



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.54

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-19-30

Применение экспериментально-статистического моделирования процесса термообработки полиминеральных глин, вводимых в цементные композиты

Т.А. Низина, В.В. Володин, Х.Б. Матякубов

Татьяна Анатольевна Низина*, Владимир Владимирович Володин, Хасан Бахрамович Матякубов
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
Саранск, Российская Федерация
*nizinata@yandex.ru**, *volodinvv1994@gmail.com*, *abakan_94h@mail.ru*



Представлен способ получения активной минеральной добавки путем обжига полиминеральной глины. Показана возможность получения цементных композитов с повышенными прочностными характеристиками как за счет введения глинистой добавки, так и за счет оптимизации режима обжига глины. С использованием методов экспериментально-статистического моделирования определен рациональный режим обжига глины при разработке активной минеральной добавки, вводимой в цементные композиты.

Ключевые слова: полиминеральная глина, активная минеральная добавка, цементные композиты, экспериментально-статистическое моделирование, скаляризация

Для цитирования:

Низина Т.А., Володин В.В., Матякубов Х.Б. Применение экспериментально-статистического моделирования процесса термообработки полиминеральных глин, вводимых в цементные композиты // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 3. С. 19-30.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-19-30



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-19-30

Application of experimental-statistical modelling for heat treatment of polymineral clays introduced into cement composites

T.A. Nizina, V.V. Volodin, Kh.B. Matyakubov

Tatyana A. Nizina*, Vladimir V. Volodin, Khasan B. Matyakubov

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogaryova, Saransk, Russia

*nizinata@yandex.ru**, *volodinvv1994@gmail.com*, *abakan_94h@mail.ru*



The article presents a method of producing an active mineral additive by firing polymineral clay. The authors show the possibility of obtaining cement composites with increased strength characteristics both due to the introduction of clay additive and due to the optimisation of the clay firing conditions. The authors used experimental and statistical modelling techniques to determine the appropriate clay firing conditions to produce an active mineral additive for cement composites.

Keywords: polymineral clay, active mineral additive, cement composites, experimental-statistical modelling, scalarisation

For citation:

Nizina T.A., Volodin V.V., Matyakubov Kh.B. Application of experimental-statistical modelling for heat treatment of polymineral clays introduced into cement composites // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 3. P. 19-30. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-19-30



ВВЕДЕНИЕ

Объем производства цементных бетонов в мире неуклонно возрастает и уже превысил отметку в 10 млрд. м³ в год [1], что позволяет называть их главным строительным материалом XXI века. При этом современные методы производства портландцемента как основного компонента современных бетонов являются энергоемкими. Традиционным способом снижения клинкероемкости портландцемента является совместный помол клинкера с замещающими добавками – гидравлическими, пуццолановыми или инертными [1]. Также снижению потребления портландцемента способствует применение минеральных добавок в качестве самостоятельных компонентов, что позволяет улучшить физико-механические и эксплуатационные свойства бетонов при сниженном расходе портландцемента [2-6]. С середины прошлого столетия ученые осуществляют поиск и разработку модифицирующих добавок для бетонов, снижающих расход портландцемента. Установлено, что глины – минеральные добавки, получаемые обжигом и помолом полиминеральных глин, хорошо подходят для решения описанных задач [7-9]. Исследования пуццолановой активности обожженных глин из различных регионов Российской Федерации показали, что эти породы обладают достаточной активностью при замещении до 10-30% цемента [10, 11].

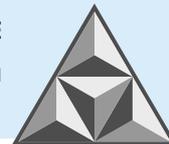
Специфика минерально-сырьевой базы Мордовии (рис. 1) позволила организовать производство портландцемента, попутно обеспечивающее соседние регионы вяжущим для бетонов и растворов. Производство портландцемента характеризуется истощением запасов исходного сырья, в связи с чем на территории республики проводятся геологические исследования с целью расширения сырьевой базы [12].



Рис. 1. Карта полезных ископаемых Республики Мордовия [12]

Fig. 1. Map of mineral resources of the Republic of Mordovia [12]

В Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева ведется разработка минеральных добавок на основе глин, которыми богата территория Республики Мордовия [13-18]. Целью данной работы является оптимизация режимов обжига полиминеральных глин, вводимых в бетоны, с применением методов экспериментально-статистического моделирования.



МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вязущее состояло из портландцемента ЦЕМ I 42,5Н производства АО «Серебряковцемент» и минеральных добавок – глинистых, полученных обжигом глины при отношении Ж:Т = 0.3. Для получения минеральных добавок использовали глину Старошайговского месторождения Республики Мордовия. Химический и минералогический составы глины представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Химический состав глины

Table 1. Chemical composition of clay

Химический состав, масс. %											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	ZrO ₂	MnO	BaO
66.43	13.72	10.90	4.32	0.55	1.68	1.12	0.64	0.26	0.18	0.13	0.07

Таблица 2. Минералогический состав глины

Table 2. Mineralogical composition of clay

Минералогический состав, %			
Каолинит	Иллит	Полевые шпаты	Кварц
18.0	23.2	11.9	46.9

Эффективные режимы обжига глинистых пород выявляли с применением методов экспериментально-статистического моделирования [19]. Были получены полиномиальные уравнения изменения предела прочности $R_{сж.28}$ и модуля упругости $E_{сж.28}$ при сжатии, а также предела прочности на растяжение при изгибе $R_{изг.28}$:

$$R_{сж.28} = 66.93 + 0.89 x_1 + 0.31 x_2 - 8.08 x_3 - 0.89 x_1 x_2 - 0.47 x_1 x_3 - 0.29 x_2 x_3 + 0.17 x_1 x_2 x_3 - 8.31 x_1^2 + 0.62 x_2^2 + 0.85 x_3^2 + 0.71 x_1^2 x_2 + 1.31 x_1 x_2^2 + 3.64 x_1^2 x_3 + 0.36 (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2; \quad (1)$$

$$E_{сж.28} = 18968.77 + 1072.41 x_1 + 43.48 x_2 - 1588.27 x_3 - 161.68 x_1 x_2 + 38.92 x_1 x_3 - 36.54 x_2 x_3 + 81.77 x_1 x_2 x_3 + 124.17 x_1^2 - 366.20 x_2^2 + 478.82 x_3^2 + 237.09 x_1^2 x_2 + 174.95 x_1 x_2^2 + 424.80 x_1^2 x_3 - 460.31 (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2; \quad (2)$$

$$R_{изг.28} = 10.54 + 0.58 x_1 - 0.16 x_2 - 0.37 x_3 - 0.06 x_1 x_2 + 0.06 x_1 x_3 - 0.01 x_2 x_3 + 0.07 x_1 x_2 x_3 + 0.11 x_1^2 + 0.41 x_2^2 + 0.06 x_3^2 + 0.29 x_1^2 x_2 - 0.22 x_1 x_2^2 - 0.10 x_1^2 \cdot x_3 - 0.18 (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2, \quad (3)$$

где x_1 – температура обжига, код. вел.;

x_2 – время обжига, код. вел.;

x_3 – доля добавки, код. вел., принимаемая согласно данным табл. 3.

Таблица 3. Исследуемые факторы и уровни их варьирования

Table 3. Factors under study and their levels of variation

Варьируемые факторы	Уровни варьирования в кодированных величинах				
	-2	-1	0	+1	+2
Температура обжига, °С	-	400	600	800	-
Длительность обжига, ч	-	2	3	4	-
Содержание добавки, % от массы вяжущего	2	6	10	14	18

Анализ характеристик модифицированного цементного камня, предсказанных с помощью уравнений (1) – (3), проводили на основе расчета 7500 модельных точек с помощью оболочки в программе Microsoft Excel. Оптимальные составы оценивали с применением метода скаляризации [20]. При этом максимум целевой функции определяли с помощью зависимости:



$$q(x_1, x_2, x_3) = \min \left\{ \frac{R_{сж.28}}{R_{сж.треб.28}}, \frac{R_{изг.28}}{R_{изг.треб.28}}, \frac{E_{сж.28}}{E_{сж.треб.28}} \right\}. \quad (4)$$

Основным критерием отбора модельных составов служили упруго-прочностные характеристики немодифицированного цементного камня в возрасте 28 сут.:

$$R_{сж.28} \geq 76,5 \text{ МПа}; R_{изг.28} \geq 11,6 \text{ МПа}; E_{сж.28} \geq 21706 \text{ МПа}. \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам оптимизации нами построены кривые изменения объемов допустимых областей, частоты появления событий (рис. 2) и зоны пересечения областей допустимых значений упруго-прочностных показателей модифицированных цементных композитов (рис. 3), а также карты распределения частоты появления составов, характеристики которых выше по сравнению с контрольным немодифицированным составом (рис. 4).

