1995. No. 2. pp.11-15.

6. Vesova L.M., Kulesh A.D. Improvement of resource-saving technologies based on the use of structural and thermal insulation cellular concrete// Engineering Bulletin of the Don. 2019. №3. https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5835

7. Mordich M. M., Batyanovsky E. I. Fundamentals of optimizing the structure and properties of foam concrete. p. 286-290. https://docviewer.yandex.ru/view/96330080/

8. Rusanov A.I. Micelle formation in solutions of surfactants. St. Petersburg: Khimiya Publ., 1992. 280 p.

9. Pertsev V.T. Management of the processes of early structuring of concrete: monograph. Voronezhgasu, 2006. 234 p.

10. Blinov L. M. Liquid crystals: Structure and properties. Moscow: LIBROCOM Book House, 2013. 480 p.

11. Dremuk A.P. Colloidal and chemical properties of double and triple mixtures of surfactants of various nature. Dissertations. for the degree of senior Candidate of Chemical Sciences in spec. 02.00.11 "Colloidal chemistry". Moscow, 2018. 151 p.

12. Perekhozhentsev A.G. Issues of theory and calculation of the humidity state of heterogeneous sections of enclosing structures of buildings. Volgograd: VolgGASA, 1997. – 273 p.

13. Morgun L.V., Nagorskiy V.V., Morgun V.N. The influence of the energy potential of fiber on the structure and properties of foam concrete manufactured using single-stage technology // Building materials. 2025. No. 5. pp. 68-72. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-835-5-68-72

Моргун Любовь Васильевна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные материалы», ДГТУ

Дементьева Екатерина Владимировна – ассистент кафедры «Строительные материалы», ДГТУ

УДК 621.383.5

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ШИРОКОЗОННЫХ ПЕРОВСКИТОВ, РЕГУЛИРУЕМОГО ДОБАВКОЙ L-α-ФОСФАТИДИЛХОЛИНА, ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МЕТОДОМ ДОЗИРУЮЩЕГО ЛЕЗВИЯ

Го Цзыи[1], А.А. Ординарцев[1], О.Б. Кукина[2]

[1]Лаборатория новых материалов для солнечной энергетики, Факультет наук о материалах, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1,
[2]Воронежский государственный технический университет, Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Адрес для переписки: Го Цзыи, e-mail: guozymaterials2021@gmail.com

В работе исследуется применение добавки L-α-фосфатидилхолина (LP) для регулирования кристаллизации широкозонных перовскитных плёнок состава $FA_{0.8}Cs_{0.2}Pb(I0.6Br_{0.4})_3$, изготавливаемых методом дозирующего лезвия. Перовскитные солнечные элементы перспективны благодаря высокой эффективности (свыше 27,3%) и настраиваемой зонной структуре, однако их практическое применение осложняется фазовым разделением галогенидов и сложностью контроля кристаллизации. В качестве решения предложено использование амфифильного биологического ПАВ – LP: его полярная головка эффективно координируется с ионами Pb^{2+}, снижая барьер зародышеобразования и способствуя полному превращению предшественника в целевую перовскитную фазу. При этом в ходе отжига часть молекул LP покидает поверхностный слой плёнки без образования остаточных дефектов, не ухудшая фотоэлектрические свойства. Основное внимание в исследовании уделено оптимизации концентрации добавки LP и раскрытию механизма её влияния на кинетику кристаллизации.

Ключевые слова: широкозонный перовскит; лезвийное нанесение; L-α-фосфатидилхолин; инженерия добавок; кинетика кристаллизации; примесная фаза PbI_2.

STUDY OF THE MECHANISM OF CRYSTALLIZATION WIDE-RANGE PEROVSKITES CONTROLLED BY THE ADDITIVE OF L-α-PHOSPHATIDYLCHOLINE, PRODUCED BY THE DOSING BLADE METHOD

***Guo Ziyi*[1]*, *A.A. Ordinartsev*[1], *O.B. Kukina*[2]**

[1]*Laboratory of new materials for solar energy, Faculty of Materials Sciences, Moscow State University named after M.V. Lomonosova, Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1*

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

Correspondence address: Guo Ziyi, e-mail: guozymaterials2021@gmail.com

The study investigates the use of L-α-phosphatidylcholine (LP) additive to regulate the crystallization of wide-bandgap perovskite films with the composition $FA_{0.8}Cs_{0.2}Pb(I0.6Br_{0.4})_3$, fabricated via the doctor blade method. Perovskite solar cells are promising due to their high efficiency (exceeding 27.3%) and tunable band structure; however, their practical application is hindered by halide phase separation and the complexity of crystallization control. As a solution, an amphiphilic biological surfactant-LP – is proposed: its polar head effectively coordinates with Pb^{2+} ions, reducing the nucleation barrier and promoting the complete conversion of the precursor into the target perovskite phase. At the same time, during the annealing process, some LP molecules gradually leave the film's surface layer without forming residual defects, thus not impairing the photovoltaic properties. The research primarily focuses on optimizing the LP additive concentration and elucidating the mechanism of its influence on the crystallization kinetics.

Key words: wide-gap perovskite; blade application; L α phosphatidylcholine; additive engineering; crystallization kinetics.

Введение. Перовскитные солнечные элементы благодаря своим превосходным фотоэлектрическим свойствам и пригодности к растворной обработке стали фокусом исследований в области фотоэлектрических технологий третьего поколения. Материалы с общей формулой ABX_3, где A – метиламмоний, формамидин, цезий или их смеси, B – обычно свинец или олово, X – галогенидные анионы, привлекают внимание благодаря уникальной и легко настраиваемой зонной структуре. На сегодняшний день сертифицированная эффективность

однопереходных перовскитных элементов превысила 27,3% [1]. Среди многочисленных перовскитных композиций широкозонные перовскиты (ширина запрещённой зоны Eg > 1,6 эВ) имеют большие перспективы в качестве верхних элементов тандемных батарей. Композиция $FA_{0.8}Cs_{0.2}Pb(I_{0.6}Br_{0.4})_3$ с шириной запрещённой зоны около 1,68–1,72 эВ привлекает внимание благодаря отличным фотоэлектрическим свойствам и термической стабильности [2, 3]. Однако ключевой проблемой широкозонных перовскитов является фазовое разделение: из-за значительной разницы ионных радиусов Br^- и I^- миграция и агрегация галогенидных ионов под действием света приводят к разделению на богатые I и богатые Br фазы. Кроме того, кинетика кристаллизации широкозонных композиций более сложна и чувствительна к условиям формирования плёнок.

Литературный обзор

С точки зрения технологического процесса, центрифугирование не подходит для непрерывного производства больших площадей [4]. Поэтому разработка масштабируемых технологий, совместимых с промышленным производством, таких как лезвийное нанесение и щелевое нанесение, является ключевым шагом на пути к практическому применению перовскитной фотоэлектрической технологии. Введение в перовскитный предшественник низкомолекулярных органических добавок широко признано эффективной стратегией улучшения качества кристаллизации и морфологии плёнок. Такие добавки обычно обладают особыми молекулярными структурами и могут выполнять несколько функций в растворе предшественника: с одной стороны, они могут образовывать координационные связи или действовать как шаблоны с ионами свинца, снижая барьер зародышеобразования и способствуя равномерной кристаллизации; с другой стороны, в процессе последующего отжига молекулы добавок могут постепенно покидать поверхностный слой плёнки, не оставляя заметных остатков, что не влияет на фотоэлектрические свойства приборов. Типичными добавками являются: фенилэтиламмоний йодид (PEAI) и его производные – они могут внедряться между слоями перовскитной решётки, способствуя низкоразмерной кристаллизации, а затем частично удаляться с поверхности во время отжига, улучшая

качество плёнки; бутиламмоний йодид (BAI) и другие короткоцепочечные алкиламмонийные соли – могут временно координироваться с ионами свинца в предшественнике, контролируя скорость зарождения, и полностью удаляться промывкой или термообработкой после отжига; изопропиламмоний йодид – улучшает качество плёнки за счёт контроля направления кристаллизации и распределения размеров зёрен; добавки на основе солей предшественников, такие как MABr и FAI, могут поставлять дополнительные катионы для стабилизации структуры и одновременно регулировать скорость кристаллизации [5,6]. В данном исследовании выбрана добавка L-α-фосфатидилхолин (LP) для регулирования кристаллизации широкозонных перовскитных плёнок, изготовленных методом дозирующего лезвия. Биологические поверхностно-активные вещества благодаря своим амфифильным свойствам (гидрофильная головка и гидрофобный хвост) могут образовывать упорядоченные самоорганизующиеся структуры в растворе предшественника, регулируя скорость испарения растворителя и процесс кристаллизации. В данном исследовании выбрана добавка L-α-фосфатидилхолин (LP) для регулирования кристаллизации. Систематически изучен механизм регулирования кинетики кристаллизации широкозонных перовскитных плёнок $FA_{0.8}Cs_{0.2}Pb(I_{0.6}Br_{0.4})_3$, изготовленных методом дозирующего лезвия. Полярная головка фосфохолина в молекуле LP содержит несколько атомов кислорода и положительно заряженный центр азота, что позволяет ей эффективно координироваться с Pb^{2+}, снижая барьер зародышеобразования и способствуя полному превращению предшественника в целевую перовскитную фазу. В то же время в процессе последующего отжига часть молекул LP может постепенно покидать поверхностный слой плёнки, не оставляя заметных остатков, что не ухудшает фотоэлектрические свойства. Основное внимание уделено оптимизации концентрации добавки LP и механизму регулирования кристаллизации.

Экспериментальная часть

Экспериментальные материалы. Химические реактивы, чистота и номера CAS, использованные в работе, приведены в таблице 1. PbI_2 (CAS 10101-63-0, чистота ≥ 99,99%), $PbBr_2$ (CAS 10031-22-8, ≥ 99,99%), FAI (CAS 879643-71-7,

≥ 99,99%), CsI (CAS 7789-17-5, ≥ 99,999%) приобретены у Xi'an Baolai Optoelectronic Technology Co., Ltd., Macklin Biochemical Technology Co. и Lanhit Chemical Reagent Co. L-α-фосфатидилхолин (CAS 8002-43-5, ≥ 99%) приобретён у Sigma и QUSEG. Основные растворители: DMF (N,N-диметилформамид, безводный), DMSO (диметилсульфоксид, безводный), NMP (N-метилпирролидон, безводный) – приобретены у Sigma-Aldrich и Aladdin Reagent.

Таблица 1

Использованные химические реактивы

Реактив	Чистота, %	Поставщик
PbI_2	≥99,99	Xi'an Baolai
$PbBr_2$	≥99,99	Macklin
FAI	≥99,99	Lanhit
CsI	≥99,999	Lanhit
L-α-фосфатидилхолин	≥99	Sigma, QUSEG
DMF (безводный)	≥99,8	Sigma-Aldrich
DMSO (безводный)	≥99,9	Sigma-Aldrich
NMP (безводный)	≥99,5	Aladdin

Технология подготовки образцов

Подготовка подложки и дырочно-транспортного слоя. В работе использованы коммерческие ITO-стёкла (удельное сопротивление ~15 Ом/кв, Zhuhai Kaivo) в качестве проводящей подложки. ITO-стёкла последовательно очищались моющим средством (Cif и пищевая сода) с растиранием, ультразвуковой обработкой в деионизированной воде, ацетоне и изопропаноле по 15 минут, затем продувались азотом и подвергались УФ-озоновой обработке (длина волны 185/254 нм) в течение 25 минут для улучшения смачиваемости поверхности.

В качестве дырочно-транспортного слоя использован самоорганизующийся монослой MeO-2PACz ([2-(3,6-диметокси-9H-карбазол-9-ил)этил]фосфоновая кислота). MeO-2PACz растворили в безводном изопропаноле (IPA) до концентрации 0,3 мг/мл, отфильтровали через PTFE-фильтр 0,22 мкм, затем нанесли на ITO-подложку центрифугированием при 4000 об/мин в течение 30 секунд с последующим от-

жигом при 100 °C в течение 5 минут для формирования плотного SAM-слоя. Для дальнейшей оптимизации интерфейса после первичного нанесения и термофиксации провели повторное центрифугирование с безводным IPA при 4000 об/мин в течение 30 секунд для удаления физически адсорбированных избыточных молекул MeO-2PACz, оставляя только монослой, ковалентно связанный с поверхностью ITO через фосфонатные группы. Этот шаг эффективно уменьшил толщину SAM-слоя, обеспечив почти полное монослойное покрытие, что снизило интерфейсное сопротивление и сохранило хорошую селективность по дыркам.

Приготовление раствора перовскитного предшественника. Целевая композиция – $FA_{0.8}Cs_{0.2}Pb(I_{0.6}Br_{0.4})_3$. Навески FAI, CsI, PbI_2 и $PbBr_2$ брали в стехиометрическом соотношении и растворяли в смеси DMF/DMSO (9:1 об./об.) или DMF/DMSO/NMP (8:1:1) до общей концентрации 1,4 М. Растворы перемешивали на магнитной мешалке при комнатной температуре в течение 12 часов до полного растворения, затем фильтровали через PTFE-фильтр с диаметром пор 0,45 мкм.

Добавку LP предварительно растворяли в DMF до концентрации маточного раствора 2 мг/мл. Затем её добавляли в раствор предшественника в необходимых пропорциях для получения семи градиентов концентрации: 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 и 0,35 мг/мл.

Изготовление перовскитных плёнок методом дозирующего лезвия

Перовскитные плёнки изготавливали на собранной лабораторной установке для дозирующего лезвия в обычной атмосфере воздуха (относительная влажность 30-50%, температура 22-25 °C). Подложку ITO/MeO-2PACz размером 30 × 30 мм закрепляли на вакуумном столике. Зазор между лезвием и подложкой устанавливали равным 150 мкм. С помощью автоматического дозатора 27 мкл раствора перовскитного предшественника наносили в виде капли на поверхность подложки перед лезвием.

Лезвие перемещали с постоянной скоростью 3 мм/с. Во время движения лезвия одновременно подавали поток газообразного азота под углом примерно

5 ° к поверхности (расход ≈ 5 л/мин), который действовал как противорастворитель, инициируя начало испарения и кристаллизации непосредственно за движущимся лезвием. После завершения нанесения влажную плёнку сразу переносили на горячую плиту для двухстадийного отжига: сначала 100 °C в течение 5 минут для удаления остаточных растворителей, затем повышение температуры до 125 °C и выдержка в течение 5-25 минут для полной кристаллизации перовскитной фазы. После охлаждения подложку с перовскитом механически разделяли на четыре фрагмента размером 15 × 15 мм.

