

Самоочищение фотокаталитических строительных штукатурок при морозной агрессии

Полина Игоревна Кийко , Тамара Николаевна Черных* , Михаил Владимирович Криушин , Цзяо Ван , Александр Анатольевич Орлов 

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: chernykhtn@susu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Долговечность самоочищающейся способности фотокаталитических строительных материалов в реальных условиях эксплуатации является критически важной проблемой, поскольку их эффективность со временем снижается из-за деградации поверхности и карбонизации. Целью данного исследования была оценка устойчивости фотокаталитической активности двух типов штукатурок – гипсо-цементно-пуццолановой (на основе красного гипса) и цементной (с фотокатализатором анатазом) – к циклическому замораживанию-оттаиванию, а также изучение влияния водоредуцирующих и пуццолановых добавок на сохранение их самоочищающейся способности. **Материалы и методы.** Были приготовлены серии образцов штукатурок с различными комбинациями добавок и без них. Фотокаталитическая активность оценивалась с помощью родаминового теста. Для анализа изменений материалов использовались методы определения прочности на сжатие, плотности, водопоглощение, а также растровая электронная микроскопия с энергодисперсионной спектроскопией для измерения содержания титана (маркер фотокатализатора) и кальция (маркер карбонизации) на поверхности. Моделирование разрушающего действия мороза проводилось путем циклического замораживания-оттаивания образцов в водонасыщенном состоянии. **Результаты.** Установлено, что основной механизм потери самоочищающейся способности связан с вымыванием фотокатализатора вследствие деградации поверхности. Для цементных штукатурок значительную роль играет также экранирование фотокатализатора продуктами карбонизации. Водоредуцирующая добавка повышала начальную эффективность самоочищения на 45% за счет уплотнения структуры, что замедляло деградацию поверхности. Пуццолановая добавка снижала содержание поверхностного кальция на 6–8%, подавляя карбонизацию, и обеспечивала почти двукратный рост начальной эффективности. Совместное применение добавок показало наилучшие результаты по сохранению фотокаталитической активности после замораживания-оттаивания. **Обсуждение и выводы.** Долговечность самоочищающейся функции напрямую зависит от устойчивости материала-носителя к климатическим воздействиям. Комбинированное модифицирование водоредуцирующей и пуццолановой добавками является наиболее эффективной стратегией для повышения долговечности самоочищающихся штукатурок, так как одновременно противодействует двум ключевым механизмам деградации: физическому вымыванию фотокатализатора и его химическому экранированию карбонатами. Это исследование предлагает практический подход к разработке более устойчивых фотокаталитических строительных материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Растворы, смеси, фотокаталитические штукатурки, фотокаталитические добавки, анатаз, способность к самоочищению, морозостойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Кийко П.И., Черных Т.Н., Криушин М.В., Ван Ц., Орлов А.А. Самоочищение фотокаталитических строительных штукатурок при морозной агрессии. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(1):5–14. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-5-14>. – EDN: TOFVXK.

Self-cleaning capacity of photocatalytic building plasters under frost attack

Polina I. Kiiko , Tamara N. Chernykh* , Mikhail V. Kriushin , Jiao Wang , Aleksandr A. Orlov 

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: chernykhtn@susu.ru

ABSTRACT

Introduction. The durability of the self-cleaning capacity of photocatalytic building materials under real operating conditions is a crucial issue, as their efficiency decreases over time due to surface degradation and carbonation. The purpose of the research is to evaluate the stability of the photocatalytic activity in two types of plasters – gypsum-cement-pozzolan plaster (based on red gypsum) and cement plaster (with anatase photocatalyst) – to cyclic freezing and thawing, as well as to investigate the effect of water-reducing and pozzolan additives on maintaining their self-cleaning ability. **Materials and Methods.** Series of plaster samples were prepared with and without different combinations of additives. Photocatalytic activity was assessed using the rhodamine test. Changes in the materials were analyzed using compressive strength, density, and water absorption test methods. Scanning electron microscopy with energy-dispersive spectrometry was used to measure the titanium (photocatalyst marker) and calcium (carbonation marker) content on the surface. Destructive frost effects were simulated by the cyclic freezing and thawing of samples in a water-saturated state. **Results.** It was found that the primary mechanism causing the loss of the self-cleaning capacity was photocatalyst washout due to surface degradation. Shielding of the photocatalyst by carbonation products is also crucial for cement plasters. Water-reducing additives increased the initial self-cleaning efficiency by 45% due to structure compaction, which slowed surface degradation. Pozzolan additives reduced surface calcium content by 6–8%, suppressing carbonation and almost doubled the initial efficiency. The combined use of these additives demonstrated the best results in maintaining photocatalytic activity after freezing and thawing. **Discussion and Conclusion.** The durability of the self-cleaning capacity directly depends on the resistance of the carrier material to climatic impacts. Combined modification with water-reducing and pozzolan additives is the most effective strategy for improving the durability of self-cleaning plasters, as it simultaneously counteracts two key degradation mechanisms: physical washout of the photocatalyst and its chemical shielding by carbonates. This study provides a practical approach to developing more sustainable photocatalytic building materials.

KEYWORDS: Mortar, mixtures, photocatalytic plasters, photocatalytic additives, anatase, self-cleaning, frost resistance

FOR CITATION:

Kiiko P.I., Chernykh T.N., Kriushin M.V., Wang J., Orlov A.A. Self-cleaning capacity of photocatalytic building plasters under frost attack. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(1):5–14. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-5-14>. – EDN: TOFVXK.

