

Гидравлическая известь с применением пуццолановых добавок

Валентина Ивановна Логанина^{1*} , Мария Владимировна Зайцева² , Еркебулан Биссенгалиевич Мажитов³ 

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Российская Федерация

² Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва, Российская Федерация

³ Западно-Казахский аграрно-технический университет им. Жангир хана, Уральск, Казахстан

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При строительстве зданий и сооружений в прошлом использовались в основном воздушная и гидравлическая известь. Учитывая низкий объем выпуска гидравлической извести в России, представляет интерес исследование возможности замены в штукатурных растворах природной гидравлической извести NHL на искусственную гидравлическую известь HL, не уступающую по своим свойствам натуральной NHL. **Материалы и методы.** Искусственную гидравлическую известь HL получали смешением воздушной извести с пуццолановой добавкой. В качестве пуццолановой добавки в работе применяли диатомит Инзенского месторождения, микрокремнезем конденсированный неуплотненный МК-85, высокоактивный метакаолин ВМК-45. **Результаты.** Установлено, что наиболее эффективной пуццолановой добавкой является метакаолин. Введение метакаолина в известковое вяжущее в количестве 10–50% по массе влечет за собой возрастание прочности при сжатии образцов раствора в возрасте 28 сут. в 2,8–12,83 раз по сравнению с образцом без добавки. Наибольшее значение прочности достигается при добавлении в состав вяжущего 50% метакаолина к извести – через 28 дней твердения прочность составляет 1,01 МПа. **Заключение.** Установлено, что применение метакаолина в количестве 40–50% от массы воздушной извести позволяет получить искусственную гидравлическую известь. Разработанные составы искусственной гидравлической извести предлагается применять для реставрации зданий исторической застройки, а также отделки вновь возводимых объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: известь, пуццолановые добавки, прочность, пластическая прочность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Логанина В.И., Зайцева М.В., Мажитов Е.Б. Гидравлическая известь с применением пуццолановых добавок. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(1):15–21. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-15-21>. – EDN: XOFMTM.

Hydraulic lime with the use of pozzolanic additives

Valentina I. Loganina^{1*} , Maria V. Zaytseva² , Yerkebulan B. Mazhitov³ 

¹ Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation

² Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation

³ West Kazakh Agrarian and Technical University named after Zhanqir Khan, Uralsk, Kazakhstan

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

ABSTRACT

Introduction. In the past, air and hydraulic lime were primary materials in building constructions. Due to the limited production of hydraulic lime in Russia, it is of interest to study the possibility of replacing natural hydraulic lime NHL in plaster mortars with artificial hydraulic lime HL, which is not inferior in its properties to natural NHL. **Materials and methods.** Artificial hydraulic lime

© Логанина В.И., Зайцева М.В., Мажитов Е.Б., 2026

HL was obtained by mixing air lime with a pozzolan additive. Diatomite from the Inzenskoye deposit, condensed, uncompacted microsilicon MK-85, and highly active metakaolin VMK-45 were used as pozzolan additives in the work. **Results.** It has been established that the most effective pozzolan supplement is metakaolin. The introduction of metakaolin into a lime binder in an amount of 10–50% by weight entails an increase in the compressive strength of the solution samples at the age of 28 days by 2.8–12.83 times compared with the sample without the additive. The highest strength value is achieved when 50% metakaolin is added to lime to the binder – after 28 days of hardening, the strength is 1.01 MPa. **Conclusion.** It has been established that the use of metakaolin 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 the finishing of newly erected facilities.

KEYWORDS: lime, pozzolan additives, strength, plastic strength

FOR CITATION:

Loganina V.I., Zaytseva M.V., Mazhitov E.B. Hydraulic lime with the use of pozzolanic additives. *Nanotechnologies in Construction*. 2026; 18(1):15–21. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-15-21>. – EDN: XOFMTM.

