

Разработка искусственной гидравлической извести

Валентина Ивановна Логанина^{1*} , Ирина Александровна Гарькина¹ , Евгения Владимировна Ткач² ,
Ирина Васильевна Степина² 

¹ Пензенский государственный архитектурно-строительный университет, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Известковые растворы, применяемые для реставрации зданий исторической застройки, характеризуются низкой стойкостью в процессе эксплуатации. Стойкость известковых растворов может быть повышена применением в качестве вяжущего гидравлической извести. Однако в структуре выпуска известкового вяжущего доля гидравлической извести составляет всего лишь 19,8%. Учитывая низкий объем производства натуральной гидравлической извести, перспективной является разработка рецептуры искусственной гидравлической извести. **Материалы и методы.** Для разработки рецептуры искусственной гидравлической извести применяли гашеную известь (пушонка) 2 сорта с активностью 64%, а также воздушную известь 2 сорта с активностью 84% (ГОСТ 9179-18). Технология получения искусственной гидравлической извести заключалась в смешивании гашеной извести с пуццолановыми добавками, а также в смешивании воздушной извести с пуццолановыми добавками в процессе гашения. При разработке рецептуры штукатурного раствора в качестве мелкого заполнителя применяли кварцевый песок различных месторождений. Выбор оптимального вида песка проводился из критерия прочности известковых композитов и активности песка, характеризующейся значением свободной поверхностной энергии. **Результаты.** Установлено, что наиболее эффективной является добавка метакаолина. Прочность при сжатии раствора в возрасте 28 суток твердения составляет 2,1 МПа при применении негашеной извести второго сорта. Увеличение дозировки метакаолина до 40% от массы извести повышает прочность при сжатии до 2,7–3,1 МПа. Пуццолановые добавки (микрокремнезем, дегидратированная глина, диатомит) при дозировке 10% от массы извести не обеспечивают требуемой прочности при сжатии, равной не менее 2,0 МПа. Введение в рецептуру портландцемента в количестве 25% от массы извести способствует значительному повышению прочности при сжатии, составляющему 2,9–4,0 МПа в зависимости от вида добавки и вида извести, а также технологии приготовления вяжущего. Определена пористость известкового камня на основе искусственной гидравлической извести, составляющая 48–51%, при этом наблюдается уменьшение объема закрытых пор. Растворы на основе искусственной гидравлической извести обеспечивают достаточную прочность сцепления с кирпичной подложкой, составляющую 0,4–0,55 МПа. **Заключение.** Установлено, что применение воздушной негашеной извести при приготовлении искусственной гидравлической извести способствует более прочному формированию структуры известкового композита. Выявлено, что пористость известкового камня на основе искусственной гидравлической извести меньше по сравнению с камнем на основе воздушной извести, а для известкового камня на основе составов с применением цемента – меньше, чем на основе гидравлической извести. Разработаны составы искусственной гидравлической извести НЛ и штукатурного раствора на ее основе, предназначенные для реставрации объектов культурного наследия и отделки вновь возводимых объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: известь, пуццолановые добавки, прочность, пористость, свободная энергия поверхности

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнялась в рамках выполнения гранта Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Логанина В.И., Гарькина И.А., Ткач Е.В., Степина И.В. Разработка искусственной гидравлической извести. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):159–166. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-159-166>. – EDN: WZDOJN.

Development of artificial hydraulic lime

Valentina I. Loganina^{1*} , Irina A. Garkina¹ , Evgenia V. Tkach² , Irina V. Stepina² 

¹ Penza State University of Architecture and Construction, 440028, Penza, ul. Titov, 28, Russian Federation