ВВЕДЕНИЕ

Самоочищающиеся фотокаталитически активные строительные материалы помогают не только сохранять чистоту поверхностей, улучшать эстетику городской среды, но и снижать количество вредных органических соединений, что благоприятно сказывается на экологической обстановке и здоровье человека [1–4]. Их широкое практическое применение стало возможным благодаря развитию науки в этой области, в частности, созданию более эффективных и экономичных многокомпонентных фотокатализаторов на основе оксида титана [5–12], а также использованию природных минералов и отходов производства в качестве источника фотокатализаторов [13, 14]. Примерами внедрения таких технологий являются церковь «Dives in Misericordia» в Риме (Италия, 2003), музыкальная и художественная ратуша «Cité de la Musique et des Beaux Arts» в Шам-

бери (Франция, 2001), жилой комплекс «Residentie Commodore» в Остенде (Бельгия, 2007), Павильоны Экспо 2015 в Милане (Италия, 2015) [15–18]. Пилотные проекты мощения самоочищающейся плиткой, например, укладка 10 000 м² фотокаталитических тротуарных блоков в Антверпене (Бельгия) и использование фотокаталитического раствора для стен в Гервилле (Франция) подтвердили эффективность технологии, продемонстрировав значительное снижение концентрации загрязняющих оксидов [19, 20]. Накопленные за более чем 10-летний период эксплуатации этих объектов данные позволяют оценить долговременную эффективность и выявить проблемы. Например, исследование объекта Церковь «Dives on Misericordia» в Риме показывает, что фасады из материала на основе фотокаталитического бетона с оксидом титана спустя 16 лет не обладают высокой эффективностью самоочищения. Фасадные блоки имели следующие дефекты: мелкие

и крупные трещины, налипшие загрязнения, разрушение поверхности, большое количество микроорганизмов, оказывающих разрушающее воздействие на материал. По данным исследователей, к такому результату привел комплекс причин, состоящий из особенностей проектирования (сложная конфигурация бетонных блоков двойной кривизны, непродуманная дренажная система) и влияния условий эксплуатации (большое количество пущоланового песка на территории нахождения сооружения, частые обильные дожди). При этом фотокаталитическая активность добавленного оксида титана ожидаемо сохранилась со временем, на эффективность самоочистки значительное негативное влияние оказало изменение структуры под действием внешних климатических и природных факторов [21]. Аналогичные изменения – потеря цвета и появление трещин – были зафиксированы и на фасадах здания в Остенде [22]. Исследования подтверждают разницу испытаний самоочищающихся материалов в лабораторных и реальных условиях, а также необходимость исследования долговечности самоочищающейся способности под действием погодных факторов, которые являются агрессивным воздействием для фотокаталитических поверхностей.

Эффективность фотокатализаторов в строительных материалах определяется тремя группами факторов: физико-химическими характеристиками фотокатализатора (ширина запрещенной зоны, водородный показатель) [23], технологическими параметрами (площадь поверхности, равномерность распределения и устойчивость к агломерации фотокатализатора) [1, 3, 22], а также составом и структурой материала-носителя (пористость, шероховатость, наличие примесей) [3, 6, 24]. В процессе эксплуатации ключевыми причинами деактивации становятся факторы, связанные со структурой материала. В цементных системах происходит «экранирование» фотокатализатора неразлагаемыми неорганическими соединениями, такими как карбонат кальция [25–27]. Климатические воздействия также вносят негативный вклад в изменение самоочищающейся способности материалов: циклическое замораживание и оттаивание, особенно во влажной среде, приводит к увеличению шероховатости поверхности, изменению пористости, образованию микротрещин и, как следствие, к деградации структуры материала. Это ослабляет связь фотокатализатора с матрицей и приводит к его вымыванию с поверхности [28–32]. Таким образом, основными причинами снижения самоочищающейся способности фотокаталитических бетонов в ходе эксплуатации являются физическое вымывание фотокатализатора и его экранирование продуктами деградации материала или неразлагаемыми отложениями.

В данной статье исследовано изменение способности к самоочищению фотокаталитических штукатурок под воздействием морозной агрессии.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследование изменения самоочистки при морозной агрессии проведено на двух видах самоочищающихся штукатурок: гипсо-цементно-пущолановой и цементной.

В качестве фотокаталитического компонента в гипсо-цементно-пущолановой штукатурке использовали примесные соединения, естественным образом присутствующие в красном гипсе: анатаз, рутил и оксид железа (14, 33–35). Красный гипс имеет нормальную плотность 60%, прочность на сжатие 3 МПа, тонкость помола по остатку на сите 0,2 мм 1–2%. Помимо красного гипса (22%) в составе использовали цемент ЦЕМ I 42,5 Н (ОАО «Лафарж Цемент», Россия) в количестве 13,2% и микрокремнезем МКУ-85 (АО «Кузнецкие ферросплавы», Россия) в количестве 4,8% по массе, а также мелкий песок в количестве 60%. Модификацию структуры гипсо-цементно-пущолановой штукатурки проводили с помощью поликарбоксилатной водоредуцирующей добавки Melflux 5581F (BASF Construction Additives, Германия), призванной уплотнять структуру материала. Также во всех штукатурках использовали лимонную кислоту моногидрат E-338 (Foodchem International Corporation, Китай) для замедления сроков схватывания в дозировке 0,1% сверх массы гипса. Подробно характеристики гипсо-цементно-пущолановой штукатурки описаны в работе [14].

