

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 666.913.35:691.54

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327

## Гидратация цементных вяжущих с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород

Владимир Владимирович Володин<sup>1</sup>, Олег Вячеславович Тараканов<sup>2</sup>,  
Татьяна Анатольевна Низина<sup>1</sup>, Владимир Михайлович Кяшкин<sup>1</sup>,  
Артемий Сергеевич Балыков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва); г. Саранск, Россия;

<sup>2</sup> Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС); г. Пенза, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Применение минеральных добавок (МД) в составах цементных бетонов дает возможность снижать расход портландцемента (ПЦ), что при возрастающих темпах строительства уменьшает негативное воздействие на экологию при его производстве. Однако высокая стоимость и территориальная ограниченность производства наиболее эффективных модификаторов (микрокремнезем, метакраолин) не позволяют в полном объеме удовлетворить возрастающий на них спрос. Разработка МД из широко распространенного сырья поможет решить проблему дефицита наиболее распространенных добавок, а также снизить объемы потребления ПЦ. Механизм твердения ПЦ с широко распространенными МД достаточно подробно изучен. При этом работы, описывающие процессы гидратации цементного вяжущего, модифицированного МД на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород, практически отсутствуют.

**Материалы и методы.** В качестве МД использованы: термоактивированная глина (Никитское месторождение, г. Саранск, Республика Мордовия), доломит (с. Ельники, Республика Мордовия), термоактивированная смесь глины и известняка (с. Атемар, Республика Мордовия). С применением метода рентгенофазового анализа исследованы механизмы действия указанных МД на процессы гидратации.

**Результаты.** Установлено, что применение рассматриваемых МД позволяет повысить степень гидратации ПЦ и направлено изменять фазовый состав цементного камня.

**Выводы.** Полученные данные свидетельствуют о перспективности и актуальности направления по разработке бетонов с модифицирующими добавками на основе термоактивированных полиминеральных глин и карбонатных пород, что позволяет расширить номенклатуру выпускаемых на сегодняшний день модифицированных цементных композитов за счет более полного использования местной минеральной сырьевой базы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** цементный камень, полиминеральная глина, доломит, известняк, пластифицирующая добавка, фазовый состав

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Володин В.В., Тараканов О.В., Низина Т.А., Кяшкин В.М., Балыков А.С. Гидратация цементных вяжущих с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1317–1327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Анатольевна Низина, nizinata@yandex.ru.

## Hydration of cement binders with mineral additives based on clay and carbonate rocks

Vladimir V. Volodin<sup>1</sup>, Oleg V. Tarakanov<sup>2</sup>, Tat'yana A. Nizina<sup>1</sup>,  
Vladimir M. Kyashkin<sup>1</sup>, Artemiy S. Balykov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ogarev Mordovia State University; Saransk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Penza State University of Architecture and Construction (PGUAS); Penza, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The use of mineral additives in cement concrete compositions makes it possible to reduce the consumption of Portland cement, which, with increasing construction rates, reduces the negative impact on the environment during its production. However, the high cost and territorial limitation of the production of the most effective modifiers (microsilica, metakaolin) do not allow to satisfy the growing demand for them. The development of mineral additives from widely used raw materials will help solve the problem of the deficit of the most common additives, as well as to reduce the consumption of Portland cement. The mechanism of hardening of Portland cement with widespread mineral additives was studied in sufficient detail. At the same time, there are practically no works describing the processes of hydration of cement binder modified with mineral additives based on thermally activated clay and carbonate rocks.

**Materials and methods.** The following mineral additives were used: thermally activated clay (Nikitskoye deposit, Saransk, Republic of Mordovia), dolomite (Elniki village, Republic of Mordovia), thermally activated mixture of clay and limestone (Atemar village, Republic of Mordovia). Using the method of X-ray phase analysis, the mechanisms of action of these mineral additives on hydration processes are considered.

**Results.** It was established that the use of these mineral additives makes it possible to increase the degree of hydration of Portland cement and change the phase composition of the cement stone in a targeted manner.

**Conclusions.** The data obtained indicate the prospects and relevance of the direction for the development of concretes with modifying additives based on thermally activated polymineral clays and carbonate rocks, which makes it possible to expand the range of modified cement composites produced today due to more complete use of the local mineral resource base.

**KEYWORDS:** cement stone, polymineral clay, dolomite, limestone, plasticizing additive, phase composition

**FOR CITATION:** Volodin V.V., Tarakanov O.V., Nizina T.A., Kyashkin V.M., Balykov A.S. Hydration of cement binders with mineral additives based on clay and carbonate rocks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1317-1327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327 (rus.).

*Corresponding author:* Tat'yana A. Nizina, nizinata@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время объемы мирового производства цементного бетона превысили отметку 10 млрд м<sup>3</sup> в год [1], что позволяет по праву называть его главным строительным материалом XXI в. Производство данного строительного материала продолжает неуклонно возрастать, что связано с процессами урбанизации, индустриализации и ростом населения на земле. Однако современные методы производства портландцемента (ПЦ) — энергоемкие и оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду. Традиционным способом снижения клинкероёмкости ПЦ является совместный помол клинкера с замещающими добавками — гидравлическими, пуццолановыми или инертными [1]. Также снижению потребления ПЦ способствует применение минеральных добавок (МД) в качестве самостоятельных компонентов цементных бетонов, что позволяет получать повышенные физико-механические и эксплуатационные свойства бетонов при сниженном расходе ПЦ [2–7].

Наиболее широкое использование в цементной промышленности нашел природный гипс [8], введение которого на этапе помола клинкера (3–5 % от массы) дает возможность замедлить процесс гидратации цемента после его смешивания с водой. При этом гипс также применяется и в качестве МД к цементным бетонам [9, 10].

Портландцемент на 70–80 % состоит из силикатов кальция, продукты гидратации которых служат главными носителями механической прочности цементного камня (ЦК). Изменение условий протекания реакций приводит к образованию гидросиликатов кальция переменного состава [11]. Достаточно подробно изучен механизм твердения цементных вяжущих с широко распространенными минеральными добавками — микрокремнеземом и метакаолином. В работах [12–18] показано, что минеральные добавки на основе широко распространенных глинистых и карбонатных пород могут иметь пуццолановую активность, не уступающую микрокремнезему и метакаолину. Однако исследования, описывающие процессы гидратации ПЦ, модифи-

цированного минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород, практически отсутствуют.

Цель данной работы — исследование процессов гидратации портландцемента, модифицированного минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными компонентами для приготовления модифицирующих добавок послужили породы из следующих месторождений Республики Мордовия:

- глина Никитского месторождения (северо-западная окраина г. Саранска), минеральный состав которой представлен каолинитом (39,8 %), иллитом (23,1 %), полевыми шпатами (14,2 %) и кварцем (19,8 %);
- доломит Ельниковского месторождения (с. Будаево), состоящий из минералов доломита (52 %) и кальцита (48 %);
- известняк Атемарского месторождения (с. Атемар), минеральный состав которого представлен кальцитом (96 %) и кварцем (4 %).