Методы исследования

Кристаллическая структура перовскитных плёнок анализировалась с помощью рентгеновской дифракции (XRD, Bruker D8 Advance, Cu Kα). Морфология поверхности и поперечных сечений изучалась на полевом эмиссионном сканирующем электронном микроскопе (SEM, Zeiss Merlin). Фотоэлектрические характеристики измерялись на системе Ossila при стандартном освещении AM 1.5G (100 мВт/см^2) с использованием квазистационарного метода I-V (QSS-IV). Площадь приборов 15 × 15 мм (рис. 1).

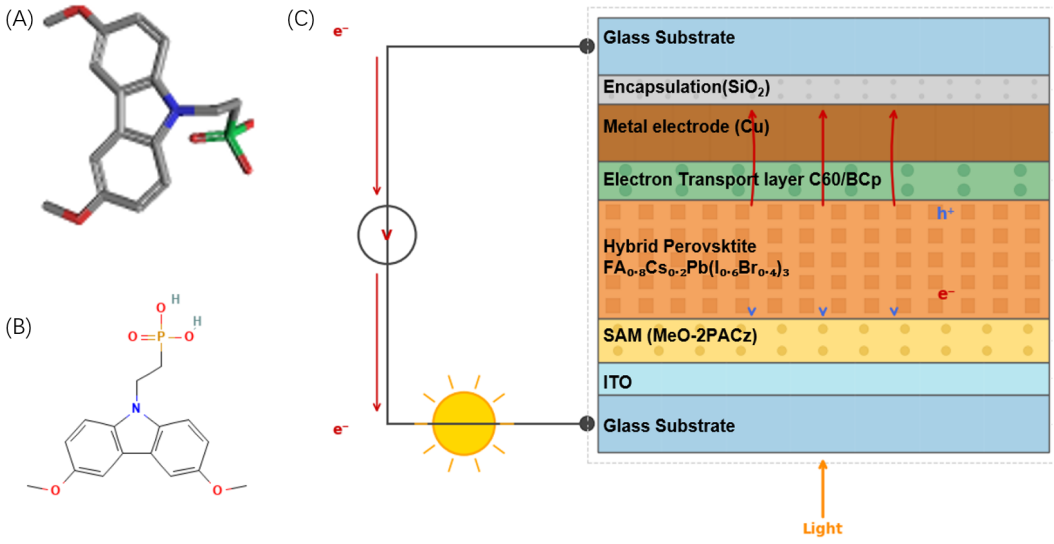


Рис. 1. Структура перовскитных плёнок.

(A) и (B) химическая структура L-α-фосфатидилхолина (LP). Схематическое молекулярное представление LP; (C) перовскитный солнечный элемент, изготовленный в данной работе

Результаты и обсуждение

Анализ дефектов плёнки без добавки. Сначала использовали бинарную систему растворителей DMF:DMSO = 9/1 (об./об.) для приготовления 1,4 М раствора предшественника $FA_{0.8}Cs_{0.2}Pb(I_{0.6}Br_{0.4})_3$, нанесение лезвием при скорости 3 мм/с без добавок. Визуально наблюдались серьёзные дефекты: поверхность плёнки имела множество трещин и разрывов, распределённых по типу «черепашьей спины» или сетки, что указывает на неравномерное испарение растворителя в процессе нанесения и накопление внутренних напряжений. Кроме того, распределение кристаллитов было крайне неравномерным с заметной агрегацией крупных и мелких частиц, что также ухудшает фотоэлектрические свойства.

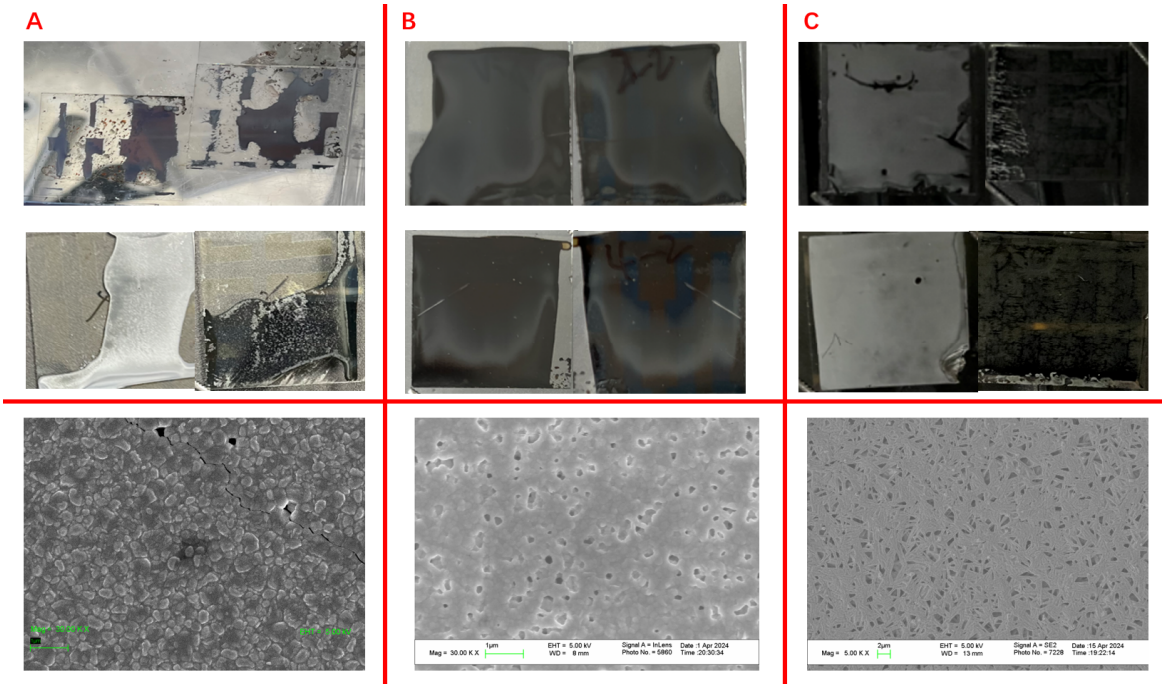


Рис. 2. Типичные дефекты перовскитных тонких плёнок, полученных методом лезвийного нанесения без добавления LP и других веществ, при различных масштабах, и соответствующие SEM-изображения.

(A) Плохая адгезия плёнки к подложке после нанесения лезвием раствора предшественника, не содержащего LP (L-α-фосфатидилхолин); (B) улучшенное смачивание за счёт снижения скорости лезвия, но неудовлетворительная кристаллизация с многочисленными порами, наблюдаемыми на поверхности; (C) сохранение большого количества сольватов и игольчатых кристаллов, прикреплённых к поверхности после изменения концентрации предшественника

XRD-анализ показал, что помимо характерного дифракционного пика перовскита ($2\theta \approx 14{,}1$ °, соответствует плоскости (110)) присутствует сильный пик остаточного PbI_2 при $2\theta \approx 12{,}7$ °, а также сигнал неперовскитной промежуточной фазы вблизи $2\theta \approx 10{,}0$ °. Это указывает на то, что фазовый переход от предшественника к перовскиту в системе с преобладанием DMF неполный, присутствует много непрореагировавших исходных веществ и побочного PbI_2.

SEM-изображения подтверждают это: на поверхности видны многочисленные агрегаты растворённого вещества и значительные трещины, что демонстрирует слабую контролируемость процессов зародышеобразования и кристаллизации при лезвийном нанесении. Эти дефекты серьёзно снижают эффективность и долговременную стабильность приборов (рис. 2).

Корректировка параметров процесса дозирующего лезвия. Для решения указанных проблем оптимизация проводилась одновременно по двум направлениям: физический процесс нанесения и химическая среда раствора. Со стороны физики процесса: снижение скорости движения лезвия (с исходных 5–8 мм/с до 3 мм/с) увеличило время удержания раствора перед лезвием и улучшило равномерность плёнки. Одновременно во время нанесения включали поток азота, чтобы кристаллизация, индуцированная анти-растворителем, проходила синхронно с движением лезвия. Со стороны химической среды: для преодоления ключевого барьера — плохой растекаемости перовскитного предшественника на плёнке MeO-2PACz — в последующих экспериментах ввели третий растворитель и добавили LP для регулирования кристаллизации.

Инженерия добавок: механизм действия LP и оптимизация. В качестве добавки для регулирования кристаллизации выбран L-α-фосфатидилхолин (LP) благодаря его амфифильным свойствам (гидрофильная головка и гидрофобный хвост), которые позволяют ему образовывать упорядоченные самоорганизующиеся структуры в растворе предшественника, снижая барьер зародышеобразования. Для определения оптимальной концентрации приготовлены растворы с концентрациями LP 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 и 0,35 мг/мл.

SEM-наблюдения и статистика размера зёрен (с использованием программного обеспечения Image J) показали: после добавления LP раствор полностью покрывал ITO-подложку, формируя плотный тёмноокрашенный перовскитный слой. При концентрациях в диапазоне 0,2–0,25 мг/мл достигалась наилучшая гладкость поверхности, плотная структура, равномерное распределение зёрен, отсутствие макроскопических дефектов. Образец с 0,25 мг/мл имел немного лучшую морфологию, чем с 0,2 мг/мл, тогда как образец с 0,2 мг/мл демонстрировал лучшую воспроизводимость характеристик.

При концентрации LP 0,3 мг/мл на поверхности плёнки начинали появляться лёгкие следы «смачивания», а толщина плёнки становилась крайне мала. При дальнейшем увеличении концентрации до 0,35 мг/мл на поверхности наблюдалось значительное количество пор и дефектов, что свидетельствует о чрезмерном влиянии добавки на кинетику испарения растворителя и нарушении равновесия между скоростью кристаллизации и формированием плотной плёнки. Таким образом, оптимальный диапазон концентраций LP определён как 0,2–0,25 мг/мл, причём наилучшие комплексные характеристики (морфология, воспроизводимость и фотоэлектрические параметры) достигаются при 0,2 мг/мл.

Таблица 2

Влияние концентрации LP на морфологию и толщину перовскитных плёнок

Концентрация LP, мг/мл	Средняя толщина, мкм (по Image J)	Качество поверхности
0 (контроль)	0,55–0,62	Грещины, неравномерная, остаточный PbI_2
0,05	0,52–0,58	Незначительное улучшение, остаточные дефекты
0,1	0,46–0,53	Неравномерная, частичное улучшение
0,15	0,42–0,52	Улучшенная, умеренная плотность
0,2	0,38–0,45	Плотная, гладкая, оптимальная
0,25	0,31–0,40	Плотная, гладкая, хорошая, но менее воспроизводимая
0,3	0,22–0,28	Чрезмерно тонкая, следы смачивания, начало появления пор
0,35	0,15–0,22	Крайне тонкая, значительные поры и дефекты

Механизм регулирования кристаллизации LP и его связь с примесной фазой PbI_2. XRD-анализ показал, что в образцах без добавки LP или с недостаточ-

ной добавкой (< 0,15 мг/мл) присутствует сильный остаточный пик PbI_2 при $2\theta \approx 12{,}7°$, что свидетельствует о неполном фазовом переходе в перовскит. При увеличении концентрации LP до 0,2 мг/мл и выше пик PbI_2 значительно ослабевает, что указывает на то, что LP способствует полному превращению предшественника в целевую перовскитную фазу (рис. 3).

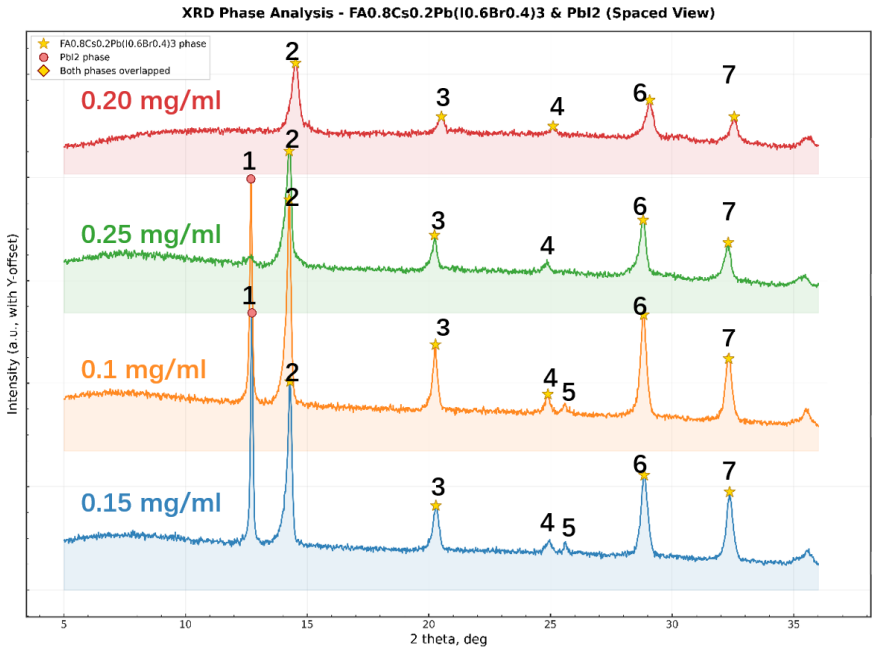


Рис. 3. Дифрактограммы перовскитных плёнок,
полученных с различными концентрациями LP (0,1; 0,15; 0,2; 0,25 мг/мл)

Механизм можно объяснить следующим образом: полярная головка фосфохолина в молекуле LP содержит несколько атомов кислорода и положительно заряженный центр азота, что позволяет ей эффективно координироваться с Pb^{2+}. Такое координационное взаимодействие в растворе уже связывается с Pb^{2+}, образуя промежуточные комплексы, тем самым снижая энергию активации фазового перехода в перовскит и способствуя полному превращению предшественника. Одновременно амфифильность LP регулирует коллоидные свойства раствора и скорость испарения растворителя, делая процесс кристаллизации более равномерным и предотвращая преждевременное выделение или неполное реагирование PbI_2 на границах зёрен. Кроме того, предполагается, что

LP может пассивировать границы зёрен, подавляя обратную реакцию разложения перовскита на PbI_2. Таким образом, введение LP способствует полной кристаллизации перовскита как с кинетической, так и с термодинамической точек зрения, эффективно снижая содержание примесной фазы PbI_2.