В составе цементной штукатурки фотокатализатором является добавка оксида титана в модификации анатаза (размер частиц 7–10 нм, площадь удельной поверхности 248 м²/г) (Anhui Fitech Material Co., Китай), фотокатализатор вводили в количестве 2% сверх массы цемента, дозировка выбрана на этапе предварительного эксперимента как наименьшая и эффективная. Для модифицирования цементной штукатурки использовали пущолановую добавку микрокремнезем МКУ-85 (АО «Кузнецкие ферросплавы», Россия), которая способна связывать свободный гидроксид кальция в цементном камне и уменьшать степень карбонизации поверхности, и водоредуцирующую нафталинсульфоформальдегидную добавку СП-1 («Полипласт», Россия) для уплотнения структуры материала и его поверхности. Содержание портландцемента в составе штукатурки составляло 45%, мелкого песка – 55%. Вид и количество модифицирующих добавок в составах штукатурок приведены в табл. 1.

В работе исследованы прочность штукатурок при сжатии, определенная разрушающим методом, само-

Таблица 1. Модифицирующие добавки в составах штукатурок

Краткое название серии образцов	Вид штукатурки	Вид модифицирующей добавки	Название добавки	Дозировка, % от массы вяжущего	Истинное водо-вяжущее отношение
GCP	Гипсо-цементно-пуццолановая	Нет	–	–	0,60
GCP+W		Водоредуцирующая	Melflux 5581F	0,8	0,30
C	Цементная	Нет	–	–	0,45
C+W		Водоредуцирующая	СП-1	0,8	0,32
C+P		Пуццолановая	МКУ-85	8	0,46
C+W+P		Водоредуцирующая	СП-1	0,8	0,35
	Пуццолановая	МКУ-85	8		

очищающаяся способность по методу родамин-теста, использованы результаты определения плотности и водопоглощения. Структура поверхности изучена с помощью электронной микроскопии на растровом (сканирующем) электронном микроскопе JSM-7001F (JEOL, Япония). Элементный состав поверхности образцов, а именно содержание титана (маркера анатаза) и кальция (маркера карбонизации поверхности), исследовали с помощью энергодисперсионного спектрометра X-max 80 (Oxford instruments, Великобритания), установленного на сканирующем электронном микроскопе JSM-7001F (JEOL, Япония).

Процесс замораживания в водонасыщенном состоянии и оттаивание является имитацией разрушительного воздействия мороза.

Образцы гипсо-цементно-пуццолановой штукатурки, обладавшие по результатам контроля свойств морозостойкостью, равной 10 и 50 циклов, были подвержены 50 циклам замораживания и оттаивания в водонасыщенном состоянии. У образцов после 5, 10 и далее каждые 10 циклов были определены свойства и характеристики поверхности. Образцы цементной штукатурки в зависимости от состава имели морозостойкость от 50 до 100 циклов, определение их свойств и характеристик поверхности проводили после 50, 75, 100, 150 циклов замораживания-оттаивания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены графики изменения свойств штукатурок и элементного состава их поверхностей в процессе морозной агрессии.

Анализ результатов механических испытаний выявил принципиальные различия в поведении модифицированных и немодифицированных гипсоцементно-пуццолановых штукатурок при циклическом замораживании-оттаивании. В то время как

контрольные образцы штукатурки демонстрируют прогрессирующее снижение прочности с практически полной ее потерей к 20 циклам (рис. 1а, синяя кривая), введение водоредуцирующей добавки обеспечивает сохранение прочности выше исходного уровня в течение всего периода испытаний с тенденцией к снижению лишь после 20 циклов (рис. 1а, оранжевая кривая).

Начальная способность к самоочищению практически не зависит от наличия водоредуцирующей добавки. Однако под воздействием циклического замораживания-оттаивания наблюдается выраженное прогрессирующее снижение данной способности (рис. 1в). Динамика этого снижения близко коррелирует с изменением содержания титана на поверхности образцов (рис. 1д), в то время как концентрация кальция остается практически неизменной (рис. 1ж). По микрофотографиям поверхности видно, что у немодифицированных образцов уже после 5 циклов замораживания-оттаивания наблюдается заметное разрушение микроструктуры поверхности (рис. 2б), тогда как схожая степень разрушения у водоредуцированных образцов наблюдается лишь в 30 циклах замораживания-оттаивания (рис. 2г).

У штукатурки на основе цемента введение добавок-модификаторов оказывало значительное влияние даже на начальную эффективность самоочищения. Введение водоредуцирующей добавки оказало значительное влияние на свойства материала, повысив начальную эффективность самоочищения на 45% (рис. 1г, 0 циклов, оранжевая точка). Этот рост соответствует отмеченному увеличению плотности образцов на 2% и снижению водопоглощения на 30%. Пуццолановая добавка обеспечила почти двукратное увеличение эффективности самоочищения (рис. 1г, 0 циклов, серая точка) по сравнению с контрольным образцом (рис. 1г, 0 циклов, синяя точка), а также способствовала снижению содержания кальция на поверхности на 6–8% относительно