ВВЕДЕНИЕ

Для реставрации объектов культурного наследия и отделки фасадов вновь строящихся зданий широкое применение находят известковые составы благодаря своей совместимости со старыми материалами и способности пропускать воздух через конструкции [1]. Несмотря на свою историческую значимость, известковые растворы обладают определенными недостатками, такими как выраженная пористость и ограниченная прочность на ранних стадиях, что потенциально может повлиять на эффективность реставрации.

Низкая эксплуатационная стойкость известковых штукатурных растворов предопределяет введение в их рецептуру различных модифицирующих добавок, которые способствуют формированию структуры, способной противостоять воздействиям окружающей среды [2–6]. Для повышения срока службы растворов на основе воздушной извести в рецептуру добавляют портландцемент, при этом содержание портландцемента не должно превышать 30% от общего содержания связующего вещества. Нашло широкое применение в рецептуре известковых растворов природных или искусственных пуццоланов, таких как обожженная глина, летучая зола или шлак и микрокремнезем. Природные пуццоланы представляют собой кремнистые или кремнеземистые и алюминиевые материалы, которые сами по себе обладают незначительными или вовсе отсутствующими цементирующими свойствами, но находятся в мелкодисперсной форме и в присутствии влаги химически реагируют с гидроксидом кальция при обычной температуре, образуя соединения, обладающие цементирующими/связующими свойствами [7].

Использование тройных систем (известь : пуццолан : цемент) в известковых растворах улучшает раннюю прочность, адгезию, долговечность отделочного слоя. Начиная с 90-х годов, эти тройные связующие

системы широко используются в проектах реставрации. Гидравлические компоненты штукатурного слоя способствуют повышению прочности, устойчивости к влаге и лучшей устойчивости к атмосферным воздействиям.

Среди наиболее важных факторов, влияющих на долговечность отделочного слоя на основе известковых растворов, можно назвать распределение размеров пор и прочность связующей матрицы [8]. Известковые растворы подвержены разрушению в процессе циклического замораживания-оттаивания. Для предотвращения разрушения от действия замораживания-оттаивания отделочного слоя на основе известковых растворов в рецептуру вводят воздуховлекающие добавки, способствующие оптимизации пористости [9].

За рубежом для реставрации зданий исторической застройки применение находит природная гидравлическая известь NHL [10–14]. Преимущества применения гидравлической извести заключаются в паропроницаемости штукатурных растворов, отсутствии высолов на поверхности, влагостойкости, прочности (материал сохраняет прочность даже при контакте с водой), экологичности (продукт безопасен для окружающей среды, не выделяет вредных веществ) [15, 16]. Растворы на основе натуральной гидравлической извести совместимы со старой кладкой, обладают низкой усадочной деформацией, устойчивостью к воздействию соли и мороза, а также деформативностью и паропроницаемостью. В стандарте EN 459 выделены три класса гидравлической извести (NHL2, NHL3.5 и NHL5). В соответствии с российским стандартом ГОСТ 9179-2018, гидравлическая известь классифицируется как сильногидравлическая и слабогидравлическая.

Гидравлическая известь как минеральное связующее нашла широкое применение в североамериканских, западноевропейских проектах реставрации благодаря быстрому схватыванию по сравнению

с растворами на основе воздушной извести и высокой паропроницаемости.

Учитывая низкий объем выпуска гидравлической извести в России, представляет интерес исследование возможности замены в штукатурных растворах природной гидравлической извести NHL на искусственную гидравлическую известь HL, не уступающую по своим свойствам натуральной NHL [17–19].

Целью работы является разработка состава искусственной гидравлической извести, применяемой для реставрации зданий исторической застройки и отделки вновь возводимых объектов.

При разработке рецептуры декоративного штукатурного состава учитывались рекомендации национальных и международных нормативных документов. В соответствии с DIN 18550, минимальная прочность при сжатии штукатурных цементных растворов должна быть не менее 10 МПа. Растворы на основе гидравлической и высокогидравлической извести должны иметь минимальный предел прочности при сжатии, соответственно, 1,0 и 2,5 МПа. К штукатурным растворам на воздушной извести требований в отношении прочности при сжатии не предъявляется.

МЕТОДОЛОГИЯ

Для разработки состава искусственной гидравлической извести в работе применяли воздушную гашеную известь 2 сорта.