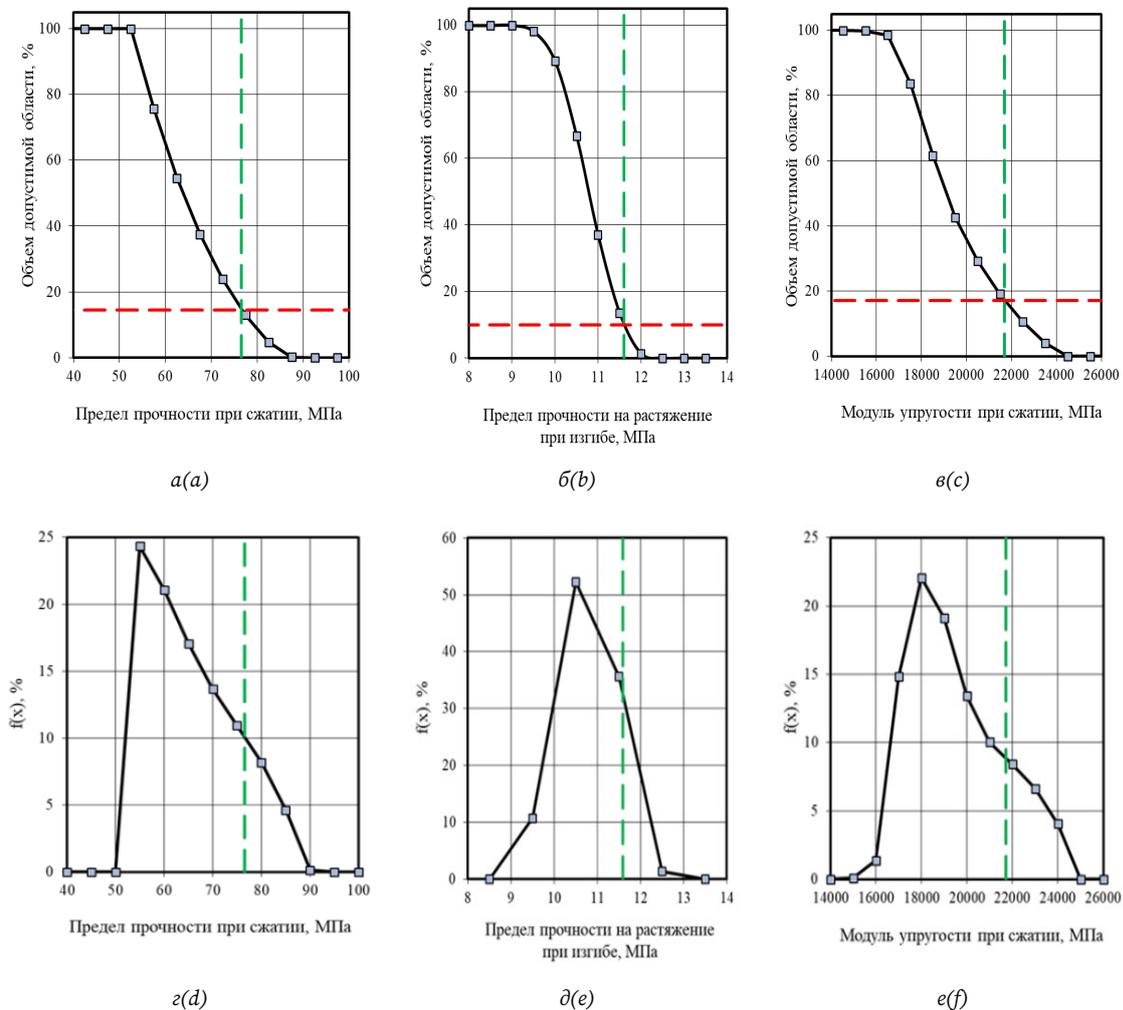
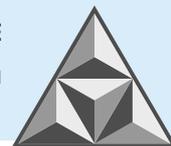


Рис. 2. Кривые изменения объемов допустимых областей (а, б, в) и частоты появления события (г, д, е) в зависимости от уровней пределов прочности при сжатии (а, г) и на растяжение при изгибе (б, д), модуля упругости при сжатии (в, е) модифицированных глинистых цементных композитов в возрасте 28 сут.