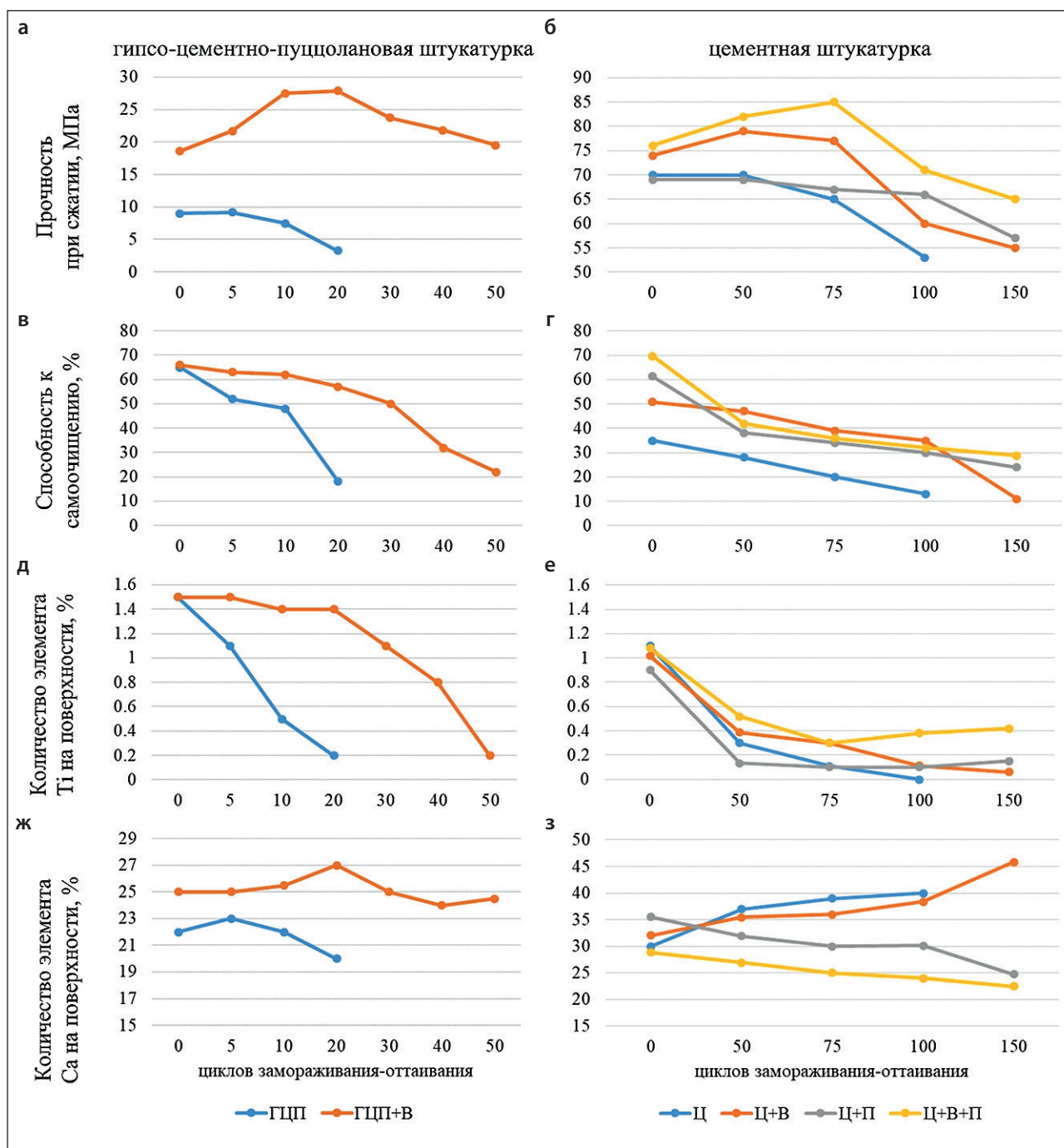


Рис. 1. Изменение свойств штукатурок и элементного состава их поверхностей при морозной агрессии

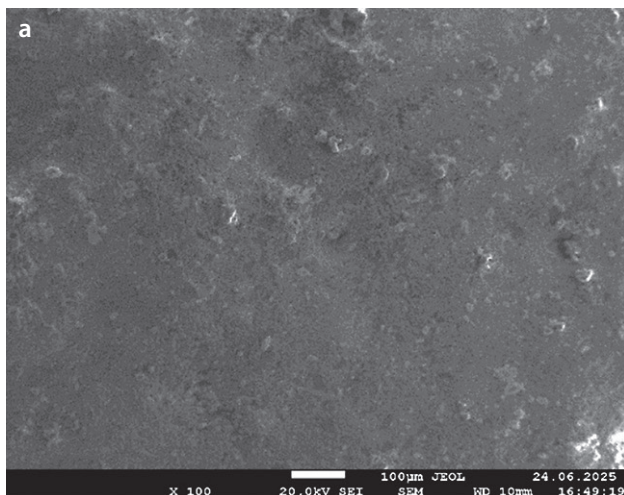
немодифицированного состава (рис. 1е, 0 циклов серая и синяя точки).

У образцов цементной штукатурки без добавок-модификаторов наблюдается достаточно резкое снижение эффективности самоочищения с первых циклов воздействия мороза (рис. 1г, синяя линия). Этот регресс сопровождается снижением концентрации элемента титана на поверхности (рис. 1е, синяя линия) и увеличением концентрации элемента каль-

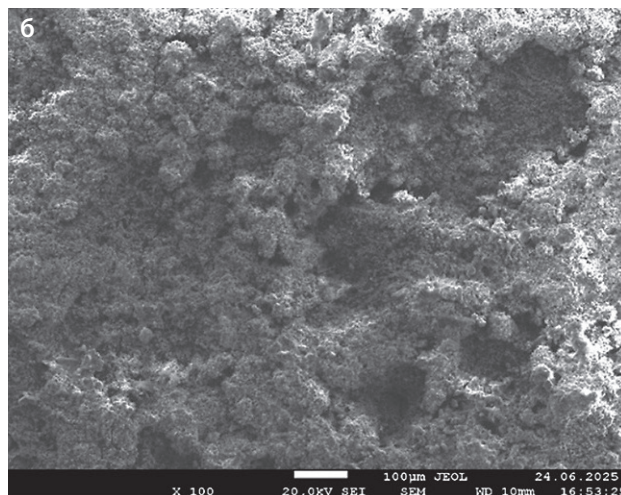
ция (рис. 1з, синяя линия). На микрофотографиях поверхности спустя 50 циклов замораживания-оттаивания отмечена существенная деградация поверхности и наличие большого количества карбонатных образований размерами от 12 до 10 мкм (рис. 3а, 3б).