Из отобранных пород были изготовлены следующие виды МД: ДЕ — молотый до удельной поверхности 445 м<sup>2</sup>/кг (длительность помола 3 ч) Ельниковский доломит; ТГН — никитская глина, прошедшая термическую обработку и молотая до удельной поверхности 780 м<sup>2</sup>/кг (длительность помола 1 ч); ТС (ГН + ИА) — смесь 2:1 по массе никитской глины и атемарского известняка с удельной поверхностью соответственно 780 и 1300 м<sup>2</sup>/кг после термической обработки. Обжиг производился при температуре 700 °С в течение 2 ч.

Исследования проводились на портландцементе класса ЦЕМ I 42,5Б производства АО «Мордовцемент» (ГОСТ 31108–2020). Минералогический состав ПЦ представлен минералами: трехкальциевого силиката (C<sub>3</sub>S) — 65,7 %; двухкальциевого силиката (C<sub>2</sub>S) — 11,4 %; трехкальциевого алюмината (C<sub>3</sub>A) — 13,5 %; четырехкальциевого аллюмоферита (C<sub>4</sub>AF) — 6,7 %. Исследуемые минеральные добавки вводились в количестве 20 % от массы

твердой фазы (Ц + МД). Дозировка суперпластификатора Melflux 5581 F составляла 1 % от массы твердой фазы. Водотвердое отношение  $V/T = V/(Ц + МД) = 0,21$ . Фазовый состав цементного камня (ЦК) исследован в возрасте 28 сут с применением метода рентгенофазового анализа (РФА) на автоматизированном дифрактометре Empyrean компании PANalytical. Дифрактограммы исследуемых порошков ЦК представлены на рис. 1–8.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам полуколичественного РФА цементного камня (рис. 1–4) установлено, что интенсивность отражений безводных фаз цемента в исследуемых образцах ( $C_3S$  — 2,776; 2,730 Å;  $C_2S$  — 2,785; 2,748 Å) уменьшается в ряду «цемент (100 %) → цемент (80 %) + ТС(ГН + ИА) (20 %) → цемент (80 %) + ТГН (20 %) → цемент (80 %) + ДЕ (20 %)\», что свидетельствует об активации процесса гидратации силикатных фаз цемента в присутствии добавок на 18–26 % (таблица). В отношении гидросульфалоуминатных фаз по данным РФА следует сделать вывод, что интенсивность отражений этtringита ( $d = 9,73; 5,61; 3,88; 3,24; 2,564; 2,209$  Å) во всех образцах с добавками ниже, чем для контрольного состава (рис. 1–4). В ЦК, модифицированном добавками ТГН и ТС(ГН + ИА), происходит снижение интенсивности рефлексов при  $d = 4,93$  Å

и  $d = 1,93$  Å (соответственно, на 27 и 25 %), что говорит о снижении концентрации портландита по отношению к контрольному составу.

При гидратации  $C_3S$  и  $\beta$ - $C_2S$  образуются два основных продукта — гель С-S-H и  $Ca(OH)_2$  [19]. При этом гидратация  $\beta$ - $C_2S$  происходит более медленно, чем  $C_3S$ . Известно большое количество кристаллических гидросиликатов кальция (ГСК), но большинство из них образуются в гидротермальных условиях под давлением и при температуре выше 100 °С. Множество полукристаллических ГСК являются промежуточными между этими соединениями — гелем С-S-H, образующимся в цементе. Это два типа гидросиликатов кальция — низкоосновные (С-S-H(I)) и высокоосновные (С-S-H(II)), близкие соответственно к 1,4 нм тобермориту и женниту. 1,4 нм тоберморита может быть синтезировано в водной суспензии при 60 °С из  $Ca(OH)_2$ -(СН) и кремниевой кислоты, женнит — в водной суспензии из СН и водного раствора кремнезема при температуре, близкой к 80 °С.

В цементных системах образуются слабо закристаллизованные продукты С-S-H, необходимым условием для которых является присутствие  $Ca(OH)_2$ . Подобные фазы, как правило, слабокристаллически и достаточно сложно различимы методами РФА. На представленных рентгенограммах некоторые отражения, предположительно, могут быть отнесены к фазам: 1,98; 1,82; 1,4; 1,56 Å. Ха-