Пик 1 – PbI_2; пики 2,3,4,6,7 – целевая перовскитная фаза; пик 5 – предположительно $FAPbI_3$. При 0,1 и 0,15 мг/мл присутствует значительное количество PbI3, тогда как при 0,2 и 0,25 мг/мл доминирует стабильная целевая фаза.

Конечная структура плёнки и характеристики приборов. При оптимальной концентрации LP (0,2 мг/мл) и оптимизированной системе растворителей DMF : DMSO : NMP = 8 : 1 : 1 полученные перовскитные плёнки на поперечных SEM-изображениях демонстрируют однородную плотную структуру сквозных столбчатых кристаллитов без видимых полостей или расслоений. Основные фотоэлектрические параметры приборов: напряжение холостого хода (Voc) поддерживалось в диапазоне 1,15-1,22 В, максимальная стабильная эффективность преобразования (η) достигла 13,56%.

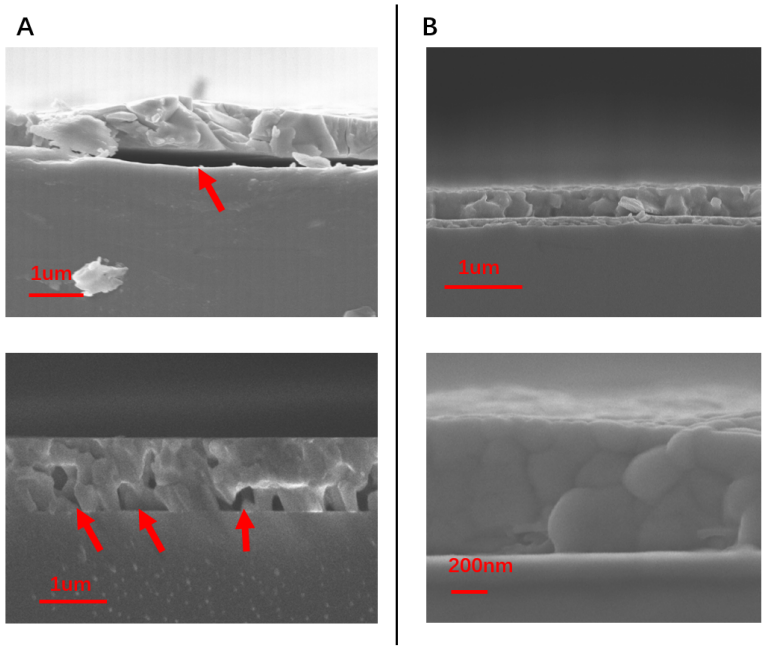


Рис. 3. Морфология образца без добавки LP (1 мкм): неравномерное формирование плёнки и нерегулярные примесные области на поверхности

(A) Неравномерная плёнка, стрелками показаны зазоры между перовскитом и подложкой, а также сотовидные дефекты; (B) Морфология перовскитных тонких плёнок, приготовленных методом лезвийного нанесения с использованием раствора предшественника с LP 0,2мг/мл, при различных масштабах (1 мкм, 200 нм)

Все процессы изготовления в данном исследовании проводились не в строго инертной атмосфере перчаточного бокса, что демонстрирует потенциальные преимущества разработанного метода дозирующего лезвия с точки зрения устойчивости к окружающей среде и масштабируемости.

Хотя достигнуты удовлетворительные значения напряжения холостого хода, плотность тока короткого замыкания приборов заметно ниже теоретических значений, что связано главным образом с плотностью дефектов внутри плёнки и с тем, что интерфейсные свойства электронно-транспортного слоя C_{60}/BCP требуют дальнейшей оптимизации (рис. 4). Видимы равномерные кристаллы, гладкая поверхность, отсутствие видимых дефектов и пустот.

Заключение

В данном исследовании систематически изучен механизм регулирования кинетики кристаллизации широкозонного перовскита $FA_{0.8}Cs_{0.2}Pb(I_{0.6}Br_{0.4})_3$ при лезвийном нанесении с использованием добавки L-α-фосфатидилхолина (LP).

Без добавки LP плёнки, изготовленные лезвийным нанесением, имели серьёзные дефекты: многочисленные трещины, разрывы, крайне неравномерное распределение кристаллитов, а также заметный остаточный PbI_2, обнаруженный методом XRD.

Путём систематической оптимизации в широком диапазоне концентраций (0–0,35 мг/мл) определён оптимальный диапазон концентраций LP 0,2–0,25 мг/мл. При концентрации 0,2 мг/мл достигаются наилучшие комплексные показатели: плёнки обладают оптимальной гладкостью, плотной структурой, равномерным размером зёрен, отсутствием макроскопических дефектов и наилучшей воспроизводимостью характеристик. При концентрации 0,3 мг/мл и выше наблюдается критическое уменьшение толщины плёнки и появление значительных пор и дефектов на поверхности.

Полярная головка фосфохолина в молекуле LP координируется с Pb^{2+} , снижая энергетический барьер фазового перехода в перовскит и способствуя полному превращению предшественника в целевую фазу. Примесный PbI_2

наблюдается в основном при слишком малом количестве LP; при концентрации LP ≥0,2 мг/мл его содержание значительно снижается.

Получены приборы с напряжением холостого хода 1,18 В и эффективностью преобразования 13,56%; герметизированные приборы сохраняли > 85% эффективности после семи месяцев хранения на воздухе.

Изготовление приборов в данной работе проводилось не в строгой инертной атмосфере перчаточного бокса, что демонстрирует потенциальные преимущества разработанного метода дозирующего лезвия с точки зрения устойчивости к условиям окружающей среды и возможности масштабирования.

Список литературы

1. Sveinbjörnsson K. и др. Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cell with 28.7% Efficiency Using Industrial Silicon Bottom Cells // ACS Energy Lett. American Chemical Society, 2022. Т. 7, № 8. С. 2654–2656.

2. K. Pious J. и др. Efficient Blade-Coated Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells via Interface Engineering // ACS Appl. Mater. Interfaces. American Chemical Society, 2025. Т. 17, № 16. С. 24040–24047.

3. Zhao X. и др. Understanding of chlorine incorporation in wide-bandgap perovskites for efficient and stable solar cells // Nano Research Energy. Tsinghua University Press, 2025. Т. 4, № 3.

4. Zhuang J. и др. Rapid Surface Reconstruction in Air-Processed Perovskite Solar Cells by Blade Coating // Advanced Materials. John Wiley and Sons Inc, 2024. Т. 36, № 6.

5. Yang X. и др. Blade-Coating Perovskites for Tandem Devices: Liquid Mechanism, Film Formation, and Performance // Solar RRL. John Wiley and Sons Inc, 2025. Т. 9, № 10.

6. Wang Z. и др. Grain Boundary Engineering Enables 22.2%-Efficient Inverted Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells in Ambient Air // ACS Nano. 2025. Т. 19, № 50. С. 42526–42537.

References

1. Sveinbjörnsson K. et al. Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cell with 28.7% Efficiency Using Industrial Silicon Bottom Cells // ACS Energy Lett. American Chemical Society, 2022, vol. 7, no. 8, pp. 2654–2656.

2. K. Pious J. et al. Efficient Blade-Coated Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells via Interface Engineering // ACS Appl. Mater. Interfaces American Chemical Society, 2025, Vol. 17, No. 16, pp. 24040–24047.

3. Zhao X. et al. Understanding of chlorine incorporation in wide-bandgap perovskites for efficient and stable solar cells // Nano Research Energy. Tsinghua University Press, 2025. Vol. 4, No. 3.

4. Zhuang J. et al. Rapid Surface Reconstruction in Air-Processed Perovskite Solar Cells by Blade Coating // Advanced Materials. John Wiley and Sons Inc, 2024. Vol. 36, No. 6.

5. Yang X. et al. Blade-Coating Perovskites for Tandem Devices: Liquid Mechanism, Film Formation, and Performance // Solar RRL. John Wiley and Sons Inc, 2025. Vol. 9, No. 10.

6. Wang Z. et al. Grain Boundary Engineering Enables 22.2%-Efficient Inverted Wide-Bandgap Perovskite Solar Cells in Ambient Air // ACS Nano. 2025. T. 19, No. 50. pp. 42526–42537.

Го Цзыи – аспирант, Лаборатория новых материалов для солнечной энергетики, Факультет наук о материалах МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: guozymaterials2021@gmail.com;
Ординарцев Артём Алексеевич – аспирант, Лаборатория новых материалов для солнечной энергетики, Факультет наук о материалах МГУ имени М.В. Ломоносова
Кукина Ольга Борисовна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов ВГТУ.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 629.33:620.193:62-192

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ С УЧЕТОМ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ

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

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

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

Представлен всесторонний обзор современных методов защиты автомобильных корпусов от коррозии. Проработаны физико-химические основы процесса ржавления, факторы, влияющие на долговечность срока службы поверхностного слоя металлического изделия. Выполнен сравнительный анализ применения возможных защитных материалов (ингибиторы, грунты, мастики, воски) и электрохимических методов (протекторная и катодная защита) защиты. Даются рекомендации применения технологий защиты автомобильного оборудования с учетом систематизированных данных о барьерных и активных технологиях антикоррозионной обработки для повышения срока службы автомобиля.

Ключевые слова: коррозия, электрохимия, оцинкование, катафорез, ингибиторы, антикоррозийная защита, лакокрасочное покрытие, долговечность кузова.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF METHODS FOR INCREASING THE DURABILITY OF AUTOMOTIVE EQUIPMENT, TAKING INTO ACCOUNT PROTECTION AGAINST CORROSION

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

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

** Corresponding author*: *Irina M. Vinokurova, E-mail: vinokurovai@bk.ru*

A comprehensive overview of modern methods for protecting automotive bodies against corrosion is presented. It examines the physical and chemical foundations of the rusting process and the factors influencing the service life of the surface layer of a metal component. A comparative analysis of potential protective materials (inhibitors, primers, mastics, waxes) and electrochemical methods (sacrificial and cathodic protection) is provided. Recommendations are provided for the application of automotive equipment protection technologies, taking into account systematized data on barrier and active anti-corrosion treatment technologies to increase vehicle service life.

Keywords: corrosion, electrochemistry, galvanizing, cataphoresis, inhibitors, anti-corrosion protection, paintwork, body durability.

Автомобилестроительная отрасль представляет собой одну из самых значительных материальных инвестиций в жизни современного общества, а площадки машиностроительного производства представляют собой сложную инженерную систему [1-15], находящуюся в области постоянного воздействия негативных [16-30] окружающих факторов. Скрытая, но неумолимая война между сохранением целостности металлического механизма и природными элементами ведется на микроскопическом уровне, где исход каждого сражения определяют фундаментальные законы физической химии и технологически грамотные разработки защиты инженеров-конструкторов.

С точки зрения физической химии, коррозионные реакции – это самопроизвольно протекающие процессы в условиях существования и работы техники, возникающие в состоянии работы системы, приводящие к состоянию с минимальной свободной энергией Гиббса. Большинство металлов в природе находятся в виде оксидов, сульфидов или других соединений. Промышленное получение чистых металлов требует значительных энергозатрат, что делает их термодинамически неустойчивыми в условиях земной атмосферы во время технологической эксплуатации. Поэтому, во избежание возвращения металла в его естественное (стабильное химическое состояние), необходимо протекционно

отрабатывать возможные механизмы защитных мероприятий металлических конструкций.

Коррозия составляющих частей автомобиля в автомобилестроении, создает основной урон для эксплуатационных конструкций, а именно кузова, так-так является контактным электрохимическим процессом, в котором при расчетах определения возможных показаний (изменений потенциалов) в технологическом узле автомобиля, в период эксплуатации, необходимо пользоваться классическим уравнением (1) Нернста:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{ox}}{a_{red}}, \quad (1)$$

где E – потенциал электрода, В; E^0 – стандартный потенциал, В; R – газовая постоянная (8.314 Дж/моль·К); T – температура (К); n – число электронов; F – постоянная Фарадея (96485 Кл/моль); a_{ox} ,a_{red} – активности окисленной и восстановленной форм.

Для рассмотрения протекания возможных технологических процессов большей части электрохимической коррозии, в модельном виде необходимо отрабатывать три обязательных компонента (рис. 1), образующих гальванический элемент (ГЭ):

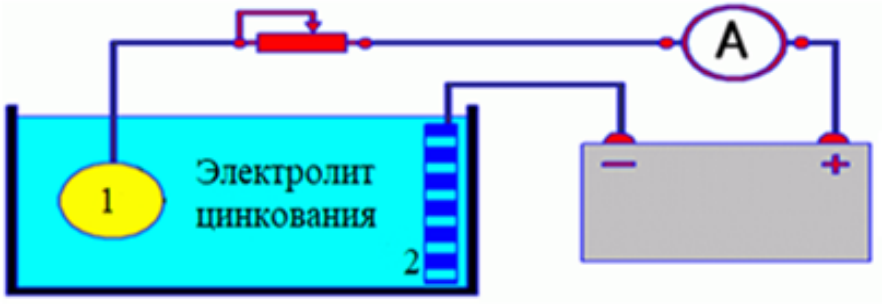


Рис. 1. Схематичное представление процесса цинкования автомобиля:
1 – жертвенный электрод (Zn); 2 – покрываемое изделие

Для первого компонента (анода) – участок поверхности, где происходит окисление металла с переходом его ионов в раствор, необходимо значение электродного потенциала отрицательнее, чем для третьего компонента (катода) – участок, где происходит восстановление окислительных компонентов среды.

Весь процесс протекает в электропроводной среде-электролите (второй компонент), а именно, ионопроводящей среде, обеспечивающей перенос заряда между анодом и катодом.

На анодных участках поверхности протекает реакция окисления металла. Для оборудования из железа (основного компонента стали), каркасная система корпуса машины подвергается системному разрушению, схематически процесс выглядит:

$$\text{анодная реакция} \quad Fe^0 - 2\bar{e} \rightarrow Fe^{2+}, \tag{2}$$

Высвобождаемые при этом электроны перемещаются по металлу к катодным участкам, где потребляются в реакциях восстановления. Конкретный механизм катодного процесса зависит от кислотности среды (значения pH) и концентрации кислорода.