Водоредуцирование в цементной штукатурке и введение пуццолоановой добавки по-разному влияют на процесс деградации поверхности и характер снижения эффективности самоочищения. Исполь-

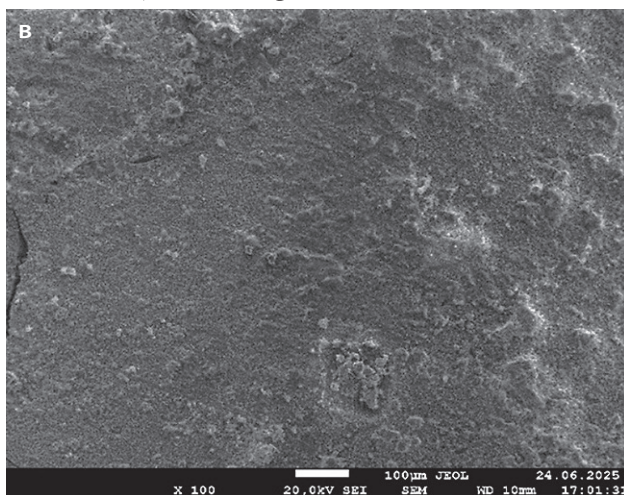
ГЦП до морозного воздействия



ГЦП спустя 5 циклов замораживания-оттаивания



ГЦП+В до морозного воздействия



ГЦП+В спустя 30 циклов замораживания-оттаивания

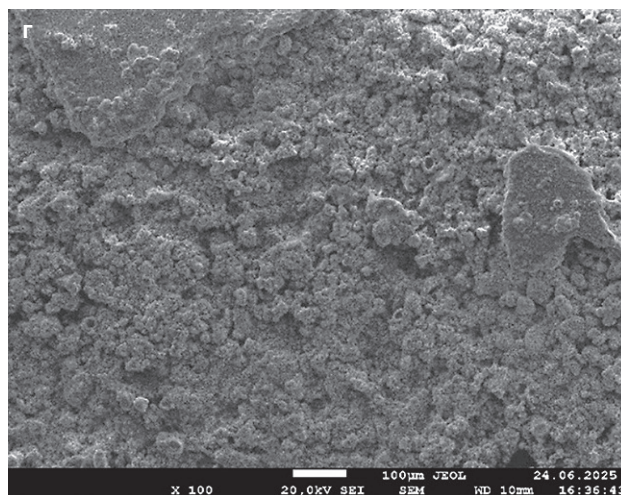


Рис. 2. Микрофотографии поверхности (×100) образцов гипсо-цементно-пуццолановой штукатурки до и после морозной агрессии

зование водоредуцирующей добавки способствует более плавному снижению эффективности самоочистки (рис. 1г, оранжевая линия) по сравнению с образцами с использованием пуццоланы (рис. 1г, серая и желтая линии). При водоредуцировании процесс уменьшения содержания элемента титана на поверхности также более плавный и медленный (рис. 1е, оранжевая кривая) по сравнению с образцами без водоредуцирования (рис. 1е, синяя и серая линии), притом что кривая концентрации элемента кальция показывает стабильный рост (рис. 1з, оранжевая линия). На микрофотографиях после морозного воздействия в 100 циклов на поверхности видны крупные образования кальцита (рис. 3в, 3г).

Образцы цементной штукатурки с пуццолановой добавкой имеют наиболее отличающийся характер изменения поверхности. Эффективность самоочи-

щения резко падает после первых 50 циклов замораживания-оттаивания (рис. 1г, серая и желтая линии), как и концентрация элемента титана на поверхности (рис. 1е, серая линия), после чего происходит плавное снижение обоих показателей. При этом концентрация элемента кальция на поверхности даже несколько снижается в процессе морозной агрессии (рис. 1з, серая и желтая линии). На микрофотографиях образцов с пуццолановой добавкой после 100 циклов замораживания-оттаивания встречаются отдельные редкие образования карбонатов кальция при значительной деградации поверхности (рис. 3д, 3е).

При использовании одновременно водоредуцирующей и пуццолановой добавок наблюдается максимальная конечная способность к самоочистке (рис. 1г, желтая линия), а также большее количество элемента титана на поверхности (рис. 1е, желтая ли-