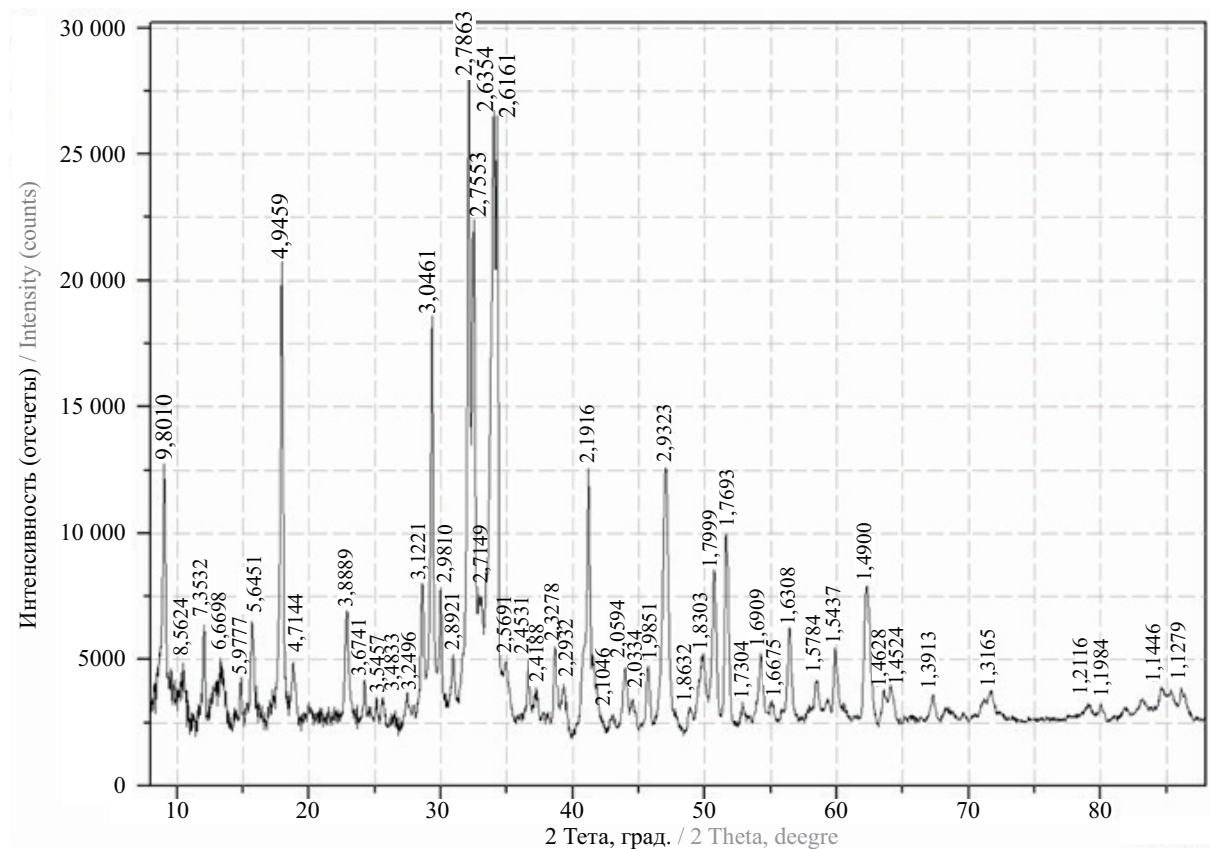


Рис. 1. Дифрактограмма порошка цементного камня контрольного бездобавочного состава в возрасте 28 суток

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of cement stone powder of the control composition without additives at the age of 28 days

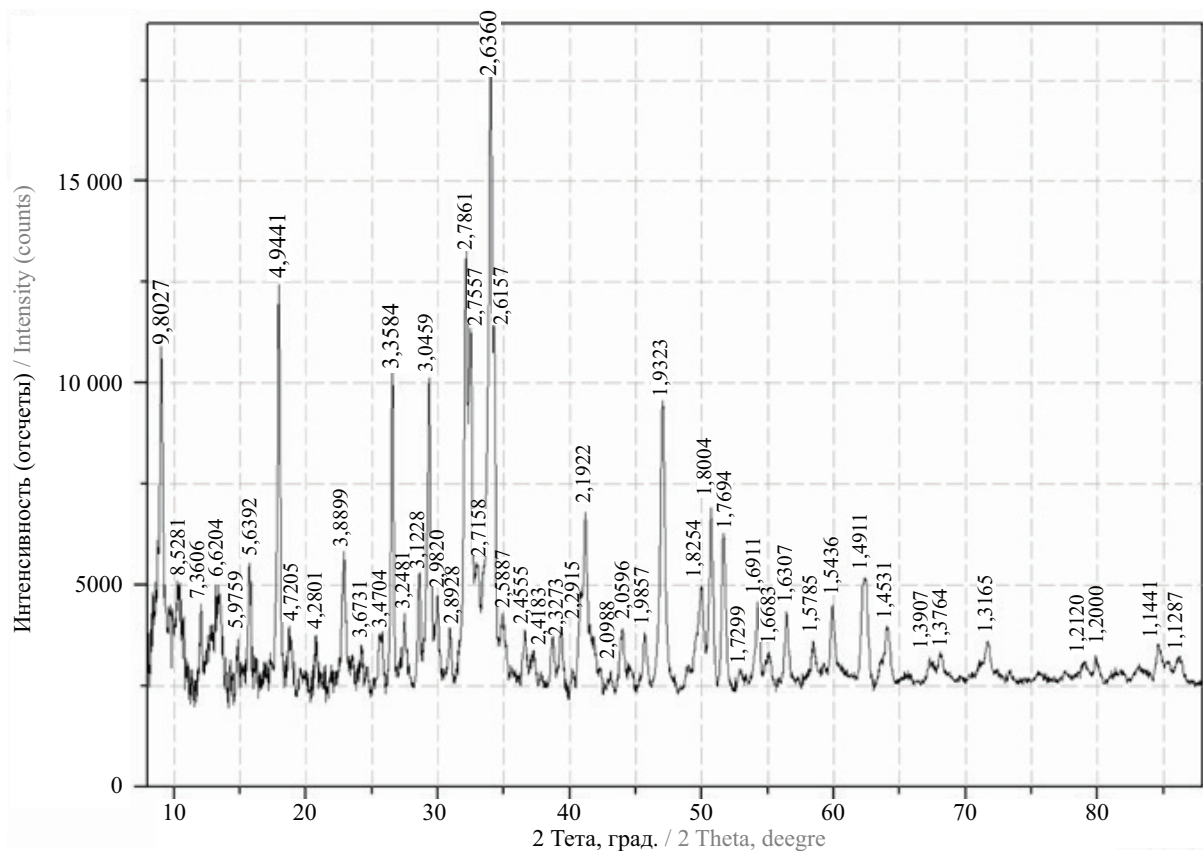


Рис. 2. Дифрактограмма порошка цементного камня, содержащего 20 % добавки ТГН, в возрасте 28 суток

Fig. 2. Powder diffraction pattern of cement stone containing 20 % TGN supplement at the age of 28 days

