

Электрохимические и физико-механические свойства композитов на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего

Хамза Абдулмалек Кайс¹, Нина Николаевна Морозова²

¹ Университет Саны; г. Сана, Йеменская Республика;;

² Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение смешанных вяжущих с повышенным содержанием активных минеральных добавок (МД) позволяет улучшить ряд важнейших физико-механических свойств бетона. Однако снижение доли клинкера для конструктивных бетонов может негативно сказаться на долговечности железобетонного изделия и сооружения в целом вследствие потенциального понижения pH поровой жидкости бетона. Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие (ГЦПВ) относятся к материалам с малым клинкерным фондом, поскольку в их составе преобладает гипсовое вяжущее, имеющее кислую среду. Поэтому при внедрении в производство несущих изделий и конструкций необходимо проверять защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре.

Материалы и методы. Для приготовления ГЦПВ использовали гипсовое вяжущее марки Г-5, цементное марки ЦЕМ I 42,5Н и пуццолановые МД: природный цеолит, отходы промышленности: микрокремнезем и зола-уноса. Методами потенциометрическими и кондуктометрическими исследованы величины pH и ионной концентрации гидратированных суспензий с различными активными МД, как моно-, так и бинарными их модификациями. Прочность на сжатие оценивали после 7, 28 и 90 сут твердения в соответствии с ГОСТ 10180–2012; водопоглощение — по методике ГОСТ 23789–2018; водостойкость — по коэффициенту размягчения.

Результаты. В результате проведенных экспериментов получен состав ГЦПВ с высокими защитными и физико-механическими свойствами, который может быть использован для изготовления конструкционного быстротвердеющего бетона.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о достаточных защитных свойствах бетонов на основе ГЦПВ по отношению к стальной арматуре: показатель pH не менее 12 и состав, содержащий 60 % гипсового вяжущего, 25 % портландцемента и бинарную активную МД на основе микрокремнезема и природного цеолита при их соотношении 2:1 по массе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, потенциометрия, кинетические кривые pH, кондуктометрия, кинетические кривые электропроводности, активная минеральная добавка, коррозия, прочность при сжатии, водостойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кайс Х.А., Морозова Н.Н. Электрохимические и физико-механические свойства композитов на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1330–1342. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1330-1342

Автор, ответственный за переписку: Хамза Абдулмалек Кайс, hamza.qais@mail.ru.

Electrochemical and physical-mechanical properties of composites based on gypsum-cement-pozzolan binder

Hamza A. Qais¹, Nina N. Morozova²

¹ Sana'a University; Sana'a, Republic of Yemen;

² Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The use of mixed binders with an increased content of active mineral additives allows improving a number of the most important physical and mechanical properties of concrete. However, a decrease in the proportion of clinker for structural concrete may negatively affect the durability of the reinforced concrete product and the structure as a whole, due to a potential decrease in the pH of the pore liquid of the concrete. Gypsum cement-pozzolan binders are materials with a small clinker fund, since gypsum binder, which has an acidic environment, predominates in their composition. Therefore, when introducing load-bearing products and structures into production, it is necessary to check the protective properties of concrete in relation to steel reinforcement.

Materials and methods. To prepare the gypsum-cement-pozzolan binder, we used gypsum binder of grade G-5, cement binder of grade CEM I 42.5N and pozzolan mineral additives: natural zeolite, microsilica and fly ash. The pH and ionic concentration values of hydrated suspensions with various active mineral additives, both mono- and binary modifications, were

studied using potentiometric and conductometric methods. Compressive strength was estimated after 7, 28 and 90 days of hardening in accordance with GOST 10180–2012; water absorption — according to the method of GOST 23789–2018; water resistance was estimated by the softening coefficient.

Results. As a result of the experiments, a composition of gypsum-cement-pozzolan binder with high protective and physical-mechanical properties was obtained, which can be used for the production of structural quick-hardening concrete.

Conclusions. The obtained results indicate sufficient protective properties of concrete based on gypsum-cement-pozzolan binders in relation to steel reinforcement: a pH of at least 12 and a composition containing 60 % gypsum binder, 25 % Portland cement and a binary active mineral additive based on microsilica and natural zeolite in a ratio of 2:1 by weight.

KEYWORDS: gypsum cement-pozzolan binder, potentiometry, pH kinetic curves, conductometry, electrical conductivity kinetic curves, active mineral additive, corrosion, compressive strength, water resistance

FOR CITATION: Qais H.A., Morozova N.N. Electrochemical and physical-mechanical properties of composites based on gypsum-cement-pozzolan binder. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1330-1342. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1330-1342 (rus.).