В кислых средах (pH < 4), характерных для промышленных районов или при контакте с агрессивными реагентами, преобладает реакция водородной деполяризации (3). В нейтральных и щелочных средах (pH 4-14), наиболее распространенных в условиях эксплуатации автомобиля, основную роль играет кислородная деполяризация (4):

$$\text{катодные реакци } 2H^+ + 2\bar{e} \rightarrow H_2\uparrow, \tag{3}$$

$$O_2 + 2H_2O + 4\bar{e} \rightarrow 4OH^-, \tag{4}$$

Продукты анодной и катодной реакций взаимодействуют между собой, образуя начальные соединения ржавчины (5). Далее нестабильный $Fe(OH)_2$ окисляется кислородом воздуха, формируя гидратированный оксид железа (III) — ту самую рыхлую, не обладающую защитными свойствами ржавчину (6):

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2, \tag{5}$$

(гидроксид железа II)

$$4Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 \cdot H_2O + 2H_2O, \tag{6}$$

(гидратированный оксид железа)

Особенно опасный вид коррозии возникает при электрохимическом контакте разнородных металлов. В образующейся гальванической паре анодом

становится материал с более отрицательным стандартным электрохимическим потенциалом E°.

Направление и интенсивность коррозии предсказываются с помощью ряда стандартных электродных потенциалов (ряд напряжений металлов табл. 1). Рассмотрим ключевые потенциалы (относительно стандартного водородного электрода) для металлов машиностроительных агрегатов Zn-Fe, Al-Fe, Fe-Cu:

Таблица 1

Стандартные электродные потенциалы некоторых металлов

Металл	Значение потенциала, В	Металл	Значение потенциала, В
Цинк: Zn/Zn^{2+}	- 0,76 В	Олово: Sn/Sn^{2+}	- 0,14 В
Алюминий: Al/Al^{3+}	- 1,66 В	Свинец: Pb/Pb^{2+}	- 0,126 В
Железо: Fe/Fe^{2+}	- 0,44 В	Медь: Cu/Cu^{2+}	+ 0,34 В

Сравнительный анализ гальванической пары Zn-Fe показывает, что при контакте цинка и железа анодом будет цинк и это послужит основой в проектировании протекторной защиты изделия из железа. А контакт железа с медью (например, в элементах электрооборудования), определяет железо (-0,44) анодом и резко ускоряет его коррозию, в связи с большим отрицательным значением по отношению к меди (+ 0,34).

Катафорез (катодное электроосаждение) – процесс осаждения частиц полимерной дисперсии на катоде (кузове автомобиля) под действием постоянного электрического поля. Частицы грунта представляют собой коллоидные системы с зарядом +15 ÷ +50 мВ (дзета-потенциал).

Рассмотрим возможные варианты защитных механизмов осаждения.

Электрофорез – это электрохимический метод нанесения лакокрасочных покрытий, при котором заряженные частицы пигмента и смолы под действием электрического поля равномерно осаждаются на металлической поверхности кузова, обеспечивая высокую проникающую способность в труднодоступные полости и щели для защиты от скрытой коррозии.

Коагуляция – это процесс слипания (агрегации) коллоидных частиц загрязнений или компонентов электролита с образованием более крупных хлопь-

ев, что используется в системах очистки промывных вод и в технологии электроосаждения для управления структурой формируемого покрытия.

Электрокоагуляция – это метод интенсификации образования защитных пленок или удаления коррозионно-активных примесей из рабочих жидкостей путем пропускания электрического тока через дисперсную систему, приводящий к разрушению устойчивости коллоидов и их осаждению на электродах.

Полимеризация – это химическая реакция соединения мономеров в длинные макромолекулярные цепи, лежащая в основе отверждения современных антикоррозионных грунтов-эпоксидов и полиуретановых эмалей, обеспечивающая формирование плотного, эластичного и химически стойкого барьерного слоя (табл. 2) на металле.

Таблица 2

Исходные данные (условные для одного среднестатистического кузова)

Параметр	Обозначение	Значение
Толщина слоя обычного грунта (стандарт)	δ_1	18 мкм
Толщина слоя улучшенного грунта (электрофорез с добавками)	δ_2	22 мкм (+22 %)
Скорость коррозии в скрытых полостях (стандарт)	V_1	0,15 мм/год
Скорость коррозии с улучшенным покрытием	V_2	0,09 мм/год
Допустимая предельная потеря толщины металла	Δкр	0,5 мм
Стоимость одного кузова (металлоемкость)	Ц	120 000 руб.
Стоимость капитального ремонта при сквозной коррозии	Ср	45 000 руб.
Годовой объем выпуска	N	50 000 шт.

Расчет увеличения срока службы (долговечности) до достижения критической коррозии $T=\Delta_{кр}VT=V\Delta_{кр}$. (7)

Базовый вариант $T_1=0,5/0,15=3,3T_1=0,5/0,15=3,3$ года.

Предлагаемый вариант: $T_2=0,5/0,09=5,6T_2=0,5/0,09=5,6$ года.

Увеличение ресурса: $\Delta T=5,6-3,3=+2,3$ года,

$\Delta T=5,6-3,3=+2,3$ года (прирост ~ 70 %).

где ΔT – прирост (увеличение) срока службы: $\Delta T= T_2 – T_1$; T_1 – срок службы в базовом (стандартном) варианте покрытия; T_2 – срок службы в предлагаемом (улучшенном) варианте покрытия.

Математическое моделирование технологического процесса нанесения покрытия сложных поверхностей проводим по разработанному (рис. 2) нами алгоритму.

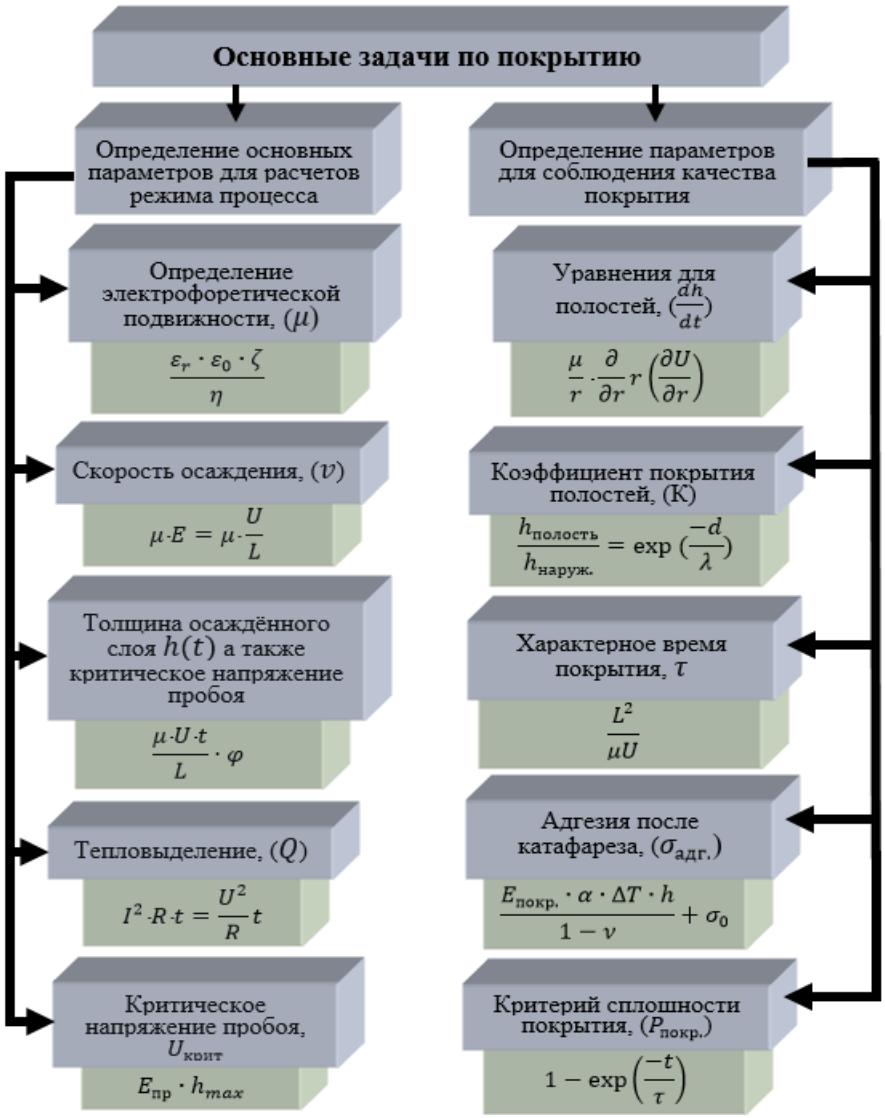


Рис. 2. Модельная схема определения показателей режима нанесения защитного покрытия относительно заданных характеристик качества поверхностного слоя

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды (~78 для воды); ε_0 – диэлектрическая постоянная (8.85×10^{-12} Ф/м); ζ – дзета-потенциал (В); η – вязкость дисперсии (Па·с); v – линейная скорость осаждения (м/с); E – напряжённость поля (В/м); U – напряжение (В); L – расстояние между электродами (м); φ – объёмная доля твёрдой фазы в дисперсии (0,15-0,25); $E_{пр}$ – пробивная напряжённость грунта (15-25 МВ/м); I – ток (А); R – сопротивление ванны (Ом); m – масса электролита (кг); C_p – теплоёмкость (≈ 4180 Дж/кг·К для воды), d – глубина полости (м); λ – характеристическая длина (0,01 – 0,05 м); σ_0 – начальная адгезия (15-25 МПа для эпоксидных грунтов)

Даже на однородном металле могут возникать коррозионные элементы из-за неоднородности среды. Классический пример – щелевая коррозия (рис. 3), происходящая в зазорах, под прокладками, в местах нахлеста листового металла. Внутри такого зазора – щели доступ кислорода затруднен, его концентрация падает. Такие участки становятся анодами по отношению к хорошо аэрируемым поверхностям снаружи, где эффективно протекает катодная реакция кислородной деполяризации. Это объясняет, почему наиболее интенсивное разрушение начинается именно в стыках, скрытых полостях и зазорах кузова.

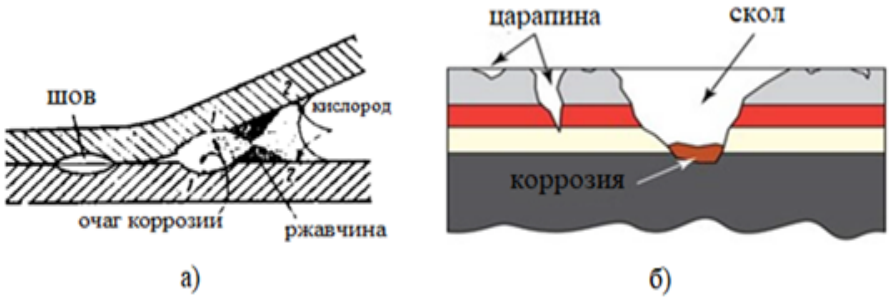


Рис. 3. Возникновение коррозии в месте повреждения: а – щелевая коррозия; б – нарушение лакокрасочного покрытия

Защита от коррозии начинается задолго до того, как автомобиль сходит с конвейера, а именно, на этапе проектных разработок сочленения механизмов и физико-математических расчетов условий изготовления и работы того ли иного металлического изделия.

Легирование стали: добавление в сталь легирующих элементов (хром, никель, молибден, медь) способствует образованию на поверхности плотной, сплошной оксидной пленки – пассивационного слоя. Данный слой обладает крайне низкой растворимостью и высокой адгезией к основному металлу, что резко снижает скорость как анодных, так и катодных процессов. Хром, например, при содержании более 12%, делает сталь «нержавеющей».

Инженеры конструкторских бюро борются с коррозией через рациональное проектирование, с учетом показателей изменения потенциалов, в зависимости от pH среды рис. 4 рекомендуют следующие инновационные решения:

1 – исключение или герметизация влаго- и грязеулавливающих полостей;

2 – обеспечение свободного стока воды и легкого доступа для нанесения защитных материалов;

3 – использование оцинкованной стали для наиболее уязвимых элементов (пороги, двери, крылья);

4 – применение пластиковых подкрылков, брызговиков и дефлекторов для физической защиты от абразивного воздействия;

5 – нанесение на сталь покрытия из более активного металла – это классический метод активной электрохимической защиты.

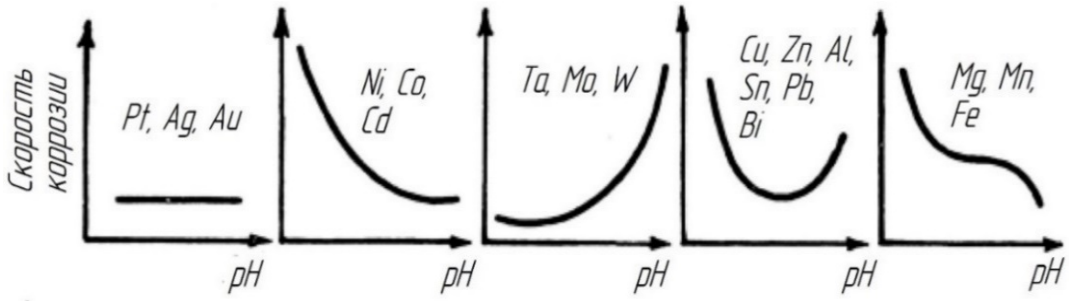


Рис. 4. Зависимость скорости коррозии от pH среды

Рассмотрим подробнее применение процесса цинкования (анодное покрытие) (рис. 5 а, б): поскольку потенциал цинка (-0.76 В) отрицательнее потенциала железа (-0.44 В), в образующейся паре цинк становится анодом и корродирует, «жертвуя» собой для защиты стали. Даже при повреждении покрытия и обнажении основы, цинк продолжает защищать сталь, предотвращая подпленочную коррозию. Ток в этой гальванической паре смещает потенциал стали в отрицательную область, в так называемую зону иммунитета на диаграмме Пурбе, где термодинамически невозможно растворение железа.

Изучим катодные покрытия на основе олова, никеля и хрома, по отношению к железу данные покрытия (металлы) имеют потенциал положительнее, чем у защищаемого материала, поэтому они защищают металл лишь как барьер. В случае повреждения такого покрытия возникает крайне неблагоприятная гальваническая пара, где железо становится анодом, и его коррозия в месте дефекта резко ускоряется.

Эти методы направлены на создание между металлом и средой непроницаемого или трудно проницаемого слоя. Наиболее важным из всех рассмотренных ниже методов является электрофоретический процесс защиты (табл. 3), его нанесение обеспечивает 100% покрытие даже в самых труднодоступных полостях и создаёт слой с исключительно высокой адгезией и коррозионной стойкостью.