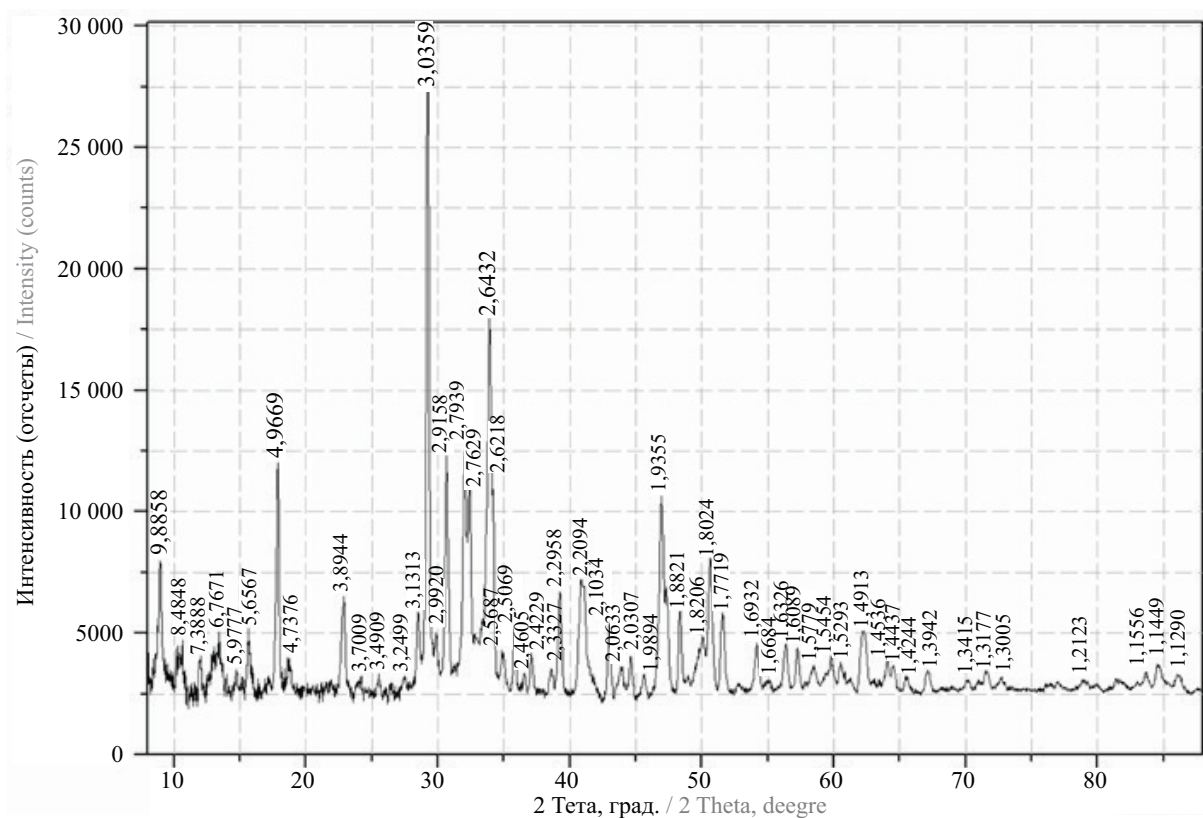


Рис. 3. Дифрактограмма порошка цементного камня, содержащего 20 % добавки ДЕ, в возрасте 28 суток

Fig. 3. Powder diffraction pattern of cement stone containing 20 % DE supplement at the age of 28 days

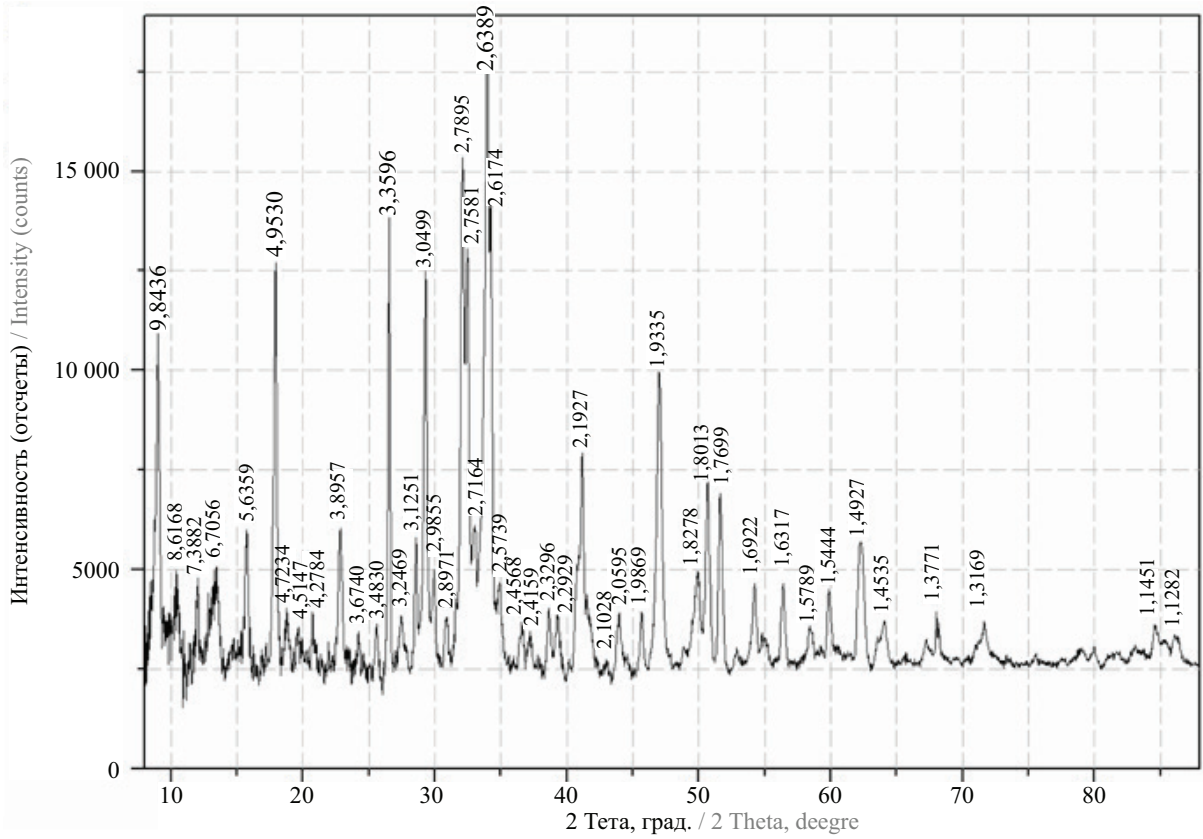


Рис. 4. Дифрактограмма порошка цементного камня, содержащего 20 % добавки ТС(ГН + ИА), в возрасте 28 суток  
Fig. 4. Powder diffraction pattern of cement stone containing 20 % additives TS(GN+IA) at the age of 28 days