Искусственную гидравлическую известь HL получали смешением воздушной извести с пуццолановой добавкой. В качестве пуццолановой добавки в работе применяли диатомит Инзенского месторождения, микрокремнезем конденсированный неуплотненный МК-85 ($S_{уд} = 24\,000\text{ м}^2/\text{кг}$), масс. %: $\text{SiO}_2 - 92$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.9$; $\text{C} - 1.6$; $\text{CaO} - 0.85$; $\text{MgO} - 0.4$; (ОО «YDD Corporation», Казахстан), высокоактивный метакаолин ВМК-45 ($S_{уд} = 1700\text{ м}^2/\text{кг}$) с содержанием (в % по массе): $\text{SiO}_2 - 53$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 42$ и пуццолановой активностью 1210 мг/г (ОО «Синерго», РФ).

Химический состав диатомита, выполненный на спектрометре фирмы «Thermo Scientific», представлен в табл. 1.

Исследование гранулометрического состава диатомита, проведенное с помощью автоматического лазерного анализатора Analysette 22, показало, что при величине удельной поверхности $S_{уд} = 10\,982,58\text{ см}^2/\text{г}$ распределение размеров частиц является двухмодальным, средний диаметр частиц составляет 14,63 мкм, преобладает размер частиц в диапазоне 5–10 мкм – 25,16% и 10–20 мкм – 28,12%, при этом более 99% составляют частицы с размером менее или равно 66,64 мкм. Содержание частиц в диапазоне 0,05–1 мкм составляет 2,13%, а в диапазоне 50–100 мкм – 4,79%.

Таблица 1. Химический состав диатомита

Оксиды	Вес, %
SiO_2	60–63
Al_2O_3	25,0–26,5
Fe_2O_3	2–3,3
TiO_2	0,2–0,3
K_2O	1,1–1,3
Na_2O	0,1–0,3
CaO	0,2–0,4
MgO	0,2–0,4
Потери при прокаливании (1000 °С)	6,27–7,5

Результаты количественного химического анализа, проведенного на спектрометре СРМ 25, показали, что содержание кремнезема составляет до 82%, при этом около 33–36% находится в аморфном виде.

Средний размер частиц, по данным лазерной гранулометрии (лазерный микроанализатор MASTERSISER), для метакаолина составлял 19,7 мкм.

В качестве заполнителя применяли сурский кварцевый песок фракции 0,14–0,315 с соотношением вяжущее : песок = 1 : 3. Плотность песка составляла 1527 кг/м³. Изготавливались образцы-балочки размером 40 × 40 × 160 мм, хранили в формах в течение первых суток при температуре 20 °С и относительной влажности 90–100%. После извлечения из форм образцы выдерживали в воздушно-сухих условиях при относительной влажности 65±5% и температуре 18–20 °С.

Для сравнения в работе применяли природную гидравлическую известь «Тамасли» NHL5. Гидравлический модуль извести составляет $M = 2,69$. Минералогический состав гидравлической извести представлен в табл. 2.

Прочность при сжатии образцов определяли с помощью испытательной машины типа ИР 5057–50 и рассчитывали по формуле:

$$R_{сж} = P/F, \quad (1)$$

где P – разрушающая сила, Н;
 F – площадь поперечного сечения образца до испытания, м².