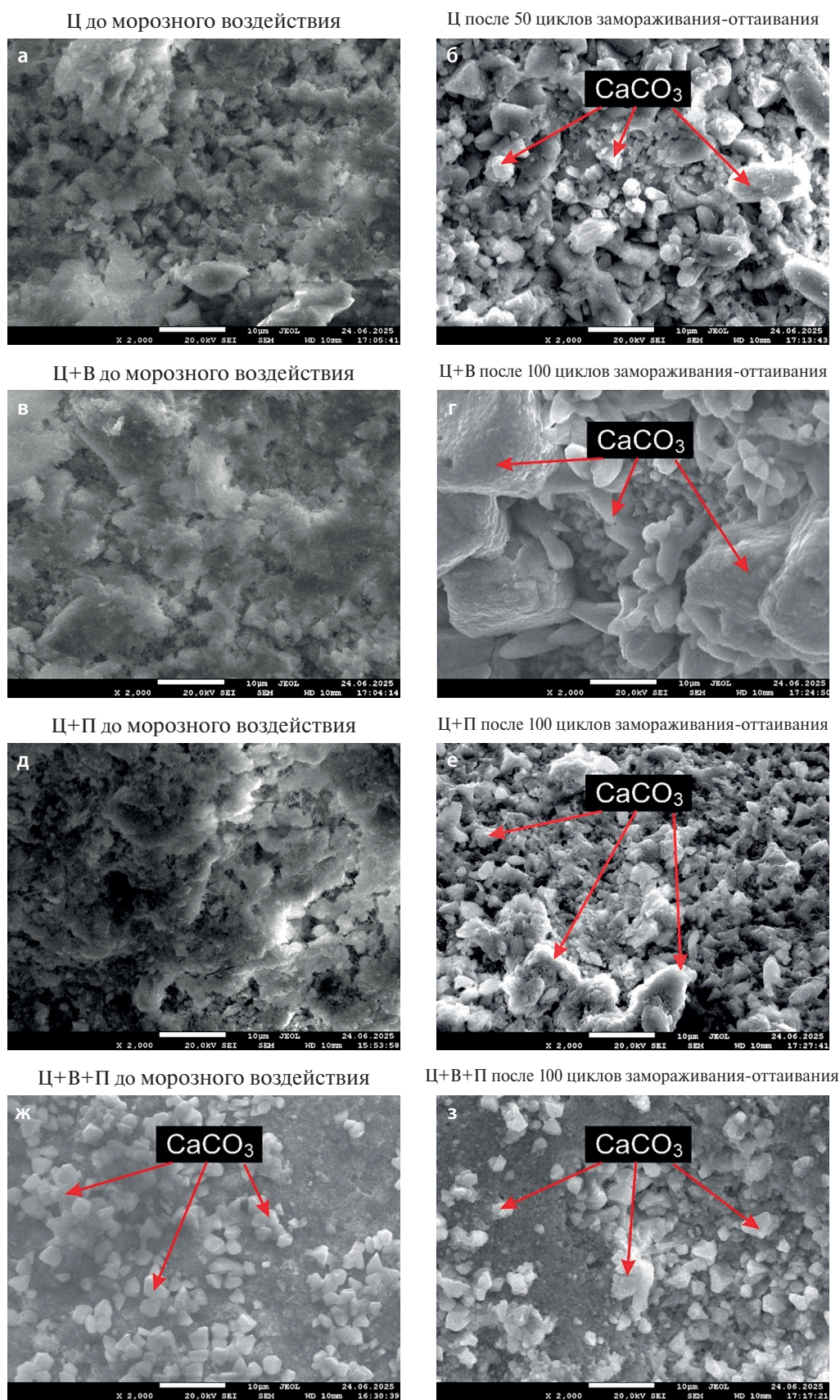


Рис. 3. Микрофотографии поверхности ($\times 100$) образцов цементной штукатурки до и после морозной агрессии

ния) при небольшом количестве кальция (рис. 1з, желтая линия). Структура поверхности образцов после 100 циклов замораживания-оттаивания выглядит более сохранной с отдельными образованиями карбоната кальция размером 1–5 мкм (рис. 2а, 2з).

ОБСУЖДЕНИЕ

Небольшой рост прочности водоредуцированной гипсо-цементно-пуццолановой штукатурки на 5–20 цикл замораживания-оттаивания, вероятно, связан с тем, что в затвердевшей матрице из-за некоторого дефицита воды остались непрогидратировавшие цементные минералы (что подтверждено методом XRD), при этом гипсовая составляющая обеспечивает необходимую пористую структуру, позволяющую воде проникать внутрь материала и запускать процессы гидратации цементных минералов [36]. Сочетание возрастающей прочности в процессе циклического воздействия мороза со снижением фотокаталитической активности при визуально наблюдаемой деградации поверхности позволяет предположить следующий механизм морозного повреждения. Первичным является поверхностное разрушение, вызванное растворением и вымыванием менее устойчивых гипсовых соединений. Поскольку частицы фотокатализатора не имеют прочной химической связи с матрицей, этот процесс частичного разрушения поверхности приводит к их механическому удалению. Таким образом, процесс «вымывания» фотокатализатора является основным фактором, обуславливающим снижение самоочищающейся способности в гипсо-цементно-пуццолановой штукатурке.

Аналогичный процесс вымывания фотокатализатора с деградацией рельефа поверхности был зафиксирован и для образцов цементной штукатурки без модифицирующих добавок. Дополнительным негативным фактором в данном случае выступает активная карбонизация поверхности. Образование карбонатов по значительной площади экранирует фотокатализатор от УФ-излучения и «заращивает» поверхность, снижая способность к самоочищению. Введение водоредуцирующей добавки приводит к уплотнению поверхностного слоя цементной штукатурки, что замедляет скорость вымывания фотокатализатора и обеспечивает более плавную кинетику падения способности к самоочищению. Однако уплотненная поверхность, по-видимому, не препятствует процессу карбонизации, который в данном случае становится доминирующим нега-

тивным фактором, экранируя фотокатализатор и не позволяя достичь высоких абсолютных значений самоочищающейся способности. Напротив, пуццолановая добавка, не оказывая значительного влияния на кинетику вымывания анатаза, эффективно ограничивает карбонизацию поверхности за счет связывания свободного гидроксида кальция в процессе твердения. Это обеспечивает материалам с пуццолановым компонентом преимущество в долгосрочном сохранении фотокаталитических свойств по сравнению с бездобавочными составами.