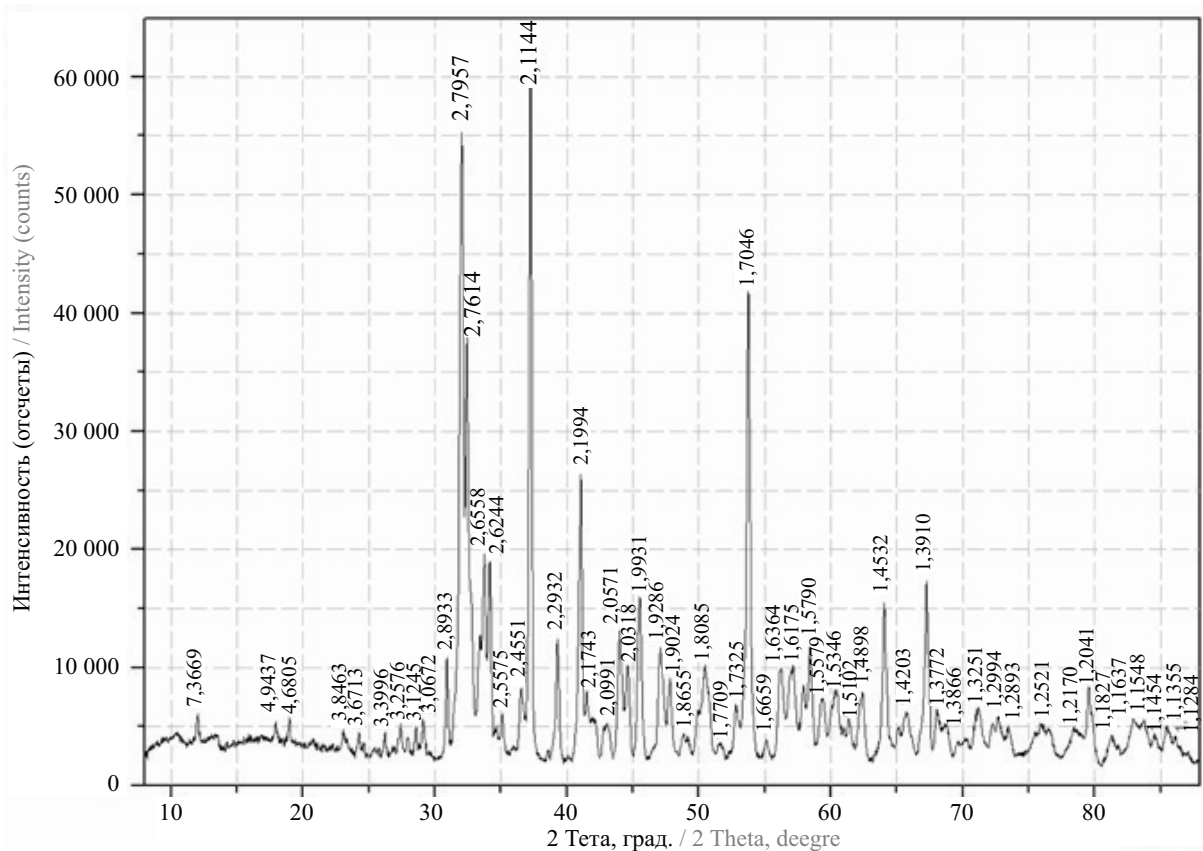


Рис. 5. Дифрактограмма порошка цементного камня (28 сут) контрольного бездобавочного состава, обожженного при 1000 °С  
Fig. 5. Powder diffraction pattern of cement stone (28 days) control composition without additives, fired at 1,000 °C

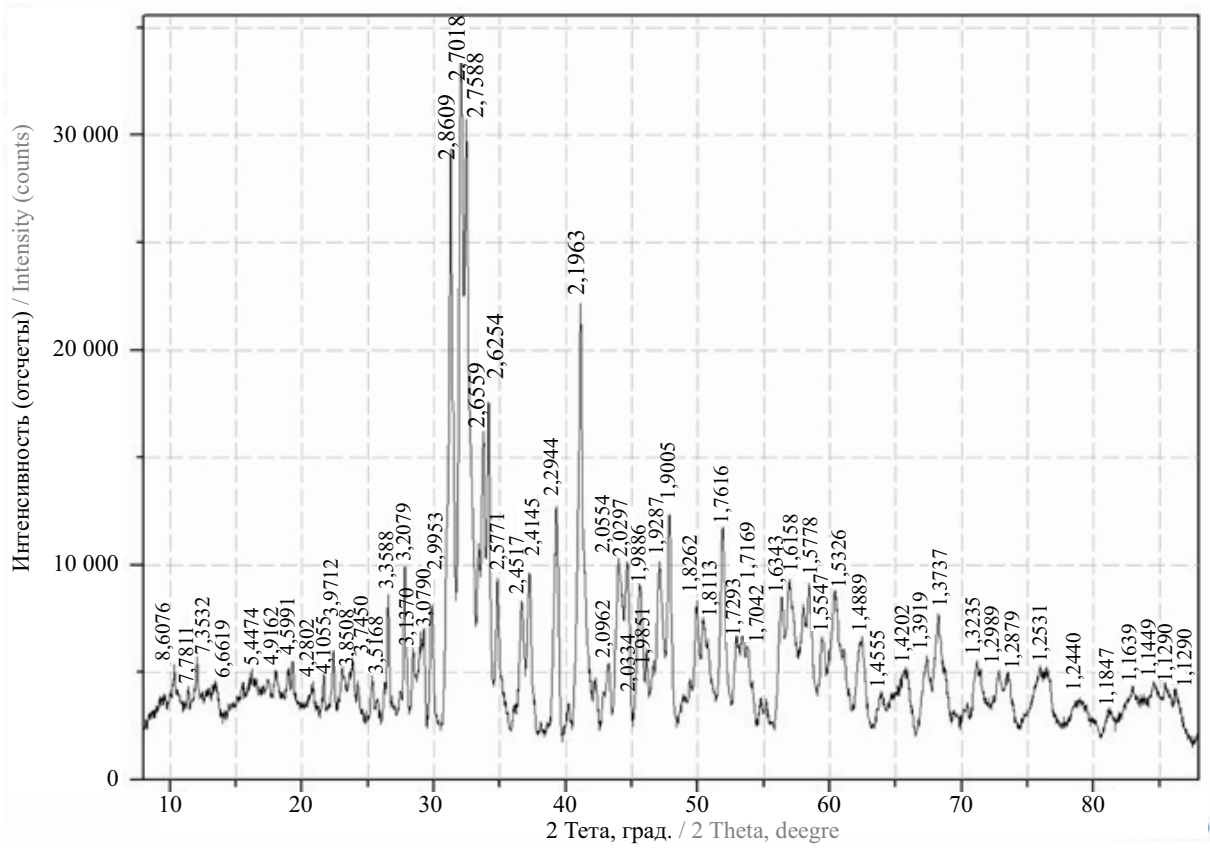


Рис. 6. Дифрактограмма порошка цементного камня (28 сут), содержащего 20 % добавки ТГН, обожженного при 1000 °С

Fig. 6. Powder diffraction pattern of cement stone (28 days) containing 20 % addition of TGN, fired at 1,000 °C