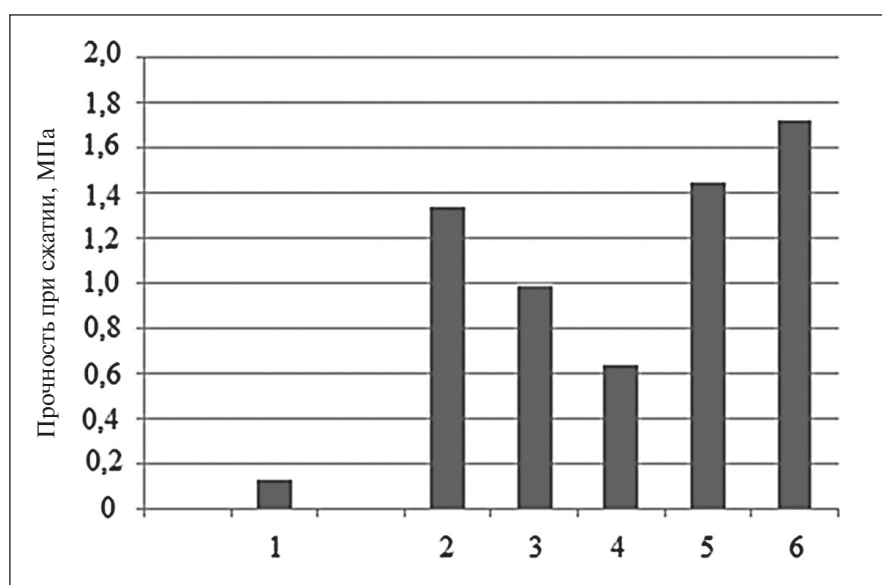
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты исследований приведены в табл. 3, 4 и на рис. 1, 2.

Анализ данных, приведенных на рис. 1, свидетельствует, что при введении пуццолановых добавок в известковое вяжущее наблюдается повышение прочно-

Таблица 2. Минералогический состав гидравлической извести

Наименование минералов	Химическая формула	Значения
Карбонат кальция непрокаленный	CaCO_3	0,1
Двухкальциевый силикат	2CaSiO_2	48,7
Гидроксид кальция (свободная гашеная гидратная известь)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	5,3
Сульфат кальция (гипс)	CaSO_4	35,8
Оксид кальция (негашеная известь)	CaO	0,6
Оксид магния	MgO	1,7
Карбонат магния	MgCO_3	1,1
Карбонат магния-кальция доломит	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	4,7
Алюминат трикальция	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	1,5
Алюмоферрит кальция (феррит)	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	0,5
Дисульфид железа	FeS_2	

**Рис. 1.** Прочность при сжатии известкового камня:

1 – без добавок; 2 – содержание метаксаолина 20%; 3 – содержание микрокремнезема 20%; 4 – содержание диатомита 20%; 5 – содержание метаксаолина 30%; 6 – содержание метаксаолина 40%

сти при сжатии известкового камня. Так, при содержании микрокремнезема в количестве 20% от массы извести прочность при сжатии составляет 0,99 МПа, при содержании диатомита – 0,64 МПа, в то время как прочность контрольных образцов на основе воздушной извести – 0,13 МПа. Наиболее эффективной пуццолановой добавкой является метаксаолин. При равном содержании пуццолановых добавок применение метаксаолина способствует более высокому повышению прочности при сжатии известкового камня, составляющему 1,34 МПа. Увеличение содержания метаксаолина до 40% от массы извести приводит к повышению прочности при сжатии до 1,71 МПа.

В табл. 3 приведены значения прочности при сжатии образцов раствора на основе извести с пуццолановыми добавками

Введение метаксаолина в известковое вяжущее в количестве 10–50% по массе влечет за собой возрастание прочности при сжатии образцов раствора в возрасте 28 сут. в 2,8–12,83 раз по сравнению с образцом без добавки. Наибольшее значение прочно-

сти достигается при добавлении в состав вяжущего 50% метаксаолина к извести – через 28 дней твердения прочность составляет 1,01 МПа (табл. 3).

Добавки микрокремнезема и диатомита в составе вяжущего повышают прочность раствора на сжатие, но не так значительно, как при добавлении метаксаолина. Повышение прочности при сжатии составляет в 1,85–3,58 раз при применении в качестве пуццолановой добавки диатомита и в 2,09–3,82 раз – при применении микрокремнезема.

Значения прочности при сжатии известкового камня и раствора на основе воздушной извести с пуццолановыми добавками свидетельствуют, что применение метаксаолина в количестве 40–50% от массы воздушной извести позволяет получить искусственную гидравлическую известь, т.к. в соответствии с ГОСТ 9179-2018 прочность гидравлической извести в возрасте 28 суток твердения должна быть не менее 1,7 МПа.