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: loganin@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Lime mortars used for the restoration of historical buildings are characterized by low resistance during operation. The durability of lime solutions can be increased by using hydraulic lime as a binder. However, the share of hydraulic lime in the lime binder production structure is only 19.8%. Given the low volume of production of natural hydraulic lime, it is promising to develop a formulation of artificial hydraulic lime. **Materials and methods.** To develop the formulation of artificial hydraulic lime, grade 2 slaked lime (pushonka) with an activity of 64% was used, as well as grade 2 air lime with an activity of 84% (GOST 9179-18). The technology for producing artificial hydraulic lime consisted of mixing slaked lime with pozzolan additives, as well as mixing air lime with pozzolan additives during the quenching process. When developing the formulation of the plaster mortar, quartz sand from various deposits was used as a fine filler. The optimal type of sand was selected based on the strength criterion of calcareous composites and sand activity, characterized by the value of free surface energy. **Results.** It has been established that the most effective is the addition of metakaolin. The compressive strength of the solution at the age of 28 days of hardening is 2.1 MPa when using second-grade quicklime. Increasing the dosage of metakaolin to 40% by weight of lime increases the compressive strength to 2.7–3.1 MPa. Pozzolan additives silica, dehydrated clay, diatomite at a dosage of 10% by weight of lime do not provide the required compressive strength of at least 2.0 MPa. The introduction of Portland cement in the formulation in an amount of 25% by weight of lime contributes to a significant increase in compressive strength, amounting to 2.9–4.0 MPa, depending on the type of additive and type of lime, as well as the technology of binder preparation. The porosity of calcareous stone based on artificial hydraulic lime was determined, amounting to 48–51%, while a decrease in the volume of closed pores was observed. Solutions based on artificial hydraulic lime provide sufficient adhesion strength to the brick substrate, amounting to 0.4–0.55 MPa/kg. It has been established that the use of methakaolin in the amount of 40–50% of the mass of air lime makes it possible to obtain artificial hydraulic lime. The developed compositions of artificial hydraulic lime are proposed to be used for the restoration of buildings of historical buildings, as well as finishing newly erected facilities. **Conclusion.** It has been established that the use of aerial quicklime in the preparation of artificial hydraulic lime promotes a more durable lime composite structure. The porosity of limestone based on artificial hydraulic lime is lower than that of limestone based on aerial lime, and for limestone based on cement-based compositions, it is lower than that of limestone based on hydraulic lime. HL artificial hydraulic lime and plaster mortar formulations based on it have been developed for the restoration of cultural heritage sites and the finishing of new buildings.

KEYWORDS: lime, pozzolan additives, strength, porosity, free energy of the surface

ACKNOWLEDGEMENTS: The work was carried out within the framework of a grant from the Industry Consortium “Construction and Architecture” for fundamental and applied scientific research).

FOR CITATION:

Loganina V.I., Garkina I.A., Tkach E.V., Stepina I.V. Development of artificial hydraulic lime. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):159–166. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-159-166>. – EDN: WZDOJN.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем, с которой приходится сталкиваться современному обществу, является глобальное увеличение выбросов CO₂ и связанное с этим повышение температуры. Строительная отрасль является одним из крупнейших источников выбросов CO₂, на строительную отрасль приходится более 15% всех выбросов парниковых газов. Только на цементную промышленность приходится 5–7% глобального загрязнения CO₂. Одним из способов решения этой

проблемы является более широкое применение известковых растворов. Однако известковые растворы характеризуются низкой стойкостью в процессе эксплуатации. Для повышения прочности, стойкости в процессе эксплуатации в рецептуру известковых растворов вводят различные модифицирующие добавки [1–3].

Стойкость известковых растворов может быть повышена применением в качестве вяжущего гидравлической извести. Спрос на гидравлическую известь возник в последние несколько лет, особенно

в связи с сохранением исторических зданий. Натуральная гидравлическая известь характеризуется совместимостью со старой кладкой, низкой усадочной деформацией, устойчивостью к воздействию соли и мороза, а также более высокой деформативностью и паропроницаемостью [4–6].

Однако в структуре выпуска известкового вяжущего доля гидравлической извести составляет всего лишь 19,8%. Спрос на данный вид вяжущего по-прежнему остается ограниченным. Учитывая низкий объем производства натуральной гидравлической извести, перспективным является разработка рецептуры искусственной гидравлической извести.

Искусственную гидравлическую известь можно получить путем смешивания воздушной извести с пуццолановыми добавками. Обычно используемыми добавками для извести являются метакаолин, зола-унос, микрокремнезем, молотый кирпич, дегидратированная глина и др. [7–11]. Помимо бинарных комбинаций (известь → пуццолан), эффективным оказалось использование тройных систем (известь:пуццолан:цемент).

На свойства искусственной гидравлической извести оказывают влияние условия раннего твердения, учитывающие наличие воды, обеспечивающей пуццолановую реакцию и транспорт CO_2 для дальнейшей реакции карбонизации. Синергетический и конкурентный эффект этих двух реакций обеспечивает уровень ранней прочности в пуццолановых системах [12, 13].