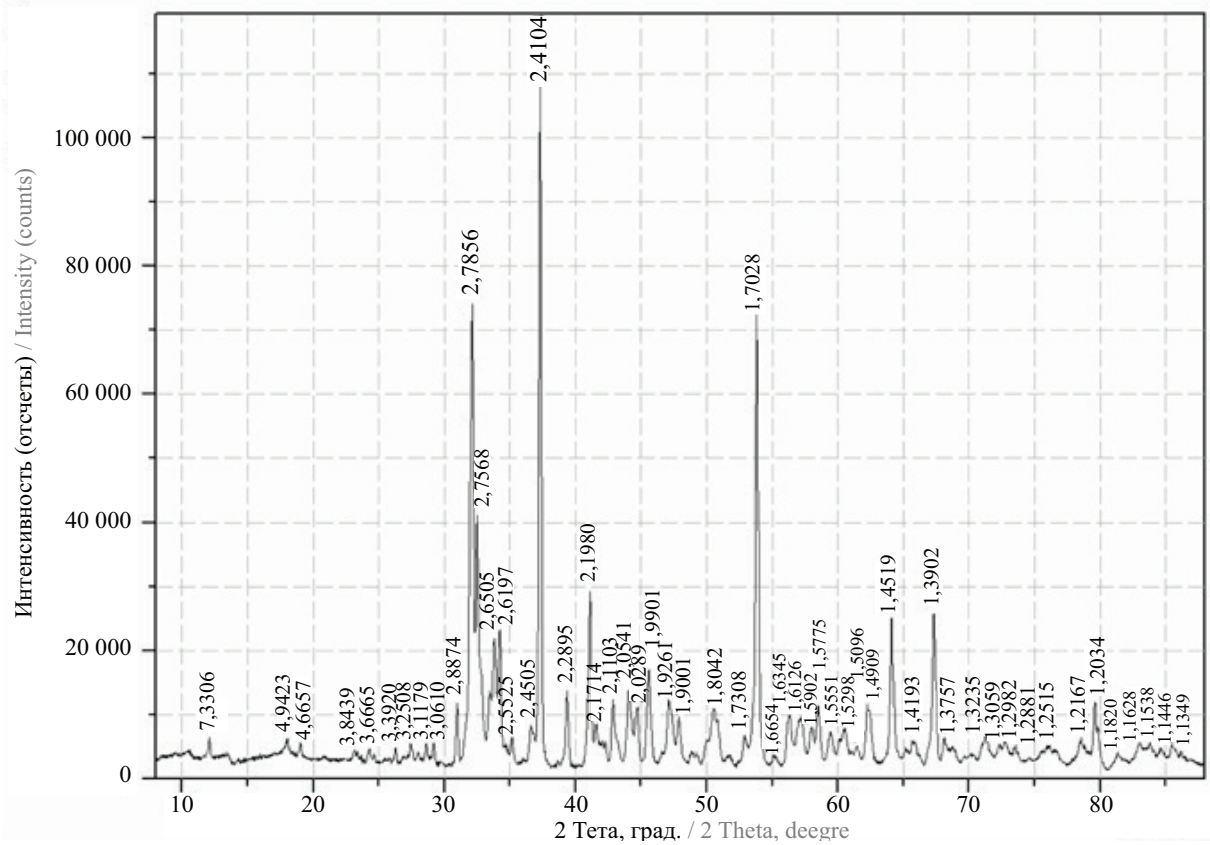


Рис. 7. Дифрактограмма порошка цементного камня (28 суток), содержащего 20 % добавки ДЕ, обожженного при 1000 °С

Fig. 7. Powder diffraction pattern of cement stone (28 days) containing 20 % DE additive, fired at 1,000 °C

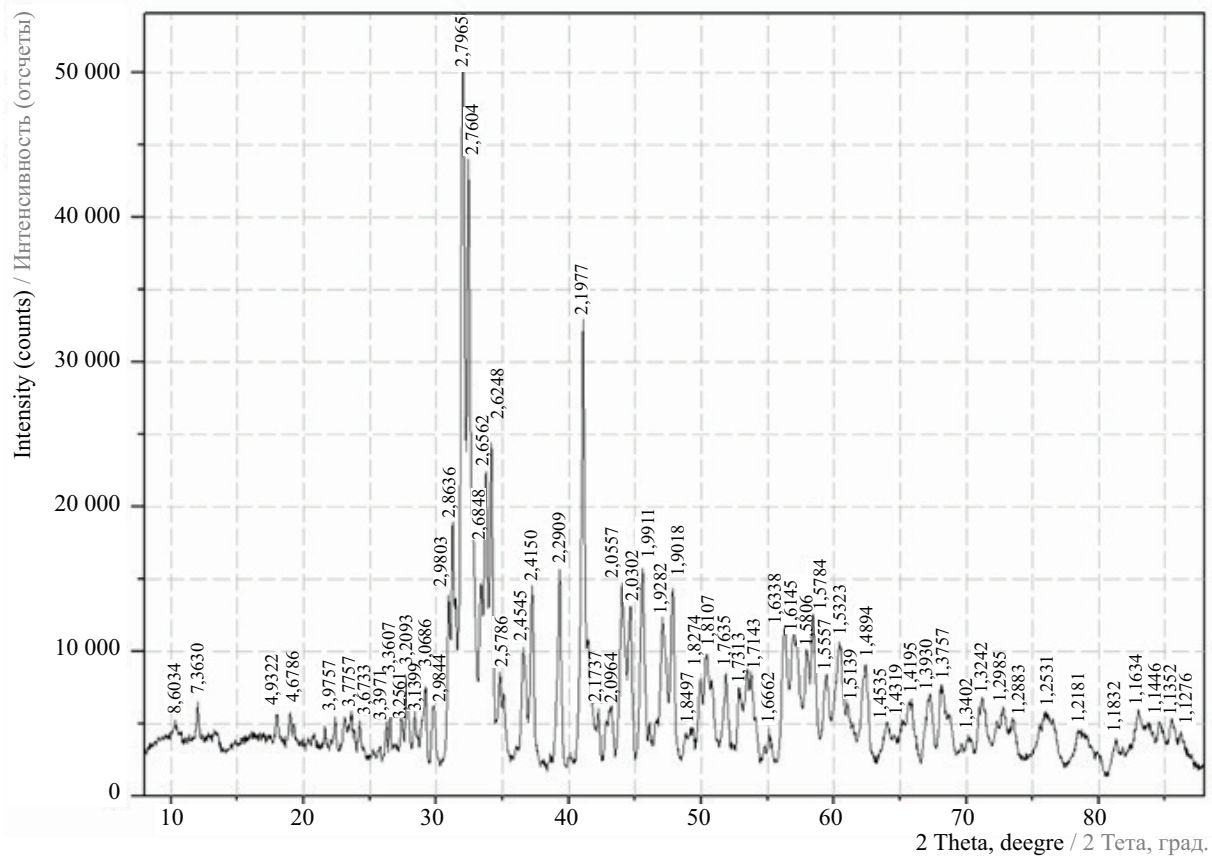


Рис. 8. Дифрактограмма порошка цементного камня (28 сут), содержащего 20 % добавки ТС(ГН + ИА), обожженного при 1000 °С

Fig. 8. Powder diffraction pattern of cement stone (28 days) containing 20 % additive TS(GN + IA), fired at 1,000 °C

Результаты РФА цементного камня исследуемых составов

Results of X-ray diffraction analysis of the cement stone of the studied compositions

Состав вяжущего Binder composition	Степень гидратации портландцемента, % Degree of hydration of Portland cement, %	Относительное содержание этtringита ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) Relative content of ettringite ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ )	Относительное содержание портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Relative content of portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Относительное содержание низкоосновных гидросиликатов кальция C-S-H(I) Relative content of low-basic calcium hydrosilicates C-S-H(I)	Относительное содержание высокоосновных гидросиликатов кальция C-S-H(II) Relative content of highly basic calcium hydrosilicates C-S-H(II)
Цемент (100 %) Cement (100 %)	65	100	100	100	100
Цемент (80 %) + ТГН (20 %) Cement (80 %) + TGN (20 %)	79	80	73	255	59
Цемент (80 %) + ДЕ (20 %) Cement (80 %) + DE (20 %)	82	62	91	108	130
Цемент (80 %) + ТС(ГН + ИА) (20 %) Cement (80 %) + TS(GN + IA) (20 %)	77	94	75	238	94

рактерных отражений при  $d = 3,07 \text{ \AA}$  для С-S-H (I) и  $3,05 \text{ \AA}$  для тоберморитового геля, а также при  $d = 2,8$  и  $2,85 \text{ \AA}$  для С-S-H (II) не обнаружено (рис. 1–4). Интенсивности отражений при  $d = 1,83 \text{ \AA}$  (С-S-H (II) и С-S-H (I)) и при  $d = 1,82 \text{ \AA}$  (тоберморитовый гель) примерно равны для всех образцов. Интенсивности отражений при  $d = 1,98 \text{ \AA}$  (С-S-H (II)) в образцах с добавками меньше, чем в контрольном составе. Предположительно, к фазе С-S-H (II) можно отнести отражение при  $d = 1,4 \text{ \AA}$ , но интенсивности этих рефлексов для всех анализируемых дифрактограмм незначительны.