Совместное применение водоредуцирующей и пуццолановой добавок обеспечивает максимальную конечную эффективность самоочищения и наиболее плавную динамику ее снижения. Этот результат достигается за счет комбинации независимых механизмов: уплотняющего и упрочняющего действия водоредуцирования, замедляющего физическую деградацию поверхности и вымывание фотокатализатора, и ограничения карбонизации поверхности пуццолановой добавкой, что сохраняет доступность фотокатализатора для активирующего УФ-излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод циклического замораживания-оттаивания подтвердил свою адекватность для моделирования процессов старения самоочищающихся цементсодержащих штукатурок, выявив два основных механизма снижения способности к самоочищению: вымывание фотокатализатора вследствие деградации поверхности и его экранирование из-за карбонизации. Проведенные исследования демонстрируют, что долговечность самоочищающейся способности значительно зависит от устойчивости материала-носителя и характеристик его микроструктуры.

Наибольшую эффективность в сохранении способности к самоочищению показало комбинированное применение модифицирующих добавок. Водоредуцирующая добавка обеспечивает уплотнение структуры поверхности, замедляя процессы эрозии поверхности и вымывания фотокатализатора, в то время как пуццолановая добавка эффективно подавляет карбонизацию за счет связывания свободного гидроксида кальция. Суммарный эффект от их совместного использования позволяет достичь максимальных показателей как начальной эффективности самоочищения, так и ее сохранения после воздействия морозной агрессии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Neves J.C., Mohallem N.D.S., Viana M.M. Self-cleaning materials: Concepts, properties and applications. *Revista Virtual de Quimica*. 2021;13(2). <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210003>
2. Ragesh P., Anand Ganesh V., Nair S.V., Nair A.S. A review on “self-cleaning and multifunctional materials”. *J Mater Chem A Mater*. 2014;2(36):14773-97. <https://doi.org/10.1039/c4ta02542c>
3. Hamidi F., Aslani F. Tio₂-based photocatalytic cementitious composites: Materials, properties, influential parameters, and assessment techniques. *Nanomaterials*. 2019;9(10). <https://doi.org/10.3390/nano9101444>
4. Topçu ilker bekir. Self-Cleaning Concretes: an Overview. *Journal of Cement Based Composites*. 2020; 1(2). <https://doi.org/10.36937/cebacom.2020.002.002>
5. Janus M., Bubacz K., Zatorska J., Kusiak-Nejman E., Czyzewski A., Morawski A.W. Preliminary studies of photocatalytic activity of gypsum plasters containing TiO₂ co-modified with nitrogen and carbon. *Polish Journal of Chemical Technology*. 2015;17(2):96–102. <https://doi.org/10.1515/pjct-2015-0036>
6. Li X., Simon U., Bekheet M.F., Gurlo A. Mineral-Supported Photocatalysts: A Review of Materials, Mechanisms and Environmental Applications. *Energies*. 2022;15(15). <https://doi.org/10.3390/en15155607>
7. Pal B., Sharon M., Nogami G. Preparation and characterization of TiO₂/Fe₂O₃ binary mixed oxides and its photocatalytic properties. *Mater Chem Phys*. 1999;59(3). [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00071-1](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00071-1)
8. Lezner M., Grabowska E., Zaleska A. Preparation and photocatalytic activity of iron-modified titanium dioxide photocatalyst. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2012;48(1).
9. Строкова В.В., Губарева Е.Н., Баскаков П.С., Огурцова Ю.Н., Антоненко М.В., Абзалилова А.В. Фотокаталитическая активность композиционного материала, полученного методом золь-гель осаждения TiO₂ на кремнеземный носитель. *Вестник Технологического Университета*. 2020;23(10):5-10. EDN: PFQMLS
10. Лабузова М.В., Губарева Е.Н., Огурцова Ю.Н., Строкова В.В. Использование фотокаталитического композиционного материала в цементной системе. *Строительные материалы*. 2019;5:16–21. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-16-21> EDN: EZOZDR
11. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Korshunov A.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O. Synthesis and Evaluation of Properties of an Additive Based on Bismuth Titanates for Cement Systems. *Materials*. 2023;16(18). <https://doi.org/10.3390/ma16186262>
12. Son B.T, Long N.V, Nhat Hang N.T. Fly ash-, foundry sand-, clay-, and pumice-based metal oxide nanocomposites as green photocatalysts. *RSC Advances*. 2021;11(49). <https://doi.org/10.1039/d1ra05647f>
13. García-Muñoz P., Pliego G., Zazo J.A., Bahamonde A., Casas J.A. Ilmenite (FeTiO₃) as low cost catalyst for advanced oxidation processes. *J Environ Chem Eng*. 2016;4(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.037>
14. Sotiriadis K., Kiyko P.I., Chernykh T.N., Kriushin M.V. Self-cleaning ability of gypsum-cement-pozzolan binders based on thermally processed red gypsum waste of titanium oxide manufacture. *Journal of Building Engineering*. 2024;87. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109009>
15. Chen J., Poon C. Sun. Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Building and Environment*. 2009;44(9). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.002>
16. Guerrini G.L., Plassais A., Pepe C., Cassar L. Use of photocatalytic cementitious materials for self-cleaning applications. *International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials*. 2007.
17. Castro-Hoyos A.M., Rojas Manzano M.A., Maury-Ramírez A. Challenges and Opportunities of Using Titanium Dioxide Photocatalysis on Cement-Based Materials. *Coatings*. 2022;12(7):1–21. <https://doi.org/10.3390/coatings12070968>
18. La Tegola A., Longo F., Lanzilotti A. The pavilions of Expo 2015 in Milan, as a privileged observatory about the concept of sustainable construction in all languages of the world. *Sust. Build*. 2019;4(1). <https://doi.org/10.1051/sbuild/2019001>
19. Beeldens A. Air purification by road materials: results of the test project in Antwerp. *International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials*. 2007;1.
20. Maggos T., Plassais A., Bartzis J.G., Vasilakos C., Moussiopoulos N., Bonafous L. Photocatalytic degradation of NO_x in a pilot street canyon configuration using TiO₂-mortar panels. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2008;136(1-3). <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9722-2>
21. Cardellicchio L. Self-cleaning and colour-preserving efficiency of photocatalytic concrete: case study of the Jubilee Church in Rome. *Building Research and Information*. 2020;48(2). <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1622405>
22. Castro-Hoyos A.M., Rojas Manzano M.A., Maury-Ramírez A. Challenges and Opportunities of Using Titanium Dioxide Photocatalysis on Cement-Based Materials. T. *Coatings*. 2022;12(7):1-21. <https://doi.org/10.3390/coatings12070968>
23. Артемьев Ю.М., Рябчук В.К. Введение в гетерогенный фотокатализ. СПб: Изд-во С.-Петербург. ун-та; 1999.
24. Padmanabhan N.T., John H. Titanium dioxide based self-cleaning smart surfaces: A short review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020;8(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104211>
25. Антоненко М., Огурцова Ю., Строкова В., Губарева Е. Фотокаталитически активные самоочищающиеся цементные материалы. Состав, свойства, применение. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2020;16–25. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25> EDN: AFKXXM
26. Antonenko M.V., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V., Gubareva E.N. The effect of titanium dioxide sol stabilizer on the properties of photocatalytic composite material. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021;95. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_3
27. Ogurtsova Y.N., Strokova V.V., Zhao P., Antonenko M.V., Gubareva EN. Properties of cement with photocatalytic composite material. *Materials Science Forum*. 2021. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.153>