Полученные результаты совпадают с данными научно-технической литературы. По данным [20,

Таблица 3. Прочность при сжатии известковых растворов

Наименование вяжущего	Наименование пуццолановой добавки	Содержание пуццолановой добавки (по массе)	Соотношение известь : песок	Прочность сжатия, МПа
Гидравлическая известь	–	–	1 : 3	1,22
Воздушная известь	диатомит	10	1 : 2,9	0,15
Воздушная известь	диатомит	20	1 : 2,8	0,21
Воздушная известь	диатомит	30	1 : 2,7	0,29
Воздушная известь	микрокремнезем	10	1 : 2,9	0,17
Воздушная известь	микрокремнезем	20	1 : 2,8	0,25
Воздушная известь	микрокремнезем	30	1 : 2,7	0,31
Воздушная известь	метакаолин	10	1 : 2,9	0,24
Воздушная известь	метакаолин	20	1 : 2,8	0,39
Воздушная известь	метакаолин	30	1 : 2,7	0,78
Воздушная известь	метакаолин	50	1 : 2,5	1,01
Воздушная известь	–	–	1 : 3	0,081

21], добавление метакаолина (МК) в известковые растворы значительно повышают прочность раствора на изгиб, сжатие и сцепление. Раствор с содержанием МК 3,0% достиг или превзошел стандарт прочности европейской натуральной гидравлической извести NHL5. Такими же свойствами обладает порошок на основе обожженного глиняного кирпича. Образец с содержанием МК 9,0% демонстрирует оптимальную прочность для целей реставрации, обеспечивая адекватные механические свойства без ущерба для структурной целостности исторических зданий.

В работах [22] отмечается, что при твердении на воздухе при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $W = 50\%$ составов с ме-

такаолином существенно снижаются усадочные деформации по сравнению с контрольным образцом за счет формирования на ранней стадии твердения этtringита.

Выявлено, что растворные смеси на основе искусственной гидравлической извести имеют более быстрый набор пластической прочности (рис. 2). Так, пластическая прочность состава на основе воздушной извести с применением диатомита в количестве 20% от массы извести составляет в возрасте 7 ч с момента затворения 7,29 кПа, а с применением метакаолина в количестве 50% от массы извести – 55 кПа.

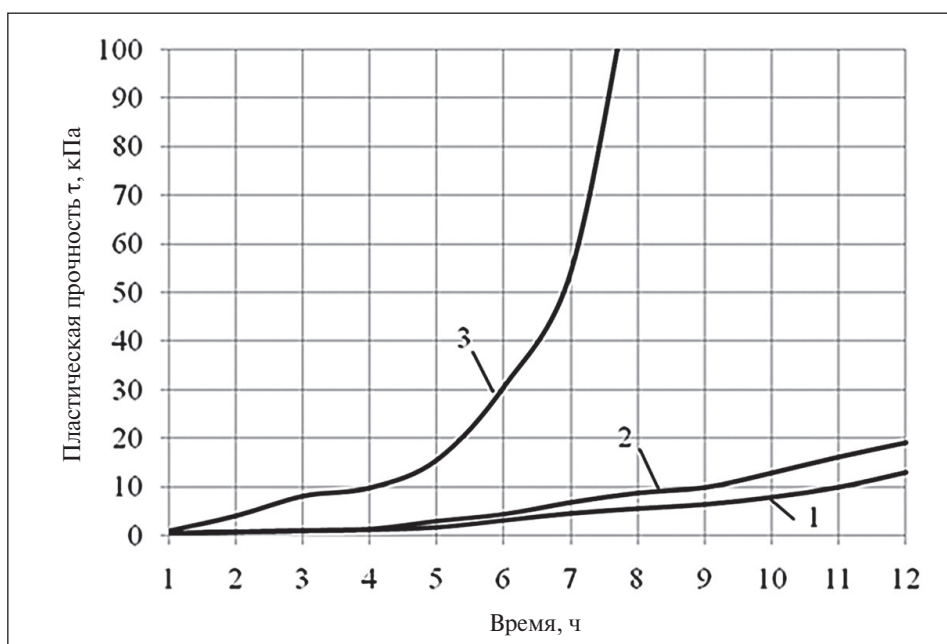


Рис. 2. Изменение пластической прочности известковой смеси: 1 – контрольный состав на известковом вяжущем; 2 – состав на известковом вяжущем с использованием диатомита; 3 – состав на известковом вяжущем с использованием метакаолина