Corresponding author: Hamza A. Qais, hamza.qais@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время к цементным бетонам, являющимся одним из основных конструктивных строительных материалов, предъявляют высокие требования по расходу материальных и энергетических ресурсов [1–3]. Экономия цемента, как дорогостоящего компонента бетона, связана с необходимостью поиска новых путей модификации неорганических вяжущих веществ [4–6]. С развитием аддитивных технологий появляется интерес к технологичным бетонам на основе гипсоцементных композиций, которые позволяют в значительной степени снизить стоимость готовой продукции и соответственно повысить ее конкурентоспособность [7–9]. К таким материалам можно отнести гипсоцементно-пуццолановые вяжущие (ГЦПВ), гипсошлаково-пуццолановые (ГШВ), композиционные гипсовые вяжущие (КГВ) и т.п., но они не обделены недостатками [10]. Их многокомпонентный состав может быть не только с высокой деформативностью и низкой долговечностью из-за образования высокоосновной формы гидросульфатоалюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot (31 - 32) \cdot \text{H}_2\text{O}$ в затвердевшей структуре, но и иметь низкий уровень щелочности поровой жидкости камня, что способствует коррозии металлических армирующих элементов.

Коррозия стальной арматуры в бетоне, как известно [11–13], является результатом электрохимического процесса, который происходит при контакте металлической поверхности с водными растворами

электролитов. Особенность электрохимической коррозии заключается также в том, что окисление (ионизация) атомов металла и восстановление окислителя протекают в виде двух сопряженных реакций на различных участках поверхности металла (аноде и катоде), сопровождающихся возникновением между этими участками электродвижущей силы (ЭДС) и протеканием электрического тока¹ (рис. 1).

Оптимальным условием для обеспечения долговечности железобетонных конструкций служит пассивное состояние стали, при котором арматура не подвержена коррозии при любом уровне влажности бетона. Это пассивное состояние арматуры сохраняется до тех пор, пока pH поровой влаги в бетоне не снизится ниже 11,8 или содержание ионов-активаторов, таких как хлорид-ионы, не превысит критическое значение от 0,1 до 0,4 % по массе цемента [14]. Поэтому качественный армированный конструкционный бетон должен быть высокощелочным, чтобы обеспечивались условия для пассивации коррозионных процессов арматурной стали в железобетонных изделиях. Основные факторы, влияющие на нарушение пассивной пленки на ме-

¹ Маринин А.Н., Гарибов Р.Б., Овчинников И.Г. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации. Саратов : Издат. центр «РАТА», 2008. 296 с.

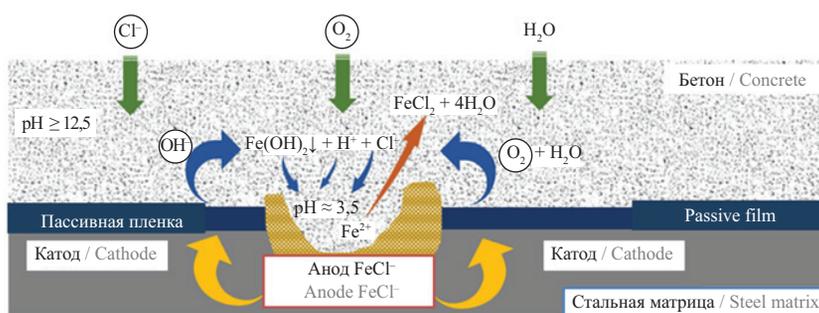


Рис. 1. Условия возникновения коррозии стальной арматуры

Fig. 1. Conditions for the occurrence of corrosion of steel reinforcement



Рис. 2. Причины нарушения пассивной пленки, обеспечивающей защиту металла

Fig. 2. Causes of damage to the passive film providing protection to the metal

галлической поверхности и обеспечивающие ее защиту², показаны на рис. 2.

Не следует исключать, что коррозионные процессы стальной арматуры в бетоне могут появиться из-за наличия в нем трещин, которые станут проводниками коррозионной среды к арматуре, а также из-за коррозии цементирующего камня бетона, наличия блуждающих токов и недостаточной толщины слоя бетона.

Известно, что цементный камень в бетоне характеризуется pH от 12,0 до 13,8 и поэтому на поверхности стальной арматуры образуется тонкий пассивирующий слой, который предотвращает коррозию арматурной стали [11, 15]. Снижение защитных свойств цементного бетона по отношению к стальной арматуре возможно за счет процесса карбонизации, при котором гидроксид кальция в бетоне преобразуется в карбонат кальция, с понижением pH поровой жидкости до уровня pH ~9,0–9,5.