На свойства искусственной гидравлической извести существенное влияние оказывает реакционная способность извести и вид пуццолановой добавки, а также их соотношение в рецептуре [14]. Слишком большое количество добавки может привести к повышенной усадке при высыхании [15]. Кроме того, технология нанесения растворов играет фундаментальную роль в оптимальном созревании свежего раствора [16, 17].

Анализ научно-технической литературы свидетельствует, что, несмотря на имеющиеся результаты исследований, многие вопросы требуют более детального рассмотрения при разработке рецептуры искусственной гидравлической извести.

Целью работы является разработка состава искусственной гидравлической извести и штукатурного раствора на ее основе для реставрации зданий исторической застройки.

МЕТОДОЛОГИЯ

Для разработки рецептуры искусственной гидравлической извести применяли гашеную известь (пушонка) 2 сорта с активностью 64%, а также воздушную известь 2 сорта с активностью 84% (ГОСТ

9179-18). Технология получения искусственной гидравлической извести заключалась в смешивании гашеной извести с пуццолановыми добавками, а также в смешивании воздушной извести с пуццолановыми добавками в процессе гашения. В качестве пуццолановой добавки в работе применяли диатомит Инзенского месторождения, микрокремнезем конденсированный неуплотненный МК-85 ($S_{\text{уд}} = 24\,000 \text{ м}^2/\text{кг}$), с содержанием (в % по масс. %): $\text{SiO}_2 - 92$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.9$; $\text{C} - 1.6$; $\text{CaO} - 0.85$; $\text{MgO} - 0.4$; (ТОО «YDD Corporation», Казахстан), высокоактивный метакаолин ВМК-45 ($S_{\text{уд}} = 1700 \text{ м}^2/\text{кг}$) с содержанием (в % по массе): $\text{SiO}_2 - 53$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 42$ и пуццолановой активностью 1210 мг/г (ООО «Синерго», РФ), а также термообработанную при температуре 600°C глину Пензенского региона (Белинское месторождение). Состав диатомита представлен следующими оксидами, %: $\text{SiO}_2 - 84-87$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 5,5-6$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 2,5-3$, $\text{CaO} - 0,61$.

Химический состав глин представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав глины

Наименование оксидов	Содержание, %
SiO_2	59,56
Al_2O_3	11,85
Fe_2O_3	4,54
другое	24,05

Для разработки состава искусственной гидравлической извести также применяли белый цемент ПЦБ 1-500 Д0 (ГОСТ 965-89).

Для сравнения в работе применяли природную гидравлическую известь «Тамасли» NHL. Гидравлический модуль извести составляет $M = 2,69$.

После формования образцы накрывали полиэтиленовой пленкой, выдерживали в течение 7 дней, затем извлекали из формы и выдерживали 21 сутки в воде. Прочность образцов на сжатие была определена после 28 дней твердения в соответствии с ГОСТ 9179-2018 «Известь строительная Технические условия».

При разработке рецептуры штукатурного раствора в качестве мелкого заполнителя применяли кварцевый песок различных месторождений. Выбор оптимального вида песка проводился из критерия прочности известковых композитов и активности песка, характеризуемой значением свободной поверхностной энергии [18].

Для определения значения свободной энергии поверхности (СЭП) применяли метод ОВРК. В качестве рабочих жидкостей применяли глицерин и воду с известными значениями поверхностного натяжения и его дисперсионной и полярной составляющими

ми. Измерение краевого угла смачивания выполняли на образцах-таблетках, изготовленных путем запрессовки песка на прессе в металлическую форму диаметром 20 мм. Экстраполируя зависимость $\cos\theta = f(\sigma_{\text{ж}})$ на $\cos\theta = 1$, получали значение критического поверхностного натяжения твердой поверхности. Полярную и дисперсионную составляющие рассчитывали с помощью линейной регрессии:

$$\frac{\sigma_L(1+\cos\theta)}{2\sqrt{\sigma_L^d}} = \sqrt{\sigma_S^P} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_L^P}{\sigma_L^d}} + \sqrt{\sigma_S^d}, \quad (1)$$

где σ_L – поверхностное натяжение рабочих жидкостей;

σ_S^d – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения рабочих жидкостей;

σ_L^P – полярная составляющая поверхностного натяжения рабочих жидкостей;

σ_S^d – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения исследуемого материала;

σ_S^P – полярная составляющая поверхностного натяжения исследуемого материала;

θ – краевой угол смачивания исследуемого материала.