Рис. 5. Технологический процесс нанесения покрытия при цинковании автомобиля

Таблица 3

Разновидности способов нанесения покрытий

Варианты приемов защиты	Описание применения способа	Эксплуатационные характеристики
Фосфатирование	обработка стальной поверхности растворами фосфатов металлов, цинка или марганца	на поверхности формируется мелкокристаллический, прочно сцепленный с основой слой нерастворимых фосфатов, состоящий из соединений типа $Zn_3(PO_4)_2$
Лакокрасочные покрытия (ЛКП)	нанесение нескольких слоев покрытия, содержащих компоненты полимеров	защитное действие происходит по закону физики полимеров и коллоидной составляющей
Нанесение слоя катафорезного грунта	проводится погружение кузова в ванну с водной дисперсией эпоксидных или акриловых смол; осаждение частиц грунта на металлическую поверхность производится при постоянном напряжении 300-400 В	электрофоретический процесс обеспечивает 100% покрытие даже в самых труднодоступных полостях и создаёт слой с исключительно высокой адгезией и коррозионной стойкостью.
Нанесение слоя акрилового грунта-наполнителя	производится выравнивание микронеровностей поверхности	обеспечение стойкости к механическим воздействиям, ударам каменной дроби, и защиты от ультрафиолетового излучения

Нанесение базового слоя (эмали)	вводятся компоненты, содержащие пигменты, определяющие цвет автомобиля	алюминиевые или перламутровые чешуйки, создают дополнительный барьерный эффект
Этап нанесения лака (акрилового или полиуретанового)	финишный слой формируется плотной полимерной сеткой и контролируется показателем коэффициента диффузии влаги (D)	барьерная эффективность в отношении воздействия влаги достигается высокой твёрдостью, эластичностью, химической и УФ-стойкостью покрытия

Другим общеизвестным способом защиты является введение ингибиторов – веществ (табл. 4), которые в малых концентрациях адсорбируются на поверхности металла и резко замедляют коррозионный процесс изделия.

Таблица 4

Варианты водимых компонентов – ингибиторов

Типы	Технологические защитные свойства
Анодные ингибиторы	(хроматы, нитриты, фосфаты) пассивируют поверхность, блокируя анодные участки.
Катодные ингибиторы	(соли цинка, соединения Mg, Ca) образуют нерастворимые осадки в катодных зонах, затрудняя доступ окислителя.
Летучие ингибиторы коррозии (VCI)	соединения с низким давлением пара, которые сублимируются и конденсируются на металле, создавая защитную мономолекулярную пленку. Они эффективны для защиты закрытых полостей.

Эти материалы – ингибиторы предназначены для обработки внутренних поверхностей порогов, лонжеронов, дверей и других закрытых полостей. Их эффективность определяется комплексом физико-химических свойств.

Физика процесса и соблюдение необходимых показателей для идеального состава определяется, исходя из охвата следующих критериев определения показателей качества наненсенных покрытий:

1) низкое поверхностое натяжение и высокая смачивающая способность для проникновения в микротрещины и вытеснения влаги;

2) высокий краевой угол смачивания ($\theta > 90^{\circ}$) после нанесения, что обеспечивает гидрофобный эффект;

3) тиксотропные свойства – способность разжижаться при механическом воздействии (распыление) и загустевать в состоянии покоя, что предотвращает стекание с вертикальных поверхностей.

Химический состав: основу часто составляют ингибированные масла, парафины, воски и летучие ингибиторы. Они создают эластичное, «дышащее» покрытие, которое не трескается при деформациях кузова и не забивает дренажные отверстия.

Эти материалы предназначены для днища, колесных арок и других зон, подверженных ударным и абразивным нагрузкам.

Резино-битумные мастики: создают толстый, ударопоглощающий слой. Защитные свойства резино-битумных мастик представляются согласно показателей (табл. 5).

Таблица 5

Защитные свойства резино-битумных мастик

Показатель	Способ определения критерия
Адгезионная прочность	Определяется по методу отрыва
Твердость по Шору	Обычно 50-80 ед. типа А, обеспечивающая стойкость к абразивному износу
Эластичность	Удлинение при разрыве > 200%, предотвращающей растрескивание при вибрациях
ПВХ- и каучуковые пластизоли	Используются на заводах для защиты сварных швов и мест с повышенной деформацией. Отверждаются при высокотемпературной сушке, образуя очень прочное, стойкое к деформациям покрытие

Защита автомобильного кузова от коррозии эволюционировала от примитивных методов вроде покрытия олифой до высокотехнологичной междисциплинарной науки, объединяющей электрохимию, материаловедение, коллоидную химию и физику полимеров. Современный подход — это не борьба со следствиями, а проактивное управление процессом на основе глубокого понимания его фундаментальных основ.

Наиболее изучены и хорошо зарекомендовавшие себя практически в современных условиях следующие пять методов (табл. 6), представленные на схеме (рис. 6).

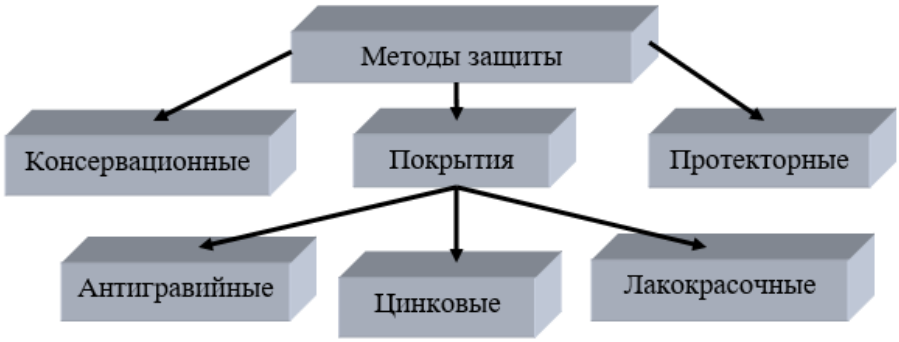


Рис. 6. Практические приемы защиты металлических изделий

Первым и самым надежным способом является цинкование, где покрытие работает по принципу жертвенного анода, а именно, цинк имеет наиболее отрицательный электрохимический потенциал, чем сталь, поэтому в местах повреждения покрытия корродирует именно он, а не металл кузова. Срок службы цинкового покрытия составляет от 10 до 30 лет в зависимости от технологии нанесения, толщины слоя и условий работы сборочной единицы автомобиля.

Таблица 6

Методы защиты металлов от коррозии

Метод / Материал	Принцип защиты	Срок службы
Цинкование	Анодирование (цинк защищает сталь)	10–30 лет
Лакокрасочное покрытие (с грунтом)	Барьер (изоляция от среды)	5–10 лет
Антигравий / Мастика	Механический барьер (от ударов)	5–8 лет
Консервация полостей (воск/масло)	Вытеснение влаги + ингибитор	1–3 года
Протекторные аноды	Электрохимическая защита (током)	1–5 лет

Второй метод - лакокрасочные покрытия (ЛПК), включая катодное грунтование и финишные эмали. Их защита основана на барьерном принципе: они физически изолируют металл от контакта с кислородом и влагой. Качественное заводское ЛКП способно прослужить 5-10 лет до появления первых признаков коррозии.

Третий способ – антигравийные покрытия и мастики на основе ПВХ, битума или полиуретана. Это тоже барьерная защита, но рассчитанная на механические нагрузки. Такие материалы наносят на днище, пороги и арки, чтобы защитить кузов от ударов песка и гравия. Срок их службы составляет 5-8 лет.

Четвертый метод - консервация скрытых полостей восками или ингибированными маслами. Эти составы работают по принципу вытеснения влаги и торможения электрохимических реакций за счет специальных присадок. Они проникают в сварные швы и полости, но требуют регулярного обновления каждые 1-3 года.

Пятый, наименее распространенный на автомобилях метод - протекторная защита с использованием жертвенных анодов из цинка или магния. Она создает гальваническую пару и обеспечивает электрохимическую защиту током, но эффективна только в присутствии электролита (воды с солями) и требует замены анодов каждые 1-5 лет.

Коррозионные процессы на поверхности изделий, это не просто эстетическая проблема, это системное заболевание металлического организма автомобиля, способное за несколько лет разрушить его структурную целостность, безопасность и рыночную стоимость. Только понимая глубинные механизмы этого разрушительного процесса и применяя комплексный, научно обоснованный подход, можно обеспечить эффективную защиту кузова на протяжении всего жизненного цикла транспортного средства.

Инвестируя в такую комплексную, научно обоснованную защиту [4-10], владелец не просто сохраняет внешний вид автомобиля. Он инвестирует в сохранение его конструкционной прочности [8-17], пассивной безопасности, функциональной надежности [18-28] и, в конечном итоге, — в максимальное сохранение его стоимости как инженерного актива на долгие десятилетия. Война с ржавчиной может быть выиграна, но только тем, кто сражается на стороне науки.

Системный подход к разработке комплексных мер защиты кузова на всех этапах жизненного цикла автомобиля, позволит существенно продлить срок службы техники и сохранить эксплуатационные потребительские свойства на более длительном промежутке времени.

Список литературы

1. Семенов В.И.Технология антикоррозийной обработки автомобилей. - М.: Академия, 2021. 378 с.

2. Лапин А.А. Применение риск-ориентированного подхода в обеспечении управления безопасностью на машиностроительном предприятии / А.А. Лапин, Н.О. Попов, И.М. Винокурова, О.К. Битюцких // В сборнике: Современные инновации в технике и технологиях. Сборник научных статей Международной научно-технической конференции. Курск, 2025. С. 172-177.

3. 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.

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

5. Четверикова Д.А. Исследование перспектив применения наноконструированных покрытий в машиностроительной промышленности / Д.А. Четверикова, Д.В. Титова, Н.А. Хонькин, И.М. Винокурова // В сборнике: Качество в производственных и социально-экономических системах АПК. Сборник научных статей 3-й Международной научно-технической конференции. Курск, 2025. С. 75-83.

6. 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.

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

8. 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.

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. 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.

11. Хонькин Н.А. Оптимизационные работы по регулированию регенерационных процессов для рабочего объема электролита при комбинированной и электрохимической обработке деталей машиностроения / Н.А. Хонькин, И.М. Винокурова // Студент и наука. 2025. № 4 (35). С. 131-136.

12. Карачев Д.А. Изучение возможностей улучшения свойств материалов для авиакосмических агрегатов и оборудования/ Д.А. Карачев, 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.

13. 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.

14. Наумова Ю.С. Антикоррозионные материалы для защиты нефти и газотрубопроводов от коррозии / Ю.С. Наумова, И.М. Винокурова, О.В. Куликова // сб. науч. тр. XVIII международная научно-практическая конференция. «Гражданская оборона и природно-технические системы. Воронеж, 2022. С. 432-436.

15. Карпова Е.И., Лобанов М.Н. Нанотехнологии в создании материалов для экстремальных условий эксплуатации // Перспективные материалы. 2023. № 4. С. 22-33.

16. Бардин И.В., Томашов Н.Д. Теория коррозии и защита металлов. М.: Академия, 2020. 512 с.

17. Милютин А.М. Методы предотвращения аварий на магистралях нефтегазопроводов / А.М. Милютин, Ю.С. Наумова, И.М. Винокурова // сб. нау. 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.

18. 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.

19. 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 KEM. С. 529-537.

20. 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.

21. Винокурова И.М., Спиридонов Б.А. Исследование коррозионно-электрохимического поведения родированного титана в кислой среде / И.М. Винокурова, Б.А. Спиридонов // межвуз. сбор. науч. тр.: Системы жизнеобеспечения и управления в чрезвычайных ситуациях. ГОУВПО "ВГТУ". Междунар. акад. наук экологии безопасности человека и природы. Ч. 1. Воронеж, 2008. С. 162-165.

22. 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.

23. Винокурова, И. М. Коррозионно-электрохимическое поведение титана, сплава ВТ3-1 и родированного титана / И.М. Винокурова, Б.А. Спиридонов// Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 4, № 5. 2008. С. 53-55.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

References

1. Semenov V.I. Technology of anti-corrosion treatment of cars. Moscow: Akademiya, 2021. 378 p.

2. Lapin A.A., Popov N.O., Vinokurova I.M., Bityutskikh O.K. Application of a risk-based approach in ensuring safety management at a machine-building enterprise // In the collection: Modern innovations in engineering and technology. Collection of scientific articles of the International Scientific and Technical Conference. Kursk, 2025. pp. 172-177.

3. 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.

4. 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.

5. Chetverikova D.A., Titova D.V., Honkin N.A., Vinokurova I.M. Research of prospects of application of nanoconstructed coatings in the machine-building industry. // In the collection: Quality in the industrial and socio-economic systems of the agro-industrial complex. Collection of scientific articles of the 3rd International Scientific and Technical Conference. Kursk, 2025. pp. 75-83.

6. Borodina V.S. Prospects for providing a high-quality surface layer in electrochemical metal processing for aircraft construction / V.S. Borodina, I.M. Vinokurova, E.V. Smolentsev // collection. scientific. work. 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.

7. 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.

8. Borodina V.S. Analysis of alternative production methods for processing metal products of the aircraft manufacturing complex / V.S. Borodina, I.M. Vinoku-

rova, 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.

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.

10. 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.

11. Honkin N.A. Optimization work on the regulation of regeneration processes for the working volume of electrolyte in combined and electrochemical processing of machine-building parts / N.A. Honkin, I.M. Vinokurova // Student and science. 2025. No. 4 (35). pp. 131-136.

12. 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.

13. 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.

14. Naumova Yu.S. Anticorrosive materials for protecting oil and gas pipelines from corrosion / Yu.S. Naumova, I.M. Vinokurova, O.V. Kulikova // Collection of scientific papers of the XVIII International scientific and practical conference. "Civil defense and natural-technical systems. Voronezh, 2022. pp. 432-436.

15. Karpova E.I., Lobanov M.N. Nanotechnology in the creation of materials for extreme operating conditions // Promising materials. 2023. No. 4. pp. 22-33.

16. Bardin I.V., Tomashov N.D. Theory of corrosion and protection of metals. Moscow: Akademiya, 2020. 512 p.

17. Milyutin A.M. Methods of preventing accidents on oil and gas pipelines / A.M. Milyutin, Yu.S. Naumova, 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.