Известно [20], что дегидратация С-S-H(II) наблюдается при температуре  $650\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ , а при температуре  $800\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$  происходит полное обезвоживание С-S-H(I). В работе [21] предлагается определять относительное содержание низкоосновных и высокоосновных гидросиликатов кальция после обжига образцов при  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . В данном случае оценка производится путем сравнения интенсивностей одного из основных рефлексов  $\alpha$ -CS ( $d = 3,23 \text{ \AA}$  и  $2\theta = 27,4^\circ$ ) и  $\beta$ -CS ( $d = 2,97 \text{ \AA}$  и  $2\theta = 29,9^\circ$ ) для С-S-H(I) и  $\beta$ -C2S ( $d = 2,79 \text{ \AA}$  и  $2\theta = 32,1^\circ$ ) для С-S-H(II).

Анализ дифрактограмм порошков ЦК, обожженного при  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , показал снижение интенсивности рефлексов при  $d = 2,79 \text{ \AA}$  на  $6\text{--}41 \%$ , а также увеличение интенсивности рефлексов при  $d = 3,23 \text{ \AA}$  и  $d = 2,97 \text{ \AA}$  в  $2,4\text{--}2,6$  раза для составов, содержащих  $20 \%$  МД ТГН и ТС(ГН + ИА), по отношению

к контрольному составу, что говорит об изменении соотношения гидросиликатов кальция в сторону увеличения доли низкоосновных. Данный химический эффект связан с пуццолановой активностью МД ТГН и ТС(ГН + ИА) в цементных системах и обусловлен наличием в их химико-минералогическом составе активных кремнеземсодержащих компонентов (реакционноспособных минералов с аморфизированной структурой) [22].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований изучены процессы гидратации портландцемента, модифицированного минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород. Установлено, что минеральные добавки ТГН и ТС(ГН + ИА) способствуют в фазовом составе цементного камня:

- повышению степени гидратации портландцемента с  $65$  до  $79$  и  $77 \%$  соответственно;
- снижению содержания этtringита на  $20$  и  $6 \%$  соответственно;
- уменьшению содержания портландита на  $27$  и  $25 \%$  соответственно;
- сокращению содержания высокоосновных гидросиликатов кальция на  $6$  и  $41 \%$  соответственно, при этом повышая содержание низкоосновных гидросиликатов кальция соответственно в  $2,6$  и  $2,4$  раза.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности. М. : АСВ, 2021. 366 с.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 4–10. EDN ZWUFVB.
3. Калашиников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8 (34). С. 47–53. EDN PJWLHF. DOI: 10.5862/mce.34.7
4. Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S. On the issue of expanding the base of mineral and complex additives for cement concrete // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 135. P. 01018. DOI: 10.1051/e3sconf/201913501018
5. Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S. Complex organomineral additives with hardening accelerator // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. Pp. 929–935. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.284.929
6. Nizina T.A., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Fiber fine-grained concretes with polyfunctional modifying additives // Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 4 (72). Pp. 73–83. DOI: 10.18720/MCE.72.9. EDN ZFCAMF.
7. Nizina T.A., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin V.V. Physical and mechanical properties of modified fine-grained fibre-reinforced concretes containing carbon nanostructures // International Journal of Nanotechnology. 2019. Vol. 16. Issue 6/7/8/9/10. P. 496. DOI: 10.1504/ijnt.2019.106621
8. Баженов Ю.М. Бетонведение : учебник. М. : Изд-во АСВ, 2015. 144 с.
9. Нгуен Зоан Тунг Лам, Самченко С.В. Комплексный модификатор на основе алюминатного цемента и пуццолановой добавки // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 5. С. 709–716. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.709-716
10. Лам Н.З.Т., Самченко С.В., Швецова В.А., Булгаков Б.И. Влияние комплексных добавок на прочность цементного камня в раннем возрасте // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 5. С. 52–59. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.05.52-59. EDN PFYHXG.
11. Бумт Ю.М. Технология цемента и других вяжущих материалов. М. : Стройиздат, 1976. 407 с.
12. Habert G., Choupay N., Escadeillas G., Guillaume D., Montel J.M. Clay content of argillites: Influence



on cement based mortars // *Applied Clay Science*. 2009. Vol. 43. Issue 3–4. Pp. 322–330. DOI: 10.1016/j.clay.2008.09.009

13. Schulze S.E., Rickert J. Pozzolanic activity of calcined clays // SP-289: Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues. 2012.

14. Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Issue 1. Pp. 113–122. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.013

15. Rakhimov R.Z., Kamalova Z.A., Yermilova E.Y. Blended portland cement based on thermally activated clays and carbonate additives // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9. Issue 4. Pp. 578–583. DOI: 10.1134/s2075113318040329

16. 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 // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1017. Pp. 61–70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1017.61

17. Nizina T., Balykov A., Volodin V., Kyashkin V. Structure and properties of cement systems with addi-

tives of calcined clay and carbonate rocks // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. No. 8 (116). P. 11602. DOI: 10.34910/MCE.116.2. EDN XFXNAO.

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. DOI: 10.51608/26867818\_2023\_1\_59. EDN ZBEXPG.

19. Тейлор Х.Ф. Химия цементов. М. : Мир, 1996. 529 с.

20. Гориков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ : учебное пособие. М. : Высшая школа, 1981. 335 с.

21. Шейнфельд А.В., Каприелов С.С., Чулин И.А. Влияние температуры на параметры структуры и свойства цементных систем с органоминеральными модификаторами // *Градостроительство и архитектура*. 2017. Т. 7. № 1 (26). С. 58–63. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.01.10. EDN YRDUEV.