Дисперсионную составляющую поверхностного натяжения исследуемого материала (песка) σ_S^d определяли как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, а отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат, равен значению полярной составляющей поверхностного натяжения песка σ_S^P . Для каждого образца проводили не менее пяти измерений.

Величина энергии поверхности E определялась общей площадью поверхности дисперсного образца и рассчитывалась по следующему выражению:

$$E = \sigma S_{\text{уд}}, \quad (2)$$

где σ – поверхностное натяжение кварцевого наполнителя;

$S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность кварца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В таблице 2 приведены результаты оценки прочности при сжатии известковых растворов.

Анализ данных (табл. 2) свидетельствует, что по эффективности влияния на прочность известковых композитов наиболее эффективной является добавка метаксаолина. Прочность при сжатии раствора в возрасте 28 суток твердения составляет 2,1 МПа при применении негашеной извести второго сорта. Увеличение дозировки метаксаолина до 40% от массы извести позволяет повысить прочность при сжатии до 2,7–3,1 МПа, что позволяет получить искусственную гидравлическую известь без добавления цемента.

Все остальные пуццолановые добавки при дозировке 10% от массы извести не обеспечивали требуемой прочности при сжатии, равной не менее 2,0 МПа. Введение в рецептуру портландцемента в количестве 25% от массы извести способствует значительному повышению прочности при сжатии, составляющему 2,9–4,0 МПа в зависимости от вида добавки и вида извести, а также технологии приготовления вяжущего.

Применение воздушной негашеной извести при приготовлении искусственной гидравлической извести способствует более прочному формированию структуры известкового композита.

Таблица 2. Прочность при сжатии известкового раствора

№ п.п.	Вид вяжущего	Прочность при сжатии, МПа*
1	Воздушная известь	0,9/1,3
2	Гидравлическая известь NHL	2,05
3	Воздушная известь + портландцемент 25%	2,9/3,2
4	Воздушная известь + 10% метаксаолин	1,4/2,1
5	Воздушная известь + 40% метаксаолин	2,7/3,1
6	Воздушная известь + 10% микрокремнезем	1,2/1,6
7	Воздушная известь + 10% микрокремнезем + 25% портландцемент	3,4/3,7
8	Воздушная известь + диатомит 10%	1,1/1,4
9	Воздушная известь + дегидратированная глина 10%	1,3/1,5
10	Воздушная известь + диатомит 10% + портландцемент 25%	3,1/3,5
11	Воздушная известь + 25% цемент + 10% метаксаолин	3,7/4,0

Примечание. * Над чертой приведены значения предела прочности при сжатии при применении гашеной извести, под чертой – при применении негашеной извести.

Таблица 3. Пористость известкового камня

№ п. п.	Вид вяжущего	Пористость, %	Объем открытых пор, %	Объем закрытых пор, %	Водопоглощение, %
1	Контрольный	60	50	10	44
2	Гидравлическая известь NHL	52	38	14	36
3	Воздушная известь + 10% метаксаолин	57	46	11	34,8
4	Воздушная известь + 40% метаксаолин	54	41	13	32,7
5	Воздушная известь + 10% микрокремнезем + 25% портландцемент	51	41	10	36
6	Воздушная известь + диатомит 10% + портландцемент 25%	53	43	10	33
7	Воздушная известь + 25% цемент + 10% метаксаолин	48	39	9	31

В таблице 3 приведены значения пористости известкового камня на основе искусственной гидравлической извести. Результаты исследований показывают, что пористость известкового камня на основе искусственной гидравлической извести меньше по сравнению с камнем на основе воздушной извести, а для известкового камня на основе составов с применением цемента – меньше, чем на основе гидравлической извести. Так, пористость известкового камня на основе натуральной гидравлической извести составляет 52%, а на основе составов с пуццолановыми добавками и цементом – 48–51%, при этом наблюдается уменьшение объема закрытых пор.

Исследовалась кинетика связывания извести СаО в процессе твердения (рис. 1).

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что с течением времени наблюдается уменьшение количества свободной извести. Так, в возрасте 7 суток количество свободной СаО в контрольном образце составляет 85%, а в возрасте 28 суток 79% (рис. 1, кривая 1). В образцах с добавлением метаксаолина содержание свободной извести на 28-е сутки твердения уменьшилось до 64% (рис. 1, кривая 2), а с добавкой метаксаолина с цементом – до 60% (кривая 4).