18. Gorozhankina O.V. On the issue of the structural features 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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. VSTU. International Academy of Sciences of Ecology, Safety of Man and Nature. Part 1. Voronezh, 2008. pp. 162-165.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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 Conference: Technologies and Techniques: ways of innovative development. Voronezh, 2025. pp. 289-295.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

Винокурова Ирина Михайловна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры химии и химической технологии материалов, ВГТУ

Хонькин Никита Андреевич– студент 3-го курса, группа бКТО-231, факультет Машиностроения и аэрокосмической техники, ВГТУ

Четверикова Дарина Александровна – студент 2-го курса, группа бНГД-232, факультет Машиностроения и аэрокосмической техники, ВГТУ

Титова Дарья Викторовна – студент 2-го курса, группа бНГД-232, факультет Машиностроения и аэрокосмической техники, ВГТУ

УДК 504.75

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ЖИВОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

***А.А. Лукин*[1,2], *Л.А. Штриккер* [1], *В.Н. Николаев* [1]**

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

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

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

В статье рассматривается проблема высокой себестоимости производства биодизеля из традиционного растительного сырья на фоне глобального энергетического кризиса. Анализируются перспективы перехода к использованию отходов животного происхождения (животные жиры с боен, птицефабрик и мясоперерабатывающих предприятий) как экономически выгодной альтернативы. Описывается химический состав ОЖП, их влияние на физико-химические свойства конечного продукта (цетановое число, вязкость, температура застывания) и уровень выбросов оксидов азота по сравнению с растительными аналогами. Особое внимание уделяется технологии переэтерификации, а также сравнительному анализу гомогенных и гетерогенных катализаторов. Приведены актуальные статистические данные о мировом производстве и потреблении биодизеля за 2023–2024 годы, прогноз развития рынка до 2034 года, а также результаты экспериментальных исследований двигателей при использовании топливных смесей на основе животных жиров. Обосновывается вывод о том, что переработка ОЖП обеспечивает не только снижение производственных затрат, но и решение этических вопросов утилизации органических отходов.

Ключевые слова: биодизельное топливо, отходы животного происхождения (ОЖП), животный жир, переэтерификация, гетерогенные катализаторы, цетановое число, экология, утилизация отходов

USING ANIMAL WASTE AS A PROMISING RAW MATERIAL FOR BIODIESEL FUEL PRODUCTION

A.A. Lukin[1,2], L.A. Shtrikker[1], V.N. Nikolaev[1]

[1]South Ural State Agrarian University, 75 Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia
[2]South Ural State University (National Research University), 76 Lenin Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russia

** Corresponding author: Alexander A. Lukin, e-mail: lukin3415@gmail.com*

This article examines the high cost of producing biodiesel from traditional plant-based feedstocks amid the global energy crisis. This article analyzes the potential for transitioning to the use of animal waste (animal fats from slaughterhouses, poultry farms, and meat processing plants) as a cost-effective alternative. It describes the chemical composition of animal waste, its impact on the physicochemical properties of the final product (cetane number, viscosity, pour point), and the level of nitrogen oxide emissions compared to plant-based alternatives. Particular attention is paid to transesterification technology, as well as a comparative analysis of homogeneous and heterogeneous catalysts. It presents current statistics on global biodiesel production and consumption for 2023–2024, a market forecast to 2034, and the results of experimental studies of engines using animal fat-based fuel blends. It concludes that recycling animal waste not only reduces production costs but also addresses the ethical issues of organic waste disposal.

Key words: biodiesel fuel, animal waste (AW), animal fat, transesterification, heterogeneous catalysts, cetane number, ecology, waste disposal.

Введение. В условиях затяжного энергетического кризиса, который усугубляется высоким уровнем потребления и сохраняющейся зависимостью от нефтепродуктов, экологическая ситуация продолжает ухудшаться. В ответ на эти вызовы научное сообщество на протяжении многих лет активно исследует устойчивые альтернативы традиционному ископаемому топливу.

Биодизельное топливо рассматривается как экологически чистая замена, однако его производство обходится дороже по сравнению с ископаемыми аналогами, что создаёт серьёзные препятствия, особенно в развивающихся государствах.

Основной причиной повышенной стоимости является высокая доля сырьевых материалов: растительное масло составляет около 75 % затрат, а спирт - 12,6 % от стоимости катализаторных материалов. Столь значительные расходы сдерживают потенциальное крупномасштабное внедрение биодизеля на коммерческом уровне.

Основная часть

В развитых странах цена биодизельного топлива варьируется от полутора до трёх раз выше по сравнению с дизельным топливом из нефти [1].

Несмотря на более высокую стоимость, биодизель продолжает производиться во всём мире благодаря своим существенным преимуществам. К ним относятся улучшенные смазывающие свойства, нетоксичность, способность к биологическому разложению, минимальное загрязнение окружающей среды, углеродная нейтральность и экологическая безопасность. Кроме того, высокое содержание кислорода и высокая температура вспышки делают биодизель эффективным топливом для сжигания [2].

В 2022 году мировое производство биодизеля распределилось следующим образом: лидером стала Индонезия с объёмом 13,65 миллиарда литров, за ней следуют Бразилия (6,77 миллиарда литров), Соединённые Штаты Америки (6,14 миллиарда литров), Германия (4,01 миллиарда литров), Китай (2,43 миллиарда литров), Аргентина (2,17 миллиарда литров) и Испания (1,35 миллиарда литров) (данные за 2024 год).

Глобальное потребление биодизельного топлива (рис. 1) выросло с 2,2 миллиарда литров в 2004 году до 65,86 миллиарда литров в 2023 году. Прогнозы указывают, что к 2030 году этот показатель превысит 75 миллионов метрических тонн (статистика 2024 года). Рынок биодизеля также расширяется: по оценкам, его стоимость достигнет 226,6 миллиарда долларов США к 2034 году по сравнению с 116,3 миллиарда долларов США в 2024 году (Fact.MR, 2024). Растущий спрос на биодизель подчёркивает необходимость снижения производственных издержек.

Это стимулировало активные исследования по использованию отходов в качестве альтернативного сырья для производства биодизеля [3].

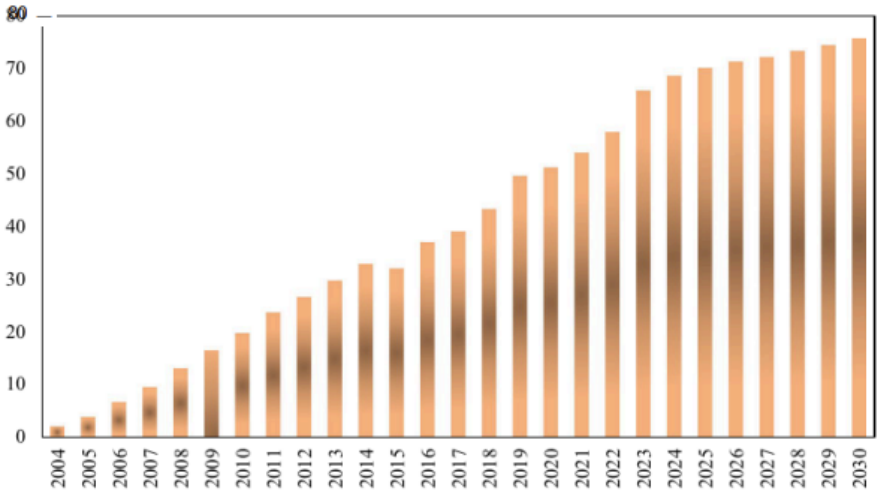


Рис. 1. Мировое потребление биодизельного топлива с 2004 по 2023 год с прогнозом до 2030 года (ось X – $м^3$, ось Y – год)

Переэтерификация – реакция между триглицеридами (например, растительными маслами, животными жирами, маслом микроводорослей и отработанными маслами) и спиртом (обычно метанолом) в присутствии катализаторов – является стандартным методом производства биодизельного топлива [4]. Чтобы снизить затраты и избежать использования сырья, которое может угрожать продовольственной безопасности, исследователи изучают недорогие и возобновляемые источники.

Различные дешёвые сырьевые материалы, такие как пищевые отходы, липиды микроводорослей, отработанная кофейная гуща, масло калофиллума индофиллум, свиной жир, касторовое масло и отходы животного происхождения (ОЖП), недавно были исследованы для производства биодизеля. Среди этих вариантов ОЖП привлекли значительное внимание из-за их существенно низкой стоимости и широкой доступности [5].

Биодизель, полученный из ОЖП, обладает лучшими смазывающими свойствами и более высоким цетановым числом по сравнению с обычным ископаемым топливом. Кроме того, его использование способствует снижению

выбросов углекислого газа (CO_2), который является основным парниковым газом, составляющим до 72 % от всех парниковых газов [6].

Экономический анализ показывает, что биодизель, произведённый из ОЖП, более рентабелен, чем тот, который получен из растительного масла, что делает его конкурентоспособной альтернативой традиционному ископаемому топливу. Например, исследования показали, что стоимость биодизеля из ОЖП составляет от 0,04 до 0,50 доллара США за литр, тогда как биодизель из растительного масла стоит от 0,60 до 0,80 доллара США за литр [7,8].

Животные жиры представляют собой ценное сырьё для изготовления биодизельного топлива, что обеспечивает экономические, экологические и энергетические преимущества. Эти жиры, признанные непригодными для употребления человеком, часто применяются в качестве недорогого корма для скота [9]. ОЖП с кожевенных заводов, боен и мясоперерабатывающих предприятий рассматриваются как перспективный источник сырья для биодизеля благодаря их химическому составу, устойчивости к коррозии, высокой теплотворной способности и возобновляемой природе. Распространённые типы ОЖП включают говяжий жир, отходы свиного сала, бараний жир, козий жир, птичий жир, жир от производства бройлеров и другие.

Обычно ОЖП утилизируются путём сжигания или захоронения на свалках. Однако эти методы не считаются экологически устойчивыми. В качестве альтернативы ОЖП могут использоваться для компостирования или как сырьё для производства биоэнергии, в частности биодизеля, что обеспечивает устойчивые решения по обращению с отходами. На рисунке 2 представлен ряд продуктов, получаемых из ОЖП.

Использование ОЖП для производства биодизельного топлива приносит этические, экономические, тепловые и экологические выгоды. Этические вопросы сосредоточены на двух основных аспектах: сокращении отходов с боен для предотвращения загрязнения окружающей среды и обеспечении того, чтобы пищевые ресурсы не использовались для производства энергии, оставаясь доступными для потребления человеком. ОЖП являются экологически номинально жизнеспособным вариантом для крупномасштабного производства био-

дизеля. Тепловые преимущества биодизеля, получаемого из ОЖП, обусловлены его более высокой устойчивостью к окислению, повышенным цетановым числом и теплотворной способностью, которые связаны с конкретными типами жирных кислот, присутствующих в ОЖП. Биодизельное топливо из ОЖП обеспечивает стандартные экологические преимущества, а также производит меньше выбросов оксидов азота (NO_x) по сравнению с биодизелем, полученным из растительного масла [10].



Рис. 2. Продукты, получаемые из ОЖП

ОЖП в основном состоят из триацилглицеринов, содержащих жирные кислоты с 16–18 атомами углерода. Наиболее распространёнными насыщенными жирными кислотами являются пальмитиновая (16 атомов углерода) и стеариновая (18 атомов углерода), тогда как олеиновая кислота (18 атомов углерода с одной двойной связью) является преобладающей мононенасыщенной жирной кислотой. Линолевая (18 атомов углерода с двумя двойными связями) и арахидоновая (20 атомов углерода с четырьмя двойными связями) кислоты являются основными полиненасыщенными жирными кислотами [11]. Состав жирных кислот влияет на физико-химические свойства биодизельного топлива, такие как вязкость, плотность, содержание йода и окислительная стабильность. Биодизельное топливо из ОЖП обычно имеет более высокое цетановое число из-за присутствия насыщенных жирных кислот, таких как пальмитиновая и стеариновая, которые лучше противостоят окислению, чем ненасыщенные жирные

кислоты [12]. Это высокое цетановое число способствует улучшению качества воспламенения и снижению выбросов NO_x. На состав жирных кислот влияют различные факторы, включая вид животного, состояние здоровья, возраст, стадию лактации и конкретное расположение жира в организме [13].

Козий жир хорошо подходит для производства биодизеля благодаря высокому содержанию олеиновой кислоты, которая способствует стабильности и улучшает текучесть в холодном состоянии. Напротив, высокое содержание насыщенных жиров в говяжьем жире может отрицательно влиять на физико-химические свойства биодизеля. Аналогично, топленый жир считается подходящим, но не идеальным кандидатом для производства биодизеля из-за высокого содержания насыщенных жиров.

Качество биодизеля определяется различными факторами, включая состав и качество исходного сырья, в частности его жирнокислотный состав. На него также влияют производственный процесс, параметры последующей обработки, срок хранения и обращение.

Заключение

Производство биодизельного топлива из куриного жира, говяжьего жира и свиного сала исследовалось с помощью катализируемой основанием переэтерификации. Исследование выбросов NO_x проводилось на одноцилиндровом дизельном двигателе Yanmar 100 с непосредственным впрыском. Использовалась топливная смесь на основе 20% биодизеля из животного жира и соевого биодизеля в смеси с обычным дизельным топливом. Результаты показали, что выбросы NO_x от биодизеля на основе животного жира были ниже по сравнению с биодизелем на основе соевого масла [14]. Кроме того, биодизельное топливо, получаемое из отходов куриного жира, может использоваться в качестве заменителя топлива в смеси с обычным дизельным топливом без необходимости внесения изменений в двигатель [15]. Физико-химические свойства биодизеля, получаемого из различных ОЖП, помогают определить наиболее подходящий источник жира для производства биодизеля на основе желаемых свойств и кон-

кретных условий окружающей среды. Например, биодизель на основе свиного жира обладает самой высокой вязкостью (7,18 мм^2/с), что может повлиять на распыление и сделать его непригодным для холодной погоды. С другой стороны, биодизель на основе куриного жира наиболее подходит для холодной погоды из-за низкой температуры помутнения, тогда как говяжий жир менее подходит из-за высокой температуры застывания.

Список литературы / References

1. Babadi AA, Rahmati S, Fakhlaei R, Barati B, Wang S, Doherty W, Ostrikov KK (2022) Emerging technologies for biodiesel production: processes, challenges, and opportunities // Biomass Bioenerg 163:106521.