Цемент в составе ГЦПВ оказывает также значительное воздействие на защитные характеристики бетона по отношению к стальной арматуре, влияя как на способность связывать углекислый газ (CO_2), так и на диффузионное сопротивление проникновения CO_2 . Увеличение содержания щелочных продуктов гидратации в бетоне на основе ГЦПВ способствует большему связыванию CO_2 и замедлению продвижения фронта карбонизации вглубь материала. В то же время ГЦПВ с пуццолановыми добавками существенно снижают количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из-за реакций с компонентами добавки, что может ускорить процесс карбонизации.

В работе [16] показано, что процессы, происходящие при гидратации и твердении гипсового вяжущего в присутствии щелочного компонента, наглядно и информативно отображаются на кинетических кривых изменения pH, полученных потенциометрическим методом контроля процессов гидратации

и твердения вяжущих веществ и величины pH — характеристики, от которой зависит растворимость сульфата кальция. Наиболее оптимальными являются условия гидратации, при которых величина pH в начальные сроки находится в слабокислой области (pH = 6,3–6,7), затем переходящей в нейтральную среду. Причем установлено, что в щелочной среде влияние генезиса гипсового сырья несколько сглаживается, а в кислой среде, наоборот, усиливается. Но наиболее эффективный способ повышения водостойкости гипсового вяжущего — уменьшение растворимости в воде сульфата кальция путем введения в состав ГЦПВ различных активных минеральных добавок [17–19].

Анализом литературных данных по защитным свойствам бетона на основе гипсоцементных композиций по отношению к стальной арматуре выявлено, что существует значительное многообразие их составов и отсутствуют зависимости изменения величины pH и ионной концентрации минеральных суспензий в различные сроки твердения. В связи с вышеизложенным цель работы — оценка электрохимических и физико-механических свойств различных составов ГЦПВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для приготовления ГЦПВ использовали гипсовое и цементное вяжущие и пуццолановые минеральные добавки (МД): природный цеолит, микрокремнезем (МК) и зола-уноса (ЗУ), следующих характеристик:

- гипсовое вяжущее (ГВ) марки Г-5 производства ООО Develop a nation (Йеменская Республика), соответствующее требованиям стандарта EN 13279-1:2008, физико-механические свойства которого представлены в табл. 1;

- цементное вяжущее — портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н Amgran cement (Йеменская Республика), удовлетворяющий стандарту ASTM C150 Type 1, минеральный состав по паспорту качества приведен в табл. 2, а его физико-механические свойства — в табл. 1;

² Овчинникова Т.С., Маринин А.Н., Овчинников И.Г. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Вып. № 5.

Табл. 1. Физико-механические свойства вяжущих

Table 1. Physical and mechanical properties of binders

Наименование показателя / Name of the indicator	Единица измерения Unit of measurement	Значение показателя для: The value of the indicator for:	
		гипса / gypsum	цемента / cement
Тонкость помола / Grinding fineness: • остаток на сите № 02 / residue on sieve No. 02; • остаток на сите № 008 / residue on sieve No. 008	%	4,5 –	– 6
Нормальная плотность / Normal density	%	55	27–28
Сроки схватывания / Setting time: • начало / start; • конец / end	ч:мин / h:min	0:6 0:12	2:55 3:40
Предел прочности при изгибе / Bending strength: • через 2 ч / after 2 hours; • в высушенном до постоянной массы / in dried to constant weight; • через 28 сут / after 28 days	МПа / MPa	2,9 5,5 –	– – 7,0
Предел прочности при сжатии / Compressive strength: • через 2 ч / after 2 hours; • в высушенном до постоянной массы / in dried to constant weight; • через 28 сут / after 28 days	МПа / MPa	5,35 13,8 –	– – 48,5
Прочность при сжатии после пропаривания Compressive strength after steam curing	МПа / MPa	–	38,4
Коэффициент размягчения / Softening coefficient	–	0,31	–

Табл. 2. Минералогический состав портландцемента

Table 2. Mineralogical composition of Portland cement

Наименование цемента / Name of cement	Минеральный состав клинкера, % / Mineral composition of clinker, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Amran cement (ЦЕМ I 42,5Н) (CEM I 42.5N)	53,8	20,9	6,4	12,04

• микрокремнезем с Саудовского металлургического комбината BUILMIX в виде порошка с частицами сферической формы размером 0,01–0,1 мкм, имеющий удельную поверхность 38 000 см²/г и пуццолановую активность 1210 мг/г;