Наличие свободной извести в гидравлическом известковом растворе обеспечивает самовосстановление мелких трещин. Это происходит по мере того, как известь в растворе растворяется в воде и, испаряясь, перемещается к поверхности. Реакция между

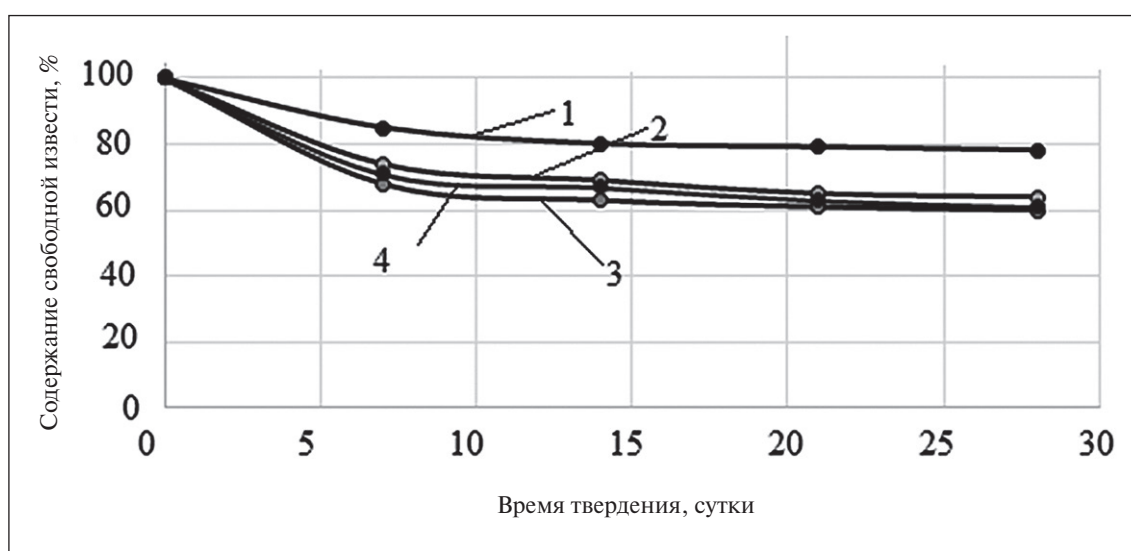


Рис. 1. Кинетика изменения концентрации свободной СаО в известковых композициях: 1 – контрольный известковый состав без добавок; 2 – искусственная гидравлическая известь (добавка метаксаолин 40%); 3 – искусственная гидравлическая известь (добавка метаксаолин 10% + цемент 25%); 4 – искусственная гидравлическая известь (добавка микрокремнезем 10% + цемент 25%)

гидроксидом кальция и атмосферным газообразным диоксидом углерода образует кальцит, который заполняет и закрывает трещины.

При разработке рецептуры штукатурного раствора оценивалось влияние вида кварцевого песка на прочность раствора. Для этого использовали термодинамический метод. При оценке оптимального вида песка в качестве вяжущего применяли искусственную гидравлическую известь, содержащую воздушную гашеную известь и 40% метаксаолина. Образцы твердели в воздушно-сухих условиях. Результаты исследований приведены в табл.4.

Установлено, что с увеличением значений СЭП кварцевых песков наблюдается повышение прочности при сжатии известкового композита. Так, прочность при сжатии известкового композита на основе сурского песка, характеризующегося более высоким значением свободной энергии поверхности (СЭП), равной 70,285 мН/м, составляет 2,4 МПа,

а на основе песка Чаадаевского месторождения, свободная энергия поверхности (СЭП) которого равна 62,8 мН/м, – 1,92 МПа (табл.4). Оптимальным с энергетической точки зрения является песок Сурского месторождения, обеспечивающий более высокую прочность известкового композита.

Растворы на основе искусственной гидравлической извести обеспечивают достаточную прочность сцепления с кирпичной подложкой, составляющую 0,4–0,55 МПа (рис. 2). Прочность сцепления раствора на основе гидравлической извести составляет $R_{сц} = 0,6$ МПа.

Повышение прочности сцепления объясняется пуццолановой реакцией метаксаолина, которая усиливает образование геля гидросиликата кальция (С–S–Н), улучшая микроструктуру и адгезионные свойства раствора.