28. Carmona-Quiroga P.M., Martínez-Ramírez S., Viles H.A. Efficiency and durability of a self-cleaning coating on concrete and stones under both natural and artificial ageing trials. *Appl Surf Sci.* 2018;433. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.052>
29. Liu G., Zhao T., Fei H., Li F., Guo W., Yao Z. A review of various self-cleaning surfaces, durability and functional applications on building exteriors. *Construction and Building Materials.* 2023;409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134084>
30. Khannyra S., Luna M., Gil M.L.A., Addou M., Mosquera M.J. Self-cleaning durability assessment of TiO₂/SiO₂ photocatalysts coated concrete: Effect of indoor and outdoor conditions on the photocatalytic activity. *Building and Environment.* 2022;211. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108743>
31. Bersch J.D., Flores-Colen I., Masuero A.B., Dal Molin D.C.C. Photocatalytic TiO₂-Based Coatings for Mortars on Facades: A Review of Efficiency, Durability, and Sustainability. *Buildings.* 2023;13(1). <https://doi.org/10.3390/buildings13010186>
32. Guo M.Z., Maury-Ramirez A., Poon C.S. Self-cleaning ability of titanium dioxide clear paint coated architectural mortar and its potential in field application. *Journal of Cleaner Production.* 2016;112:3583–8. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.079>
33. Kaya-Özkipser K., Uzun A., Soyer-Uzun S. Red mud- and metakaolin-based geopolymers for adsorption and photocatalytic degradation of methylene blue: Towards self-cleaning construction materials. *Journal of Cleaner Production.* 2021;288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125120>
34. Zhang J., Yan Y., Hu Z. Preparation and characterization of foamed concrete with Ti-extracted residues and red gypsum. *Construction and Building Materials.* 2018;171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.072>
35. Hughes P.N., Glendinning S, Manning D.A.C, Noble B.C. Production of «green» concrete using red gypsum and waste. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability.* 2010;163(3). <https://doi.org/10.1680/ensu.2010.163.3.137>
36. Сагдатуллин Д.Г., Морозова Н.Н., Хозин В.Г., Власов В.В. Высокопрочное гипсоцементноцеолитовое вяжущее. *Строительные материалы.* 2010;03:53-55. EDN: MBCHZR

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кийко Полина Игоревна – преподаватель кафедры строительных материалов и изделий архитектурно-строительного института Южно-Уральского государственного университета, Челябинск, Российская Федерация, kiikopi@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4083-8804>

Черных Тамара Николаевна – доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и изделий архитектурно-строительного института Южно-Уральского государственного университета, Челябинск, Российская Федерация, chernykh@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4288-2115>

Кришшин Михаил Владимирович – младший научный сотрудник кафедры строительных материалов и изделий архитектурно-строительного института Южно-Уральского государственного университета, Челябинск, Российская Федерация, kriushinmv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6425-4531>

Ван Цзяо – аспирант кафедры строительных материалов и изделий архитектурно-строительного института Южно-Уральского государственного университета, Челябинск, Российская Федерация, 2287892720@qq.com, <https://orcid.org/0009-0008-3789-3806>

Орлов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительных материалов и изделий архитектурно-строительного института Южно-Уральского государственного университета, Челябинск, Российская Федерация, orlova@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4505-1587>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Кийко П.И. – разработка методики; написание проекта статьи; участие в разработке программы исследований и её реализации.

Черных Т.Н. – научное руководство; концепция исследования; заключительные выводы.

Кришшин М.В. – участие в разработке программы исследований и её реализации.

Ван Ц. – участие в разработке программы исследований и её реализации.

Орлов А.А. – участие в разработке программы исследований и её реализации, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.10.2025; одобрена после рецензирования 03.02.2026; принята к публикации 10.02.2026.