22. Detwiler R.J., Mehta P.K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete // *ACI Materials Journal*. 1989. Vol. 86. Issue 6. Pp. 609–614. DOI: 10.14359/2281

Поступила в редакцию 22 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 13 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 14 февраля 2024 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Владимир Владимирович Володин — кандидат технических наук, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 933723, Scopus: 57195424982, ResearcherID: AAN-7738-2020, ORCID: 0000-0002-3008-6242; volodinv1994@gmail.com;

Олег Вячеславович Тараканов — доктор технических наук, профессор, декан факультета управления территориями; **Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС)**; 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28; РИНЦ ID: 448093, Scopus: 7004757888; tarov60@mail.ru;

Татьяна Анатольевна Низина — доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 131099, Scopus: 57190161363, ResearcherID: P-2639-2017, ORCID: 0000-0002-2328-6238; nizinata@yandex.ru;

Владимир Михайлович Кяшкин — кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры физического материаловедения; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 27869, Scopus: 7801669853, ResearcherID: AAE-1757-2019, ORCID: 0000-0002-3413-247X; kyashkin@mail.ru;

Артемий Сергеевич Балыков — кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 813269, Scopus: 57190170885, ResearcherID: AAF-4208-2020, ORCID: 0000-0001-9087-1608; artbalrun@yandex.ru.

Вклад авторов:

Володин В.В. — развитие методологии исследования, обработка материала, написание исходного текста, создание иллюстраций и таблицы, изготовление образцов.

Тараканов О.В. — редакция текстового материала.

Низина Т.А. — научное руководство, методология исследования.

Кяшкин В.М. — проведение экспериментальных исследований, сбор материала.

Бальков А.С. — участие в экспериментальной работе, редактирование текста статьи, изготовление образцов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Sibgatullin I.R. "Carbonate" cements of low water demand. Moscow, ASV, 2021; 366. (rus.).
2. Kapriellov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for producing high-strength concretes. *Construction Materials*. 2017; 11:4-10. EDN ZWUFVB. (rus.).
3. 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. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 8(34):47-53. EDN PJWLHF. DOI: 10.5862/mce.34.7. (rus.).
4. Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S. On the issue of expanding the base of mineral and complex additives for cement concrete. *E3S Web of Conferences*. 2019; 135:01018. DOI: 10.1051/e3sconf/201913501018
5. Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S. Complex organomineral additives with hardening accelerator. *Solid State Phenomena*. 2018; 284:929-935. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.284.929
6. Nizina T.A., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Fiber fine-grained concretes with polyfunctional modifying additives. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 4(72):73-83. DOI: 10.18720/MCE.72.9. EDN ZFCAMF.
7. Nizina T.A., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin V.V. Physical and mechanical properties of modified fine-grained fibre-reinforced concretes containing carbon nanostructures. *International Journal of Nanotechnology*. 2019; 16(6/7/8/9/10):496. DOI: 10.1504/ijnt.2019.106621
8. Bazhenov Y.M. *Concrete science : textbook*. Moscow, ASV Publishing House, 2015; 144. (rus.).
9. Nguyen Doan Tung Lam, Samchenko S.V. Complex modifier based on alumina cement and pozzolanic addition. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(5):709-716. DOI: 10.22227/19970935.2023.5.709-716 (rus.).
10. Lam N.D.T., Samchenko S.V., Shvetsova V.A., Bulgakov B.I. Influence of complex additives on the strength of cement stone at an early age. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 5:52-59. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.05.52-59. EDN PFYHXG. (rus.).
11. Butt Y.M. *Technology of cement and other binders*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976; 407. (rus.).
12. Habert G., Choupay N., Escadeillas G., Guillaume D., Montel J.M. Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. *Applied Clay Science*. 2009; 43(3-4):322-330. DOI: 10.1016/j.clay.2008.09.009
13. Schulze S.E., Rickert J. Pozzolanic activity of calcined clays. *SP-289: Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*. 2012.
14. Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41(1):113-122. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.013
15. Rakhimov R.Z., Kamalova Z.A., Yermilova E.Y. Blended portland cement based on thermally activated clays and carbonate additives. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018; 9(4):578-583. DOI: 10.1134/s2075113318040329
16. 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. *Materials Science Forum*. 2021; 1017:61-70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1017.61
17. Nizina T., Balykov A., Volodin V., Kyashkin V. Structure and properties of cement systems with additives of calcined clay and carbonate rocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 8(116):11602. DOI: 10.34910/MCE.116.2. EDN XFXNAO.
18. Volodin V.V., Nizina T.A. Analysis of the mineral raw material base of the republic of Mordovia suitable for the production of active mineral additives. *Expert: Theory and Practice*. 2023; 1(20):59-62. DOI: 10.51608/26867818\_2023\_1\_59. EDN ZBEXPG. (rus.).
19. Taylor H.F. *Chemistry of cements*. Moscow, Mir Publ., 1996; 529. (rus.).
20. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. *Methods of physical and chemical analysis of binders : textbook*. Moscow, Higher School Publ., 1981; 335. (rus.).
21. Sheinfeld A.V., Kapriellov S.S., Chilin I.A. Influence of temperature on the parameters of the structure and properties of cement systems with organo-mineral modifiers. *Urban planning and architecture*. 2017; 7(1):58-63. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.01.10. EDN YRDUEV. (rus.).
22. Detwiler R.J., Mehta P.K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete. *ACI Materials Journal*. 1989; 86(6):609-614. DOI: 10.14359/2281

Received October 22, 2023.

Adopted in revised form on February 13, 2024.

Approved for publication on February 14, 2024.

**BIOTNOTES:** **Vladimir V. Volodin** — Candidate of Technical Sciences, research engineer of the Research Laboratory of Ecological and Meteorological Monitoring, Construction Technologies and Expertise; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 933723, Scopus: 57195424982, ResearcherID: AAH-7738-2020, ORCID: 0000-0002-3008-6242; volodinvv1994@gmail.com;

**Oleg V. Tarakanov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Territorial Management; **Penza State University of Architecture and Construction (PGUAS)**; 28 German Titov st., Penza, 440028, Russian Federation; ID RSCI: 448093, Scopus: 7004757888; tarov60@mail.ru;

**Tat'yana A. Nizina** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Structures; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 131099, Scopus: 57190161363, ResearcherID: P-2639-2017, ORCID: 0000-0002-2328-6238; nizinata@yandex.ru;

**Vladimir M. Kyashkin** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Physical Materials Science; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 27869, Scopus: 7801669853, ResearcherID: AAE-1757-2019, ORCID: 0000-0002-3413-247X; kyashkin@mail.ru;

**Artemiy S. Balykov** — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Research Laboratory of Ecological and Meteorological Monitoring, Construction Technologies and Expertise; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 813269, Scopus: 57190170885, ResearcherID: AAF-4208-2020, ORCID: 0000-0001-9087-1608; artbalrun@yandex.ru.

*Author contributions:*

*Vladimir V. Volodin — development of the research methodology, processing of the material, writing the source text, creating illustrations and tables, making samples.*

*Oleg V. Tarakanov — editing of text material.*

*Tat'yana A. Nizina — scientific guidance, research methodology.*

*Vladimir M. Kyashkin — conducting experimental studies, collecting material.*

*Artemiy S. Balykov — participation in experimental work, editing the text of the article, making samples.*

*The authors declare no conflict of interest.*