Сопоставление свойств раствора на основе искусственной гидравлической извести НЛ со свойствами

Таблица 4. Значения свободной энергии поверхности (СЭП) кварцевых песков

Наименование песка	Полярная составляющая СЭП, σ^p , мДж/м ²	Дисперсионная составляющая СЭП, σ^d , мДж/м ²	СЭП, мДж/м ²	Энергия поверхности, Дж/кг	Прочность при сжатии, МПа
Ртищевский	50,48	18,49	68,97	593,142	2,1
Раменский	53,08	16	69	614,1	2,3
Никольский	50,335	18,49	68,82	557,442	2,0
Сурский	51,79	18,49	70,285	687,106	2,4
Чаадаевский	48,36	14,44	62,8	436,46	1,92

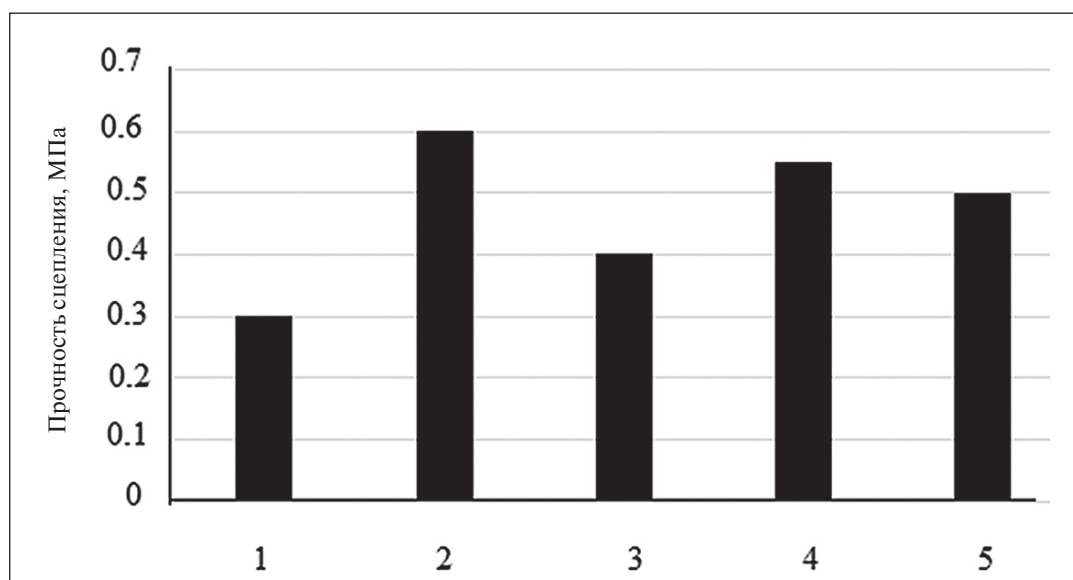


Рис. 2. Прочность сцепления раствора с кирпичной подложкой: 1 – раствор на основе воздушной извести; 2 – раствор на основе гидравлической извести; 3 – раствор на основе воздушной извести + 25% портландцемента; 4 – раствор на основе гашеной извести + 40% метаксаолина; 5 – раствор на основе негашеной извести + 10% метаксаолина

раствора на основе натуральной гидравлической извести NHL показывает, что предлагаемая рецептура искусственной гидравлической извести обеспечивает требования национальных и международных нормативных документов в части достижения минимального значения предела прочности при сжатии, равного 2,0 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что применение воздушной негашеной извести при приготовлении искусствен-