В известково-метакаолиновых пастах гель С–S–Н обнаруживается спустя 1–2 сут. с момента начала взаимодействия [23]. Установлено, что при высоких дозировках метакаолин стимулирует гидратацию портландцемента [1]. Наличие пуццолановой реакции между вяжущим и пуццолановой добавкой способствует обеспечению более низкой общей пористости и, следовательно, также способствуют долговечности воздушно-известково-пуццолановых растворов [24]. Кроме того, условия раннего твердения обеспечивает транспорт CO_2 для дальнейшей реакции карбонизации, что способствует синергетическому эффекту и гарантирует уровень ранней прочности в известково-пуццолановых системах [25].

В работах [26] отмечается, что, согласно результатам рентгенодифракционного анализа, основные фазы известкового образца на 28 и 56 день твердения состояли из $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , SiO_2 и С–S–Н. Интенсивность дифракционного пика С–S–Н увеличивалась, а дифракционный пик $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ослабевал по мере увеличения содержания МК. Это объясняется тем, что активные SiO_2 и Al_2O_3 непосредственно реагируют с известью, расходуя $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и способствуя гидратации вяжущего. Процесс гидратации в основном завершился на 28 день, а последующее повышение концентрации CaCO_3 объясняется карбонизацией.

Результаты испытания свидетельствуют, что коэффициент капиллярного водопоглощения композита на основе искусственной гидравлической извести

Таблица 4. Значения водопоглощения при капиллярном всасывании (DIN 52617)

Состав	Коэффициент водопоглощения, $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ч}^{0,5})$
Контрольный состав	0,95
Состав с применением диатомита	0,93
Состав с применением микрокремнезема	0,924
Состав на основе искусственной гидравлической извести с применением метакаолина	0,908

с применением метакаолина ниже, чем у композита с использованием диатомита и микрокремнезема (табл. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан состава искусственной гидравлической извести НЛ, включающий воздушную известь второго сорта, пуццолановую добавку метакаолин в количестве 40% от массы извести. Разработанные составы искусственной гидравлической извести предлагается применять для реставрации зданий исторической застройки, а также отделки вновь возводимых объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Lanas J., Sirera R., Alvarez J.I. Study of the mechanical behaviour of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions. *Cem Concr Res.* 2006;36:961-970.
- Сайед Хемед, Шоеб Ахмед, Мерват Халил, Ахмед Абд Эл Азиз. Механические характеристики реставрационных растворов на основе наномодифицированной извести. *Строительные материалы.* 2018;9:66-74. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-763-9-66-74> – EDN: XZJAPB
- Логанина В.И., Давыдова О.А., Симонов Е.Е. Исследование закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита. *Строительные материалы.* 2011;12:62-65. – EDN: OORTDR
- Логанина В.И., Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Давыдова О.А. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками. *Региональная архитектура и строительство.* 2020;2:53-57.
- Ventola M., Vendrell P., Giraldez L. Merino. Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials.* 2011;25(8):3313-3318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.020>
- Loganina V., Davydova O., Fediuk R., Amran Mugahed, Klyuev S., et al. Improving the durability of lime finishing mortars by modifying them with silicic acid sol. *Materials.* 2022;15:2360. <https://doi.org/10.3390/ma15072360>
- Grilo J., Faria P., Veiga R., Silva A.S., Silva V., et al. New natural hydraulic lime mortars—physical and microstructural properties in different curing conditions. *Constr. Build. Mater.* 2013;54:378-384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.078>
- Bakolas A., Aggelakopoulou E., Anagnostopoulou S., Moropoulou A. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin–lime pastes. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2006;84(1):157-163.
- Nunes C., Shi 'z'kova' Z. Freezing and thawing resistance of aerial lime mortar with metakaolin and a traditional water-repellent admixture. *Constr Build Mater.* 2016; 114:896–905
- Батаева П.Д. Обзор составов и технологий для ремонта и реставрации объектов культурного наследия. *Вестник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук.* 2021;5:49-53.
- 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>