Fig. 2. Curves of volume variation of permissible areas (a, b, c) and frequency of event occurrence (d, e, f) depending on the levels of compressive (a, d) and flexural tensile strengths (b, e), compressive modulus of elasticity (c, f) of modified clayite cement composites at the period of 28 days



Анализ рис. 2 показал, что максимальная частота появления событий для предела прочности при сжатии, модуля упругости при сжатии и предела прочности на растяжение при изгибе зафиксирована на уровне 55, 18000 и 10.5 МПа соответственно. При этом объем допустимых областей исследуемых характеристик находится в диапазоне 10.0-17.1%. Максимум целевой функции (4), рассчитанный для трех условий (5), составляет 5.5%. Отметим: чем ниже объем допустимой области, тем сложнее на практике подобрать эффективное технологическое решение [19].

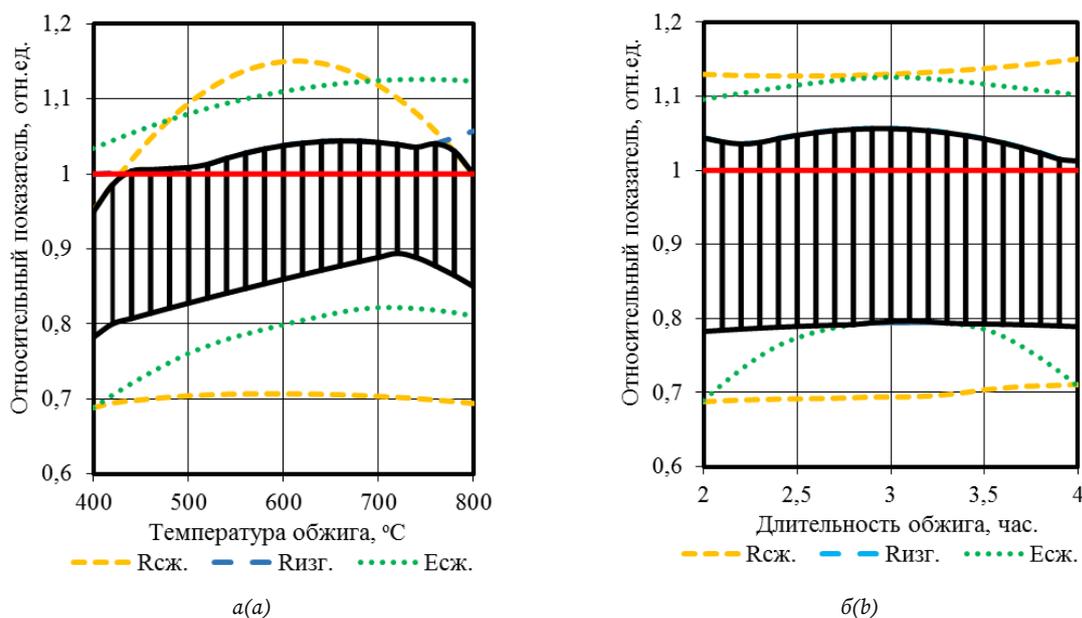


Рис. 3. Зоны пересечения областей допустимых значений изменения относительных пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, модуля упругости при сжатии цементных композитов в зависимости от варьируемых факторов: *a* – температура обжига; *b* – длительность обжига

Fig. 3. Zones of intersection of permissible values of changes in relative compressive and tensile strengths in bending, modulus of elasticity in compression

of cement composites depending on varying factors: *a* – firing temperature; *b* – firing duration

В рамках реализуемой задачи проведена оптимизация варьируемых факторов по уровню достигаемых показателей. В частности, для оценки оптимального режима приготовления минеральных добавок построены области допустимых значений исследуемых характеристик модифицированного цементного камня (рис. 3). Установлено, что введение в состав вяжущего глинистых, полученных обжигом глины при температуре 520-780°C, позволяет достичь упруго-прочностных показателей (см. табл. 4), превышающих таковые для контрольного бездобавочного композита.