ной гидравлической извести способствует более прочному формированию структуры известкового композита. Выявлено, что пористость известкового камня на основе искусственной гидравлической извести меньше по сравнению с камнем на основе воздушной извести, а для известкового камня на основе составов с применением цемента – меньше, чем на основе гидравлической извести. Разработаны составы искусственной гидравлической извести НЛ и штукатурного раствора на ее основе, предназначенные для реставрации объектов культурного наследия и отделки вновь возводимых объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Логанина В.И., Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Давыдова О.А. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками. *Региональная архитектура и строительство*. 2010;2:53-57. EDN: **MXHSSL**
2. Логанина В.И., Давыдова О.А., Симонов Е.Е. Исследования закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита. *Строительные материалы*. 2011;12:62-65. EDN: **OORTDR**
3. Пухаренко Ю.В. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей / Ю.В. Пухаренко, А.М. Харитонов, Н.Н. Шангина, Т.Ю. Сафонова. *Вестник гражданских инженеров*. 2011;1:98-103.
4. Maravelaki-Kalaitzaki P., Bakolas A., Karatasios I., Kilikoglou V. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cem. Concr. Res.* 2005;35:1577-1586. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.001>
5. Kang S.-H., Lee S.-O., Hong S.-G., Kwon Y.-H. Historical and Scientific Investigations into the Use of Hydraulic Lime in Korea and Preventive Conservation of Historic Masonry Structures. *Sustainability*. 2019;11:5169.
6. Шелихов Н.С., Рахимов Р.З. Гидравлическая известь и романцемент из минерального сырья Татарстана. *Строительный вестник Татарстана*. 2002;2:48-53.
7. Arizzi A., Cultrone G. Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: a mineralogical, textural and physical-mechanical study. *Constr. Build. Mater.* 2012;31: 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.069>
8. Aggelakopoulou E., Bakolas, A., Moropoulou A. Properties of lime–metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Appl. Clay Sci.* 2011;53:15-19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.005>
9. Stefanidou M., Tsardaka E.C., Pavlidou E. Influence of nano-silica and nano-alumina in lime-pozzolan and lime-metakaolin binders. *Mater Today Proc.* 2017;4:6908-6922. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.020>
10. Duran A., Navarro-Blasco I., Fernandez J.M. et al. Long-term mechanical resistance and durability of air lime mortars with large additions of nanosilica. *Constr Build Mater.* 2014; 58:147-158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.030>
11. Nunes C., Slizkova Z. Freezing and thawing resistance of aerial lime mortar with metakaolin and a traditional water-repellent admixture. *Constr Build Mater.* 2016;114:896-905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.029>
12. Ramenzianpour A.A., Kazemian N., Sedighi S. et al. Study of durability of mortars with natural pozzolans under carbonation. *J. New Approach Civil Eng.* 2019;3(3):63-75.
13. Ergenc D., Fort R. Accelerating carbonation in lime-based mortar in high CO₂ environments. *Constr Build Mater.* 2018; 188:314-325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.125>
14. Navratilova E., Rovnanikova P. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Constr Build Mater.* 2016;120:530-539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>
15. Шангина Н.Н., Харитонов А.М. Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры. *Сухие строительные смеси*. 2011;4:16-19. EDN: **UBYJMN**
16. Лукутцова Н. П., Карпиков Е. Г., Пыкин А. А., Панов Д. М. Исследование пуццолановой активности добавки высокодисперсного волластонита методом Фраттини. *Вестник Белгородского государственного тех-*

нологического университета им. В.Г. Шухова. 2024;9(12):8-17. <http://dspace.bstu.ru/jspui/handle/123456789/4840>.
<https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-12-8-17> EDN: BZOUFW

17. Танг В.Л., Нгуен З.Т.Л. Пуццоланическая активность тонкодисперсных минеральных компонентов различной природы Вьетнама. *Техника и технология силикатов*. 2021;28(1):7-12. EDN: JIHBPI

18. Абрамовская И.Р., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Вешнякова Л.А., Тутыгин А.С. Энергетика высокодисперсных композитов горных пород. *Нанотехнологии в строительстве*. 2013;3:56-65. http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_3_2013.pdf EDN: QBMULT

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

Логанина Валентина Ивановна – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Управление качеством», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28, Российская Федерация, loganin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7532-0074>

Гарькина Ирина Александровна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и математическое моделирование», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, Пенза, ул. Г. Титова, 28, Российская Федерация, i.a.naum@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3371-3579>

Ткач Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор кафедры Градостроительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, tkachev@mgsu.ru <https://orcid.org/0000-0003-2132-4971>

Степина Ирина Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, kafSM@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5358-2935>

ВКЛАД АВТОРОВ

Логанина В.И. – научное руководство, подготовка образцов, определение удельной поверхности, сбор, анализ и обработка результатов, написание статьи.

Гарькина И.А. – изготовление образцов.

Ткач Е.В. – администрирование проекта, проверка результатов исследования и выводов.

Степина И.В. – обзор литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.03.2026; одобрена после рецензирования 05.04.2026; принята к публикации 10.04.2026.