12. Silva B.A., Ferreira Pinto A.P., Gomes A. Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works. *Constr. Build. Mater.* 2015;94:346–360 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.058>
13. Хаджишалапов Г.Н., Батаева П.Д., Батаева Х.М., Батаев А.Д. Экспериментальный подбор ремонтно-реставрационного состава раствора на основе гидравлической строительной извести. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.* 2025;52(2):227–234. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-227-234> – EDN: KEWTGA
14. Zalmanoff N. Carbonation of Lime Putties to Produce High Grade Building. *Rock Products.* 1956;182–186.
15. Cultrone G., Sebastián E., Ortega Huertas M. Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural. *Cement and Concrete Research.* 2005;16(12):278–289. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.12.012>
16. Grist E.R., Paine K.A., Heath A., Norman J., Pinder H. The environmental credentials of hydraulic lime-pozzolan concretes. *J. Clean. Prod.* 2015; 93:26–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.058>
17. Xu S., Wang J., Sun Y. (2015). Effect of water binder ratio on the early hydration of natural hydraulic lime. *Mater. Struct.* 2015;48:3431–3441. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0410-8>
18. Charola E. et al. Pozzolanic components in lime mortars: correlating behaviour, composition and microstructure. *Restoration of Buildings and Monuments.* 2005;11(2):111–118.
19. Aggelakopoulou E., Bakolas A., Moropoulou A. Properties of lime–metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Appl. Clay Sci.* 2011;53:15–19.
20. Vavričuk A., Bokan-Bosiljkov V., Kramar S. The influence of metakaolin on the properties of natural hydraulic lime-based grouts for historic masonry repair. *Constr. Build. Mater.* 2018;172:706–716.
21. Siddique R., Klaus J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete // *Applied Clay Science.* 2009;43(3):392–400.
22. Badogiannis E., Kakali G., Tsvivilis S. Metakaolin as supplementary cementitious material. Optimization of kaolin to metakaolin conversion. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2005;81(2):457–462.
23. Coleman N.J., Mcwhinnie W.R. The solid-state chemistry of metakaolin-blended ordinary Portland cement. *J. Mat. Sci.* 2000;35(11):2701–2710.
24. Казанская Л.Ф., Сметанин А.А. Механические характеристики реставрационных растворов при использовании в их составе метакаолинов. *Известия Петербургского университета путей сообщения.* 2023;20(4):853–859. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-4-853-859> – EDN: HIXLZI
25. Kuliffayova M., Krajci L., Janotka I., Smatko V. Thermal behavior and characterization of cement composites with burnt kaolin sand. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2012;108(2):425–432.
26. Melo C.R., Angioletto E., Riella H.G. et al. Production of metakaolin from industrial cellulose waste. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2011. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1892-z>
27. Bumanis G., Vitola L., Stipniece L., Locs J., Korjajins A., Bajare D. Evaluation of Industrial by-products as pozzolans: A road map for use in concrete production. *Case Stud. Constr. Mater.* 2020;13:e00424.

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, Пенза, Российская Федерация, loganin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7532-0074>

Зайцева Мария Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры международного бизнеса, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва, Российская Федерация, zajc@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8222-7879>

Мажитов Еркебулан Биссенгалиевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Индустриально-технологического института Западно-Казахский аграрно-технический университет им. Жангир хана, Уральск, Казахстан, mazhitov201090@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6155-4865>

ВКЛАД АВТОРОВ

Логанина В.И. – концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Зайцева М.В. – валидация результатов исследования и выводов.

Мажитов Е.Б. – обработка экспериментальных данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.12.2025; одобрена после рецензирования 04.02.2026; принята к публикации 10.02.2026.