Таблица 4. Объем допустимых областей исследуемых характеристик модельных составов

Table 4. Volume of permissible areas of examined characteristics for model compositions

Исследуемые характеристики	Объем допустимой области, %	
	отдельно по критериям	обобщенный
Предел прочности при сжатии, МПа	14.5	5.5
Модуль упругости при сжатии, МПа	17.1	
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	10.0	

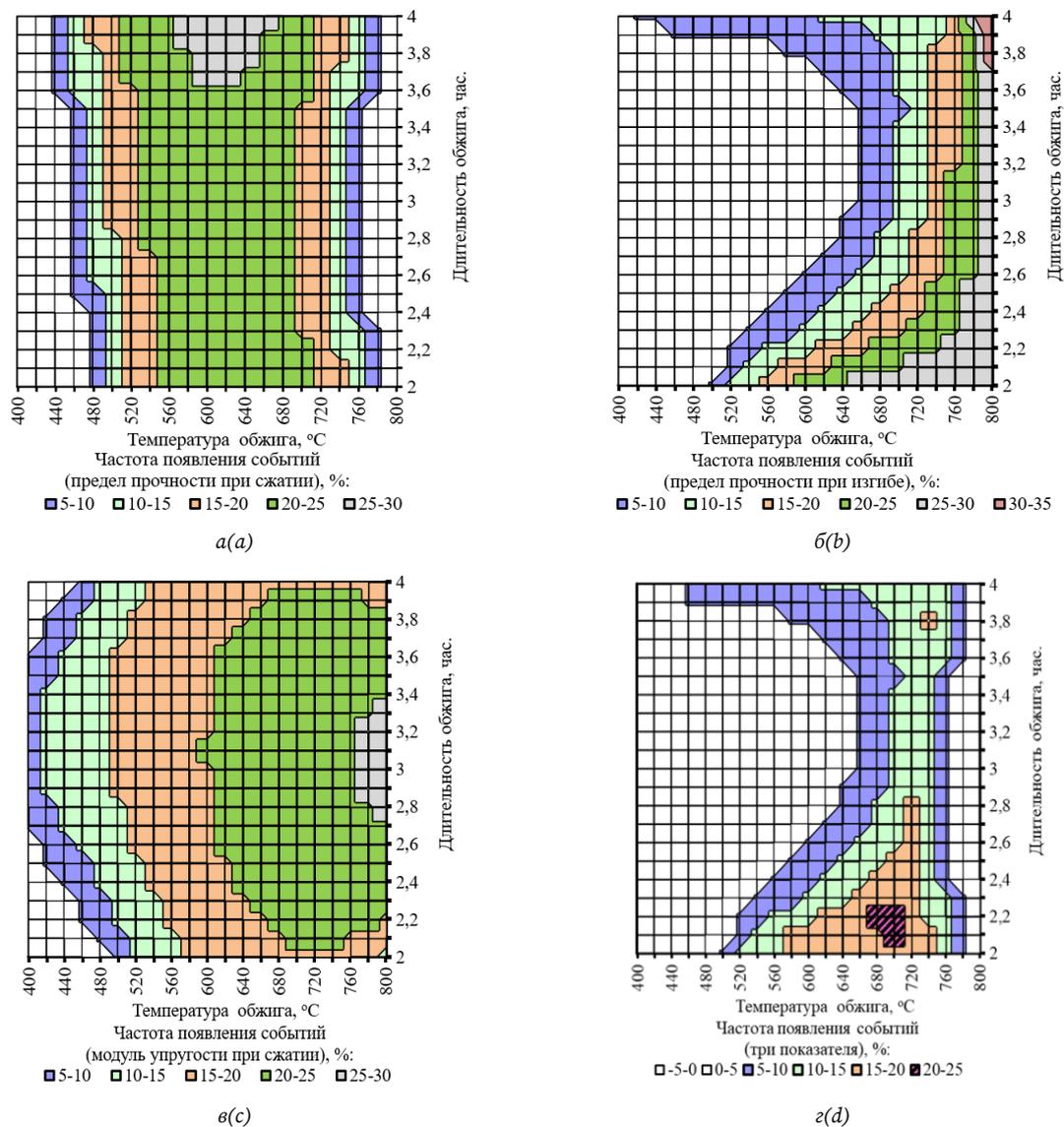


Рис. 4. Распределение частоты появления составов, упруго-прочностные характеристики композитов на основе которых превышают контрольный немодифицированный состав при анализе отдельных показателей (*a* – предел прочности при сжатии, *b* – предел прочности на растяжение при изгибе, *c* – модуль упругости при сжатии) и проведении многокритериальной оптимизации (*d*) в зависимости от температуры и длительности обжига

Fig. 4. Distribution of frequency of compositions occurrence, whose elastic-strength characteristics exceed the control unmodified composition both in the analysis of individual parameters (*a* – compressive strength, *b* – tensile strength in bending, *c* – modulus of elasticity in compression) and multicriteria optimisation (*d*) depending on temperature and firing duration

На рис. 4 представлены карты распределения частоты появления событий, соответствующих исследуемым показателям цементного камня. Карты распределения построены как для отдельных показателей модельных составов (рис. 4, *a* – *c*), так и при многокритериальной их оптимизации (рис. 4, *d*). Расчеты производили в процентах относительно числа значений модельных составов, соответствующих указанной температуре и времени обжига. При этом на графиках отброшены области, для которых частота появления событий составила $< 5\%$ (белый фон).

Вероятность появления модельных составов с показателями предела прочности при сжатии, превышающими таковые для контрольного состава, достигает 25-30%; при этом обжиг глины должен проводиться в течение 3.7-4.0 ч при температуре 570-650°C. Максимальные



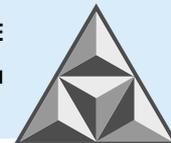
значения предела прочности на растяжение при изгибе и модуля упругости при сжатии достигаются обжигом при температуре выше 765°C в течение 2.0-4.0 и 2.8-3.3 ч соответственно. При этом оптимальный режим обжига для удовлетворения трех исследуемых условий (5) функции (4) соответствует температуре 670-715°C при длительности обжига от 2.05 до 2.25 ч.

ВЫВОДЫ

С применением методов экспериментально-статистического моделирования определена оптимальная температура обжига глины для получения смешанных цементных вяжущих с комплексом улучшенных свойств, не уступающих свойствам контрольного бездобавочного состава. Выявлены условия обжига глины Старошайговского месторождения для получения активной минеральной добавки – 2 ч при температуре 700°C. Использование разработанной добавки позволяет расширить минерально-сырьевую базу производства модифицированных бетонов с пониженным расходом цемента, не уступающих по физико-механическим характеристикам бездобавочным материалам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р.** «Карбонатные» цементы низкой водопотребности. М.: Изд. АСВ. 2021. 366 с.