2. Amal R, Usman M (2024) A review of breakthroughs in biodiesel production with transition and non-transition metal-doped CaO nano-catalysts // Biomass Bioenerg 184:107158.

3. Odetoye T, Agu J, Ajala E (2021) Biodiesel production from poultry waste: waste chicken fat and eggshell // J Environ Chem Eng 9:105654.

4. Attari A, Abbaszadeh-Mayvan A, Taghizadeh-Alisaraei A (2022) Process optimization of ultrasonic-assisted biodiesel production from waste cooking oil using waste chicken eggshell-derived CaO as a green heterogeneous catalyst // Biomass Bioenerg 158:106357.

5. Andreo-Martinez P, Ortiz-Martinez VM, Salar-Garcia MJ, Veiga-delBano JM, Chica A, Quesada-Medina J (2022) Waste animal fats as feedstock for biodiesel production using non-catalytic supercritical alcohol transesterification: a perspective by the PRISMA methodology // Energy Sustain Dev 69:150–163.

6. Bakhtawar J, Irfan M, Shakir HA, Khan M, Ali S, Saeed S, Mehmood T, Franco M (2022) Trends in biodiesel production from algae and animal fat wastes: challenges and prospects // Food Waste Green Fuel: Trend Dev 255–278.

7. Ahmed SA, Soudagar MEM, Rahamathullah I, Basha JS, Khan TY, Javed S, Elfasakhany A, Kalam M (2023) Investigation of ternary blends of animal fat bio-

diesel-diethyl ether-diesel fuel on CMFIS-CI engine characteristics // Fuel 332:126200.

8. Banković-Ilić IB, Stojković IJ, Stamenković OS, Veljkovic VB, Hung Y-T (2014) Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production // Renew Sustain Energy Rev 32:238–254.

9. Kirubakaran M, Selvan VAM (2021) Experimental investigation on the effects of micro eggshell and nano-eggshell catalysts on biodiesel optimization from waste chicken fat // Bioresour Technol Rep 14:100658.

10. Binhweel F, Hossain MS, Ahmad MI (2023) Recent trends, potentials, and challenges of biodiesel production from discarded animal fats: a comprehensive review // BioEnergy Res 16:778–800.

11. Toldrá-Reig F, Mora L, Toldrá F (2020) Trends in biodiesel production from animal fat waste // Appl Sci 10:3644.

12. Banković-Ilić IB, Stojković IJ, Stamenković OS, Veljkovic VB, Hung Y-T (2014) Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production // Renew Sustain Energy Rev 32:238–254.

13. Wei Z, Xu C, Li B (2009) Application of waste eggshell as lowcost solid catalyst for biodiesel production // Bioresour Technol 100:2883–2885.

14. Wyatt VT, Hess MA, Dunn RO, Foglia TA, Haas MJ, Marmer WN (2005) Fuel properties and nitrogen oxide emission levels of biodiesel produced from animal fats // J Am Oil Chem Soc 82:585– 591.

15. Gad M, El-Shafay A, Alqsair UF, Ağbulut Ü, Attia E-A (2023) Multiobjective optimization based grey relational analysis and investigation of using the waste animal fat biodiesel on the engine characteristics // Fuel 343:127950.

Лукин Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии» ЮУрГУ (НИУ), доцент кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасность жизнедеятельности», ЮУрГАУ

Штриккер Любовь Андреевна, ассистент кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасность жизнедеятельности», ЮУрГАУ

Николаев Владислав Николаевич, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Эксплуатация машинно-тракторного парка и технология и механизация животноводства», ЮУрГАУ

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 624.131.543:624.15

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ОПОЛЗНЕОПАСНЫХ СКЛОНОВ ПРИ ЖИЛИЩНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.Н. Золотухин, М.И. Борисова, А.С. Бондарева

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

**Адрес для переписки: Золотухин Сергей Николаевич, E-mail: Ser6812@yandex.ru*

В статье рассматриваются вопросы безопасного строительства жилого дома на оползне опасном склоне с неоднородными грунтами и высоким уровнем грунтовых вод. Проведён анализ возможных инженерных решений для укрепления склона, понижения уровня грунтовых вод и усреднения прочностных характеристик основания. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и строительстве на оползне опасных участках с учётом требований к устойчивости откосов и экономии строительной стоимости.

Ключевые слова: оползневая опасность; укрепление склона; подпорные конструкции; дренаж; грунтовые воды; повторное использование строительных ресурсов.

ENGINEERING AND TECHNICAL ASPECTS OF STABILIZATION OF LANDSLIDE-PRONE SLOPES IN HOUSING CONSTRUCTION

S.N. Zolotukhin, M.I. Borisova, A.S. Bondareva

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

** Corresponding author: Sergey N. Zolotukhin, E-mail: Ser6812@yandex.ru*

This article examines the safe construction of a residential building on a landslide-prone slope with heterogeneous soils and a high groundwater level. An analysis of possible engineering solutions for slope stabilization, groundwater reduction, and averaging foundation strength characteristics is provided. The results can be used in design and construction on landslide-prone sites, taking into account slope stability requirements and cost savings.

Keywords: landslide hazard; slope stabilization; retaining structures; drainage; heterogeneous soils; groundwater; mechanical-hydrocement activation; reuse of construction resources.

Введение. В России строительство жилья на берегах рек с красивыми пейзажами сейчас ведется постоянно. Строительство в таких местах осложнено наличием оползне опасных склонов с неоднородными гидрогеологическими условиями. Второй большой проблемой, которая сейчас есть в России- масштабирование Распоряжения Министерства экологии и природопользования Московской области №134-РМ от 25 февраля 2021 года и Трилистник на территории России, что противоречит требованием ФЗ-89 о предотвращении образования мусора. [1].

Рассмотрим, как эти проблемы решаются сотрудниками Воронежского Государственного технического университета на примере строительства жилого дома по адресу г. Воронеж ул. Массалитинова, д. 44.

Цель исследования – разработать комплекс эффективных инженерных решений по стабилизации оползне опасных склонов со сложными гидрогеологическими условиями и доказать, что повторное использование строительных материалов, изделий и конструкций является экологически и экономически эффективным решением.

Проектирование и строительство жилого дома на данном участке было осложнено явными признаками активного оползневого процесса глубокого или поверхностного заложения. Обследование участка застройки показало наличие «пьяных» деревьев (наклон стволов в сторону уклона) и обрушение ранее построенной подпорной стены. Это наглядно свидетельствует о пластическом течении или вязком сдвиге верхних слоев грунтового массива под воздействием собственного веса и гидрогеологических факторов.



Рис. 1. «Пьяные» деревья на участке застройки



Рис. 2. Обрушенная, ранее построенная подпорная стенка

Критический анализ разрушения старой конструкции указывает на две основные причины:

1. Отсутствие или засорение дренажной системы, повлекшее за собой резкий рост гидростатического и порового давления воды в теле склона.

2. Ошибки в расчете сдвигающих сил, из-за чего удерживающая способность старой конструкции оказалась ниже фактического давления грунтовых масс.

Поэтому было решено выполнить изначально снижение уровня грунтовых вод, что было достигнуто за счет устройства дренажных траншей, которые заполнялись щебнем. Щебень сработал как обратный фильтр с высокой пористостью. Он аккумулировал и перехватил значительные объемы напорных подземных вод, исключив размыв окружающих связных грунтов (суглинков/глин) [2].

Сложность производства работ заключалось в наличии плывунов у подножья склона. Поэтому работы выполнялись по захваткам (захватка-1 ковш экскаватора). После устройства дренажной траншеи, которая одновременно являлась фундаментом подпорной стены, произошло водопонижение уровня грунтовых вод. Траншея, заполненная уплотненным щебнем, одновременно являлась и фундаментом под подпорную стену. Она была выполнена перпендикулярно направлению течения подземных вод, что позволило собрать подземные воды и сбросить их вниз по рельефу с помощью дренажных труб. Дренажные трубы бы-

ли уложены в торцах дренажной траншеи, которая собирала подземные воды со склона перед площадкой застройки. Подземные воды были собраны в перепускные колодцы и сброшены вниз по рельефу по пластиковым дренам.



Рис. 3. Дренажная траншея



Рис. 4. Перепускные колодца



Рис. 5. Пластиковые дрены

Визуально было зафиксировано осушение площадки застройки и течения подземных вод по этим трубам. Поэтому далее приступили к монтажу подпорной стены, которая была выполнена из керамзитобетонных панелей повторного применения.

Для каждой панели была выполнена индивидуальная верификация. Определялась фактическая прочность бетона несущих конструкций неразрушающим

методом ударного импульса. По результатам проведенных инструментальных измерений была выполнена статистическая обработка данных для вычисления фактического класса бетона по прочности на сжатие. Прочность бетон керамзитобетонных панелей была выше 30Мпа, что гарантирует возможность ее длительной эксплуатации.



Рис. 6. Подпорная стена из керамзитобетонных панелей повторного применения

Плюсы использования подпорной стены из керамзитобетонных панелей повторного применения:

- Высокая экономическая эффективность: Использование б/у керамзитобетонных панелей снижает затраты на закупку материалов до 60–70% по сравнению с заливкой нового монолита или покупкой новых панелей.
- Высокая скорость монтажа: отсутствуют мокрые процессы (заливка бетона, набор прочности опалубкой), стена монтируется с помощью автокрана за несколько рабочих смен.
- Внедрение принципов рециклинга: Прямое вторичное использование керамзитобетонных панелей минимизирует углеродный след строительства [1].

Минусы и технологические сложности:

- Геометрические ограничения. Плиты перекрытия имеют строго плоскую прямоугольную форму, что затрудняет создание криволинейных (изогнутых) стен, которые лучше распределяют давление грунта.

Альтернативные инженерные решения, которые можно было применить в соответствии с требованиями СП 116.13330.2012 [2].

1) Удерживающий шпунтовой ряд (из стального или композитного шпунта Ларсена).

Инженерная суть: вдоль склона методом забивки, вибропогружения или вдавливания монтируется сплошная стена из металлических или полимерных профилей корытообразного сечения, жестко защемленных в нижних стабильных пластах грунта.

Плюсы: высочайшая прочность на изгиб (стальной шпунт способен выдерживать колоссальное боковое давление грунта); минимум земляных работ: не требуется отрывать глубокий котлован под фундамент стены, что безопасно для оползневого склона; герметичность (при необходимости, может служить противофильтрационной завесой, отсекающей грунтовые воды).

Минусы: экстремально высокая стоимость самого шпунта и его доставки; необходимость привлечения тяжелой спецтехники (копровые или вибропогружающие установки), вибрация от которой на оползнеопасном склоне может спровоцировать мгновенный сход грунта.

2) Метод «Грунтовых нагелей» (Soil Nailing) в сочетании с набрызг-бетоном.

Инженерная суть: Склон прошивается сеткой коротких металлических стержней (нагелей) длиной 4–8 метров. Нагели вводятся в буровые скважины и цементируются. Поверхность склона закрывается стальной сеткой и покрывается слоем набрызг-бетона (торкрет-бетона) толщиной 10–15 см.

Плюсы: создается единый армогрунтовый массив: укрепляется сам склон, а не просто ставится внешняя преграда; подходит для очень крутых откосов; работы выполняются малогабаритными станками, что безопасно для нестабильного рельефа.

Минусы: полностью уничтожается экосистема склона (поверхность превращается в бетонный панцирь); требует обязательного обустройства глубоких дренажных отверстий по всей площади, иначе вода оторвет бетонную корку от грунта; очень высокая стоимость.

3) Террасирование с применением армогрунтовых систем (Geogrid Retaining Walls).

Инженерная суть: склон нарезается уступами. На каждом уступе укладываются слои высокопрочной георешетки, которая засыпается щебнем или местным грунтом с послойным уплотнением. Лицевая часть оборачивается этой же решеткой и может засеиваться травой.

Плюсы: экономичность: максимально используются местные грунты, а не привозной бетон; конструкция работает как единый гибкий блок, устойчивый к сейсмическим и оползневым подвижкам [3]; отличный внешний вид («зеленая стена»).

Минусы: критически зависит от качества послойного трамбования; требует больших площадей, поэтому невозможен при устройстве работ на маленьких участках; при устройстве подпорной стены было использовано 132 кубометра керамзитобетонных панелей.

Заключение

Стабилизация оползнеопасного склона на малых площадках с повторным применением железобетонных конструкций, которые образуются при поэлементном демонтаже экономически и экологически целесообразна.

Список литературы

1. New approaches to the development of construction technologies / S. A. Kolodyazhny, S. N. Zolotukhin [et al.] // E3S Web of Conferences. 2021.

2. Болдырев Г.Г., Федоров Е.В. Особенности проектирования водопонижения и ликвидации плывунных проявлений методом «Design-as-you-go» // Геотехника. 2023. № 2. С. 14–26.

3. Золотухин С.Н., Трегубова Е.А., Потехин И.А. Повторное использование железобетонных элементов зданий в конструкции фундаментов // Химия, физика и механика материалов. 2023. № 4 (39).

4. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения: актуализированная редакция СНиП 22-02-2003. Москва: Минрегион России, 2012. 107 с.

5. СТО-ГК «Трансстрой» 013-2007. Применение геосинтетических материалов (георешеток) для укрепления конусов и откосов земляного полотна: корпоративный стандарт: утвержден и введен в действие Распоряжением ГК «Трансстрой» от 20 марта 2007 года № 24 / разработан ОАО «ЦНИИС». Москва: Корпорация «Трансстрой», 2007. 42 с

References

1. New approaches to the development of construction technologies / S. A. Kolodyazhny, S. N. Zolotukhin [et al.] // E3S Web of Conferences. 2021.

2. Boldyrev G.G., Fedorov E.V. Specifics of designing dewatering systems and mitigating quicksand phenomena using the "Design-as-you-go" method // Geotekhnika. 2023. No. 2. P. 14–26.

3. Zolotukhin S.N., Tregubova E.A., Potekhin I.A. Reuse of reinforced concrete building elements in foundation structures // Chemistry, Physics and Mechanics of Materials. 2023. No. 4 (39).

4. SP 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings, and structures against hazardous geological processes. Basic provisions: updated version of SNiP 22-02-2003. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2012. 107 p.

5. STO-GK "Transstroy" 013-2007. Use of Geosynthetic Materials (Geogrids) for Reinforcing Embankment Cones and Slopes: Corporate Standard: Approved and put into effect by Order of GK "Transstroy" No. 24 dated March 20, 2007 / Developed by OJSC "TsNIIS". Moscow: "Transstroy" Corporation, 2007. 42 p.