2. **Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н.** Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // *Строительные материалы*. 2014. № 3. С. 6-14.
3. **Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В.** Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // *Бетон и железобетон*. 1999. №6. С. 6-10.
4. **Давидюк А.Н.** Бетон в строительстве – Новые вызовы и перспективы // *Вестник НИЦ. Строительство*. 2017. №12. С. 5-13.
5. **Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kusnetsov Y.S, Volodin V.M., Belyakova E.A.** Next generation concrete on the basis of fine-grained dry powder mixes // *Magaz. Civ. Eng.* 2012. № 8(34). pp. 47-53.
6. **Низина Т.А., Балыков А.С., Коровкин Д.И., Володин С.В., Володин В.В.** Влияние комплексных модификаторов на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и минеральных добавок различного состава на технологические и физико-механические свойства цементных систем // *Регион. архитектура и строительство*. 2022. № 1 (50). С. 28-36.
7. **Schulze S.E., Pierkes R., Rickert J.** Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials // *Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement*. Beijing, China. 2015. 693 p.
8. **Castello L.R., Hernandez H.J.F., Scrivener K.L., Antonic M.** Evolution of calcined clays soils as supplementary cementitious materials // *Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement*. Instituto de Ciencias de la Construction «Eduardo torroja». Madrid. 2011. P. 117.
9. **Fernandez R., Martizena F., Scrivener K.L.** The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison be-tween kaolinite, illite and montmorillonite // *Cement and Concrete Research*. 2011. № 41. P. 113-122.
10. **Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Гайфуллин А.Р.** Влияние добавок в портландцемент прокаленной и молотой глины с содержанием 40% каолинита на прочность цементного камня // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 2. С. 131-133.
11. **Гайфуллин А.Р., Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р.** Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня // *Инж.-строительный журнал*. 2015. № 7 (59). С. 66-73.
12. **Селяев В.П., Ямашкин А.А., Куприяшкина Л.И.** Минерально-сырьевая база строительной отрасли Мордовии: практ. пособие. Ч. 1: Глины и суглинки. 2013. Саранск: Изд. Мордовского ун-та. 152 с.
13. **Balykov A.S., Nizina T.A., Volodin V.V., Kyashkin V.M.** Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems // *Mat. Sci. Forum*. 2021. Vol. 1017. P. 61-70.



14. **Низина Т.А., Володин В.В., Бальков А.С.** Влияние добавок на основе обожженной глины на прочность модифицированного цементного камня // *Регион. архитектура и строительство*. 2019. № 3 (40). С. 58-67.
15. **Низина Т.А., Володин В.В., Бальков А.С., Коровкин Д.И.** Оценка кинетики твердения цементного камня, модифицированного добавками термоактивированной глины и карбонатных пород // *Регион. архитектура и строительство*. 2021. № 1 (46). С. 86-94.
16. **Низина Т.А., Бальков А.С., Володин В.В.** Влияние термоактивированных глин и карбонатных пород на фазовый состав и свойства модифицированного цементного камня // *Изв. высш. учеб. заведений. Строительство*. 2019. № 8 (728). С. 45-55.
17. **Низина Т.А., Володин В.В., Макридин Н.И., Тараканов О.В.** Вязкость разрушения мелкозернистых бетонов, модифицированных минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, № 2. С. 43-54.
18. **Володин В.В., Низина Т.А.** Анализ минерально-сырьевой базы Республики Мордовия, пригодной для производства активных минеральных добавок // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 1 (20). С. 59-62.
19. **Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А.** Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Изд. Астропринт. 2017. 168 с.
20. **Гарькина И.А., Данилов А.М., Прошин А.П.** Математические методы в строительном материаловедении. Саратов: Изд. Саратов. ун-та. 2001. 188 с.

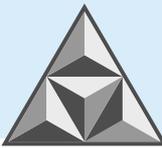
Поступила в редакцию 12.07.2024

Одобрена после рецензирования 28.08.2024

Принята к опубликованию 05.09.2024

REFERENCES

1. **Khazin, V.G., Khokhryakov, O.V. and Sibgatullin, I.R.** (2021), «Karbonatnye» cementy nizkoj vodopotrebnosti [‘Carbonate’ cements of low water consumption]. Izd. ASV., Moscow, Russia.
2. **Bazhenov, J.M., Chernyshov, E.M. and Korotkikh, D.N.** (2014), "Designing of modern concrete structures: determining principles and technological platforms", *Stroitel'nye materialy [Construction materials]*, no. 3, pp. 6-14 (in Russian).
3. **Kaprielov, S.S., Batrakov, V.G. and Sheinfeld A.V.** (1999), "Modified concretes of new generation: reality and prospect", *Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*, no. 6, pp. 6-10 (in Russian).
4. **Davidyuk, A.N.** (2017), Concrete construction - New challenges and prospects, *Vestnik NIC. Stroitel'stvo [Bulletin of SIC. Construction]*, no. 12, pp. 5-13 (in Russian).
5. **Kalashnikov, V.I., Tarakanov, O.V., Kusnetsov, Y.S, Volodin, V.M. and Belyakova E.A.** (2012), "Next generation concrete on the basis of fine-grained dry powder mixes", *Magaz. Civ. Eng.*, no. 8 (34), pp. 47-53.
6. **Nizina, T.A., Balykov, A.S., Korovkin, D.I., Volodin, S.V. and Volodin, V.V.** (2022), The effect of complex modifiers on the basis of polycarboxylate superplasticizer and mineral additives of different compositions on technological and physical-mechanical properties of cement systems, *Region. arkhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and engineering]*, no. 1 (50), pp. 28-36 (in Russian).
7. **Schulze, S.E., Pierkes, R. and Rickert, J.** (2015), "Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials", Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement. Beijing, China. 693 p.
8. **Castello, L.R., Hernandes, H.J.F., Scrivener, K.L. and Antonic, M.** (2011), "Evolution of calcined clays soils as supplementary cementitious materials", Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement. Instituto de Ciencias de la Construction «Eduardo torroja». Madrid, p. 117.
9. **Fernandez, R., Martizena, F. and Scrivener, K.L.** (2011), "The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison be-tween kaolinite, illite and montmorillonite", *Cement and Concrete Research*, no. 41, pp. 113-122.
10. **Rahimov, R.Z., Rahimova, N.R. and Gaifullin, A.R.** (2015), "The Influence of Addition of Calcined and Grinded Clay Containing 40% Kaolinite into Portland Cement on the Solidity of the Cement Stone". *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, no. 2, pp. 131-133 (in Russian).