Золотухин Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова, ВГТУ

Борисова Марина Ивановна – старший преподаватель кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова, ВГТУ

Бондарева Анастасия Сергеевна – студент группы бПГС-244 строительного факультета, ВГТУ

ПЕРСОНАЛИИ

ПАМЯТИ ЕВГЕНИЯ МИХАЙЛОВИЧА ЧЕРНЫШОВА



(1936 – 2021 гг.)

Чернышов Евгений Михайлович – советский и российский ученый в области строительного материаловедения, доктор технических наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), лауреат Государственной премии РФ. Один из разработчиков отечественной технологии изделий из ячеистого автоклавного бетона (газосиликата), а также не имеющего аналогов ультралегковесного теплоизоляционного материала со средней плотностью 100…200 кг/м³ – теплопора. Создал Воронежскую научную школу системно-структурного материаловедения и высоких строительных технологий. Автор более 450 научных статей, 10 монографий, 40 научно-методических работ.

К 90-летию со дня рождения Е.М. Чернышова, а также к юбилею ВГТУ 1 и 2 октября была организована Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы строительного материаловедения и технологий». Мероприятие совместно проводили ВГТУ и Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ).

С приветственным словом к участникам конференции обратился ректор ВГТУ **Дмитрий Константинович Проскурин**. Он отметил ценность научных традиций, которые и спустя годы собирают учеников, коллег и последователей Е.М. Чернышова (рис 1).



Рис. 1. Приветственное слово ректора ВГТУ Д.К. Проскурина

Главная тема состоявшейся конференции – сохранение и развитие научной школы Евгения Михайловича Чернышова. К участникам обратилась профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций ВГТУ **Галина Станиславовна Славчева**. Она напомнила, что Евгений Михайлович многие годы организовывал и поддерживал материаловедческие конференции, а нынешняя встреча, соответственно, продолжает эту традицию.

Проректор по научной работе ВГТУ **Алексей Викторович Башкиров** отметил, что созданная академиком научная школа продолжает эффективно работать и развиваться.

О Чернышове Е.М. говорили не только как о значимом ученом, но и как о человеке, который умел соединять фундаментальные исследования с реальными задачами строительной отрасли.

Председатель Союза строителей Воронежской области **Владимир Иванович Астанин** подчеркнул, что для Евгения Михайловича наука всегда находилась

в тесной взаимосвязи с производством: ученый стремился доводить идеи до практического результата и умел объединять вокруг них ученых и строителей.

В конференции принимал участие директор Института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН, Почетный работник высшего профессионального образования РФ **Павел Владиславович Монастырев** – давний коллега Е.М. Чернышова и модератор научной программы.

Одним из самых теплых стало выступление научного консультанта кафедры строительного материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, исполнительного директора НО «Российская Гипсовая Ассоциация», д-ра техн. наук, профессора, Почетного строителя России **Александра Федоровича Бурьянова**, который передал ВГТУ памятный знак Российской гипсовой ассоциации и предложил учредить премию имени Чернышова для молодых ученых, а также создать мемориальный кабинет академика.

Своими воспоминаниями поделились профессор кафедры строительного материаловедения и дорожных технологий Липецкого государственного технического университета, д-р техн. наук, профессор, Почетный дорожник Российской Федерации, действительный член Российской академии транспорта **Борис Александрович Бондарев** и сын ученого Михаил Чернышов.

Научную часть конференции открыла Г.С. Славчева докладом о научно-инженерной школе академика Е.М. Чернышова. Проректор по научной работе ФГБОУ ВО Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, д-р техн. наук, профессор, научный руководитель научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии», председатель регионального отделения Российской инженерной академии, советник РААСН, Почетный строитель России **Евгений Валерьевич Королев** представил доклад о структурном уравнении прочности строительных композиционных материалов.

В течение первого дня научной конференции прозвучали доклады, посвященные новым бетонам и технологиям, оптимизации структуры автоклавных ячеистых бетонов, модификации полимерных материалов нанодобавками, дисперсному армированию пенобетона, геонике, процессам тепло- и массопереноса в арболите и технологиям аддитивного строительства (рис. 2).



Рис. 2. Работа конференции

Во второй день, 2-ого октября, конференция продолжила свою работу, и были заслушаны научные доклады молодых ученых и аспирантов. Всего за время работы конференции было сделано более 40 научных докладов. География конференции охватывает следующие города Москва, Санкт-Петербург, Тамбов, Липецк, Казань, Новосибирск, Тверь, Белгород, Иваново, Астрахань.

В конце работы конференции ее участники познакомились с проектным офисом и Центром аддитивных технологий, а также Музеем строительных материалов ВГТУ.

Усачев А.М.

Усачев Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций, ВГТУ

К ЮБИЛЕЮ ПРОФЕССОРА КЛЮЕВА ВИКТОРА ГРИГОРЬЕВИЧА



Виктор Григорьевич Клюев родился 17 июля 1946 года. Доктор физико-математических наук. Профессор. Преподаватель физики в гимназии им. Басова. Основатель физического класса. Автор более 700 публикаций. В 1972 г. окончил с отличием кафедру оптики и спектроскопии Воронежского госуниверситета. Исследования свойств дефектов в широкозонных кристаллофосфорах оптическими, в частности люминесцентными методами являются его основными научными интересами. Защитил в 1986 г. кандидатскую диссертацию «Люминесцентные исследования фотохимических процессов в галогенидах серебра, сульфидах цинка и кадмия и фотоматериалах на их основе» (Ленинград), а в 1998 г. – диссертацию на соискание степени доктора физ.-мат. наук «Фотостимулированные процессы на поверхностных дефектах широкозонных полупроводников» (Воронеж). Звание профессора Виктору Григорьевичу присвоено в 2009 году.

В 1980 году в Воронежском госуниверситете при активном участии Виктора Григорьевича был создан военно-патриотический клуб любителей бега

«Память». За прошедшие годы клуб совершил агитпробеги во многие города-герои (в Ленинград, Москву, Севастополь, Волгоград), а также по трем полям боевой Славы (Бородинское, Куликовское, Прохоровское), и даже в Берлин. Через патриотическое воспитание в этом клубе прошла не одна сотня школьников, студентов и аспирантов. В.Г. Клюев не только был начальником штаба Клуба, но и пробегал за день 20-40 км, пел под гитару песни, а вечерами у него хватало сил играть с бойцами Клуба в футбол.

Друзья, коллеги, участники и выпускники клуба «Память», редакционная коллегия журнала «Химия, физика и механика материалов» поздравляют Виктора Григорьевича с 80-летием, желают ему здоровья и реализации творческих планов!

О.Б. Рудаков, В.Ф. Селеменев, Л.В. Рудакова, С.И. Карпов, А.В. Любарь

Рудаков Олег Борисович – д-р хим. наук, зав. кафедрой химии и химической технологии материалов, ВГТУ
Селеменев Владмир Федорович – д-р хим. наук, проф. кафедры аналитической химии, ВГУ
Рудакова Людмила Васильевна – д-р хим. наук, зав. кафедрой фармацевтической химии и фармацевтической технологии, ВГМУ им. Н.Н. Бурденко
Карпов Сергей Иванович – д-р хим. наук, проф. кафедры аналитической химии, ВГУ
Любарь Александр Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии, ВГТУ

ХРОНИКА

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ» В ВОРОНЕЖЕ



Чернышов Евгений Михайлович

1936 – 2021 гг.

С 1 по 2 октября 2026 года в Воронежском государственном техническом университете состоялась Всероссийская научно-практическая конференция **«Актуальные проблемы строительного материаловедения и технологий»**, посвящённая 90-летию академика РААСН Евгения Михайловича Чернышова. Соорганизатором конференции выступил Тамбовский государственный технический университет. Информационное сопровождение обеспечил научно-технический журнал «Строительные материалы».

Евгений Михайлович Чернышов – советский и российский ученый в области строительного материаловедения, доктор технических наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, лауреат Государственной премии РФ. Один из разработчиков отечественной техноло-

гии изделий из ячеистого бетона (газосиликата), а также не имеющего аналогов ультралегковесного теплоизоляционного материала со средней плотностью 100-200 кг/м^3 – теплопора.

Создал Воронежскую научную школу системно-структурного материаловедения и высоких строительных технологий. Автор более 450 научных статей, 10 монографий, 40 научно-методических работ, им подготовлено более 20 кандидатов и докторов наук. Область научных интересов: фундаментальные проблемы материаловедения строительных композитов; научно-практические основы управления химико-технологическими процессами структурообразования и качеством неорганических систем твердения и строительных композитов; концепции, методология и научно-инженерные решения комплексной и глубокой переработки техногенных отходов; анализ современных региональных технико-экономических проблем и эффективных направлений развития архитектурно-строительного комплекса.

Конференция открылась 1 октября торжественным заседанием с участием ректора ВГТУ Д.К. Проскурина, председателя Союза Строителей Воронежской области В.И. Астанина, исполнительного директора НО «Российская Гипсовая Ассоциация» А.Ф. Бурьянова, директора Института архитектуры, строительства и транспорта ТГТУ, член-корреспондента РААСН П.В. Монастырева. На конференции присутствовали учёные из ведущих технических вузов страны Бондарев Б.А. – профессор кафедры строительного материаловедения и дорожных технологий ЛГТУ, д.т.н., профессор, Почетный дорожник Российской Федерации, действительный член Российской академии транспорта; Королев Е.В. – проректор по научной работе СПбГАСУ, д.т.н., профессор, научный руководитель научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии», Почетный строитель России; Лесовик В.С. – профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций БГТУ им. В.Г. Шухова, д.т.н., член-корреспондент РААСН, Заслуженный деятель науки РФ; Пухаренко Ю.В. – профессор кафедры технологии строительных материалов и метрологии СПбГАСУ, д.т.н., член-корреспондент РААСН; Самченко С.В. – зав. кафедрой строительного материаловедения НИУ

МГСУ, д.т.н., профессор, советник РААСН; Шейнфельд А.В. – д.т.н., профессор, АО НИЦ «Строительство», г. Москва и другие.



Рис. 1. Ректор ВГТУ Дмитрий Константинович Проскурин с научным консультантом НИУ МГСУ, исполнительным директором Российской гипсовой ассоциации Александром Федоровичем Бурьяновым

Пленарные доклады, представленные на конференции, охватили широкий спектр тем от фундаментальных научных исследований до прикладных разработок:

- *Научно-инженерная школа академика Е.М. Чернышова* (Г.С. Славчева, ВГТУ) представлены наследие и основные направления развития Воронежской научной школы.
- *Структурное уравнение прочности строительных композиционных материалов* (Е.В. Королёв, СПбГАСУ) фундаментальная работа по моделированию прочности композитов.
- *Новые бетоны и технологии в практике современного строительства* (А.В. Шейнфельд, НИУ МГСУ) прикладные разработки, посвященные строительству современных зданий и сооружений специального назначения на основе цементных композитов.
- *Принципы конструирования и синтеза оптимальных структур автоклавных ячеистых бетонов* (Д.Н. Коротких, НИУ МГСУ; А.И. Макеев,

ВГТУ) данная тема, напрямую является продолжением научных исследований Е.М. Чернышова.

Во второй день конференции пленарная часть продолжилась докладами, посвящёнными инновационным технологиям производства строительных материалов, применению техногенного сырья, геополимерным бетонам для 3D-печати, природоподобным технологиям управления прочностью цементных композитов и другим актуальным направлениям. Также особым блоком программы конференции стоит отметить «День аспиранта», в котором молодые исследователи из Новосибирска, Москвы, Твери, Тамбова и Воронежа представили свои работы. Темы докладов были посвящены структурным особенностям неавтоклавного газобетона, численному моделированию конструкций для аддитивного производства, утилизации фосфогипса, остаточному ресурсу автомобильных дорог и дисперсному армированию асфальтобетона базальтовой фиброй.

Параллельно на конференции работали три секции:

1. *Современные проблемы строительного материаловедения* (модератор: Артамонова О.В. – профессор кафедры химии и химической технологии материалов ВГТУ, д-р техн. наук). Здесь рассматривались вопросы расчета термодинамических функции состояния цементных систем, деградации мостовых конструкций, климатической стойкости ограждающих слоёв, требований к ячеистым бетонам и др.

2. *Инновационные строительные материалы и технологии* (модератор: Усачев А.М. – зав. кафедрой технологии строительных материалов, изделий и конструкций ВГТУ, канд. техн. наук, доцент). Темы докладов секции были посвящены защитным покрытиям на основе каутона, коррозионной стойкости бетонов для 3D-печати, самовосстанавливающемуся декоративному бетону.

3. *Проблемы и перспективы применения отходов промышленности* (модератор: Макеев А.И. – доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций ВГТУ, канд. техн. наук, доцент). Во время работы секции были освещены проблемы утилизации стеклобоя и шлаков, вопросы автоклавных си-

ликатных композиций с промышленными отходами, рассмотрены особенности получения керамического кирпича на основе золы-уноса ТЭЦ, и др.

Стоит особо отметить, масштаб и большое значение проведенной конференции, т.к. в её работе приняли участие учёные из ВГТУ, ТГТУ, НИУ МГСУ, СПбГАСУ, СПбПУ Петра Великого, БГТУ им. В.Г. Шухова, ЛГТУ, КГАСУ, ТвГТУ, НГАСУ (Сибстрин), РУДН и других вузов. Научный комитет объединил ведущих специалистов в области строительного материаловедения из разных регионов России.



Рис. 2. Гости конференции

Таким образом, данное мероприятие подтвердило, что научное наследие Е.М. Чернышова продолжает развиваться, как через фундаментальные научные исследования структуры и свойств строительных композитов, так и через практические разработки в области энергоэффективных материалов, переработки техногенных отходов и аддитивных технологий в строительстве.

О.В. Артамонова, М.А. Шведова

Артамонова Ольга Владимировна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры химии и химической технологии материалов, ВГТУ
Шведова Мария Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии материалов, ВГТУ

Научное издание

ХИМИЯ, ФИЗИКА И МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ

Выпуск № 3(50), 2026

Научный журнал

В авторской редакции

Дата выхода в свет: 30.10.2026.
Формат 60×84 1/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 11,3. Уч.-изд. л. 7,5.
Тираж 25 экз. Заказ № 162
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