11. **Gaifulin A.R., Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R.** (2015), "The influence of clay additives in Portland cement on the compressive strength of the cement stone", *Inzh.-stroitel'niy zhurnal [Magazine of Civil Engineering]*, no. 7 (59), pp. 66-73 (in Russian).
12. **Selyaev V.P., Yamashkin A.A., Kupriyashkina L.I.** (2013), Mineral'no-syr'evaya baza stroitel'noj otrasli Mordovii: prakt. posobie. Ch. 1: Gliny i suglinki. [Mineral and raw material base of the construction industry of Mordovia: practical manual. Part 1: Clays and loams], Izd. of Mordovian University, Saransk (in Russian).
13. **Balykov, A.S., Nizina, T.A., Volodin, V.V. and Kyashkin, V.M.** (2021), "Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems", *Mat. Sci. Forum*, Vol. 1017, pp. 61-70.
14. **Nizina, T.A., Volodin, V.V. and Balykov, A.S.** (2019), "Effect of additives based on burnt clay on the strength of modified cement stone", *Region. arhitektura i stroitel'stvo [Region. architecture and construction]*, no. 3(40), pp. 58-67 (in Russian).
15. **Nizina, T.A., Volodin, V.V., Balykov, A.S. and Korovkin, D.I.** (2021), "Evaluation of kinetics of hardening of cement stone modified with additives of thermally activated clay and carbonate rocks", *Region. arhitektura i stroitel'stvo [Region. architecture and construction]*, no. 1 (46), pp. 86-94 (in Russian).
16. **Nizina, T.A., Balykov, A.S. and Volodin, V.V.** (2019), "Influence of thermoactivated clays and carbonate rocks on the phase composition and properties of modified cement stone", *Izv. vyssh. ucheb. zavedenij. Stroitel'stvo [Proceedings of higher educational institutions. Construction]*, no. 8 (728), pp. 45-55 (in Russian).
17. **Nizina, T.A., Volodin, V.V., Makridin, N.I. and Tarakanov, O.V.** (2023), "Fracture toughness of fine-grained concretes modified with mineral additives based on thermally activated clay and carbonate rocks", *Smart Composite in Construction*, no. 4 (2), pp. 43-54 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n2_2023 (accessed 12.05.2024) (in Russian).
18. **Volodin, V.V. and Nizina, T.A.** (2023), "Analysis of the mineral raw material base of the Republic of Mordovia suitable for the production of active mineral additives", *Ekspert: teoriya i praktika [Expert: theory and practice]*, no. 1 (20), pp. 59-62 (in Russian).
19. **Lyashenko, T.V. and Voznesensky, V.A.** (2017), Metodologiya recepturno-tekhnologicheskikh polej v komp'yuternom stroitel'nom materialovedenii [Methodology of formulation-technological fields in computer construction materials science]. Izd. Astroprint, Odessa.
20. **Garkina, I.A., Danilov, A.M. and Proshin, A.P.** (2001), Matematicheskie metody v stroitel'nom materialovedenii [Mathematical methods in building materials science], Izd. Saratov. un-ta, Saratov (in Russian).

Received 12.07.2024

Approved 28.08.2024

Accepted 05.09.2024