• зола-уноса, соответствующая требованиям ГОСТ 25818–2017 и полученная от фирмы BUILMIX Саудовской Аравии с влажностью 1,15 %, имеющая удельную поверхность 29 500 см²/г и пуццолановую активность 970 мг/г;

• природный цеолит (ЦЕО) с предприятия Yemen zeolite в г. Сана (Йеменская Республика) в виде зерни-

стого рассыпчатого материала светло-зеленого цвета с наибольшим размером зерен 1 мм; перед использованием в экспериментах его высушивали и измельчали до порошкообразного состояния с удельной поверхностью 6500 см²/г, его пуццолановая активность составила 815 мг/г. Химические составы материалов представлены в табл. 3.

Методы испытания

В работе использованы общепринятые и стандартные методики:

• исследование pH-среды гидратирующихся минеральных суспензий осуществляли с помощью

Табл. 3. Химический состав цемента и МД, входящих в состав ГЦПВ

Table 3. Chemical compositions of cement and active mineral additives

Название вещества / Name of the substance	Количество, % / Quantity, %									
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	SO ₃
ПЦ / PC	20,59	63,35	2,94	3,77	–	4,96	–	–	–	1,96
МК / SF	94,49	0,5	0,62	0,1	0,09	0,07	0,7	–	–	–
ЗУ / FA	53,8	5,7	2,3	5,2	0,6	26,72	0,7	1,4	–	–
ЦЕО / ZEO	71,3	0,89	0,43	3,44	0,99	11,12	2,69	0,22	0,02	–



Рис. 3. Оборудование для измерения ГЦПВ суспензий: *a* — на рН-показатель; *b* — на электропроводимость
 Fig. 3. Equipment for measuring the GCPB of suspensions: *a* — for the pH indicator; *b* — for electrical conductivity

стационарного рН-метра марки рН-618 (рис. 3), производства HANNA Instruments (Германия). Значение рН водных суспензий определяли на составах при соотношении Т/Ж = 1:1 в сроки: 1, 4, 7, 14, 21, 45, 60 и 90 сут твердения;

- электропроводность суспензий измеряли с помощью кондуктометра марки Hach Sension 378 (рис. 3);
- подвижность оценивали по диаметру расплыва смеси по ГОСТ 23789–2018 с использованием прибора Суттарда;
- прочность на сжатие камня из ГЦПВ оценивали после 28 сут твердения в соответствии с ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» на образцах-кубиках с размерами ребра 7 см;
- водопоглощение камня из ГЦПВ — по методике ГОСТ 23789–2018;
- водостойкость ГЦПВ бетона оценивали по коэффициенту размягчения, который рассчитывали

из отношения предела прочности на сжатие образцов в водонасыщенном состоянии (водонасыщение производили в течение 48 ч) к пределу прочности на сжатие образцов в сухом состоянии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первоначально изучены измеренные показатели рН и электропроводности в процессе твердения индивидуальных вяжущих и в составе ГЦПВ. Базовый состав ГЦПВ, определенный в исследовании [19], следующий — ГВ:ПЦ:АМД = 60:25:15 % по массе. Исследуемые составы приведены в табл. 4, результаты — на рис. 4–7.

При гидролизе и гидратации гипса (рис. 4, *a*) наблюдается небольшое колебание рН среды, значение которой находится в диапазоне от 6,55 до 6,86. Если на графиках для гипсового вяжущего небольшой уклон кривой рН отмечается в сторону умень-

Табл. 4. Составы исследуемых композиций
 Table 4. Compositions of the studied compositions

Условное обозначение состава Conventional designation of composition	Состав ГЦПВ, % по массе / Composition of GCPB, % by weight				
	ГВ / GB	ПЦ / PC	МК / SF	ЦЕО / ZEO	ЗУ / FA
G	100	0	0	0	0
C	0	100	0	0	0
G > C	70	30	0	0	0
G = C	50	50	0	0	0
G < C	30	70	0	0	0
GCS	60	25	15	–	–
GCF	60	25	–	15	0
GCZ	60	25	–	–	15
GCP1	60	25	10	0	5
GCP2	60	25	7,5	0	7,5
GCP3	60	25	5	0	10
GCP4	60	25	10	5	0
GCP5	60	25	7,5	7,5	0
GCP6	60	25	5	10	0
GCP7	60	25	0	10	5
GCP8	60	25	0	7,5	7,5
GCP9	60	25	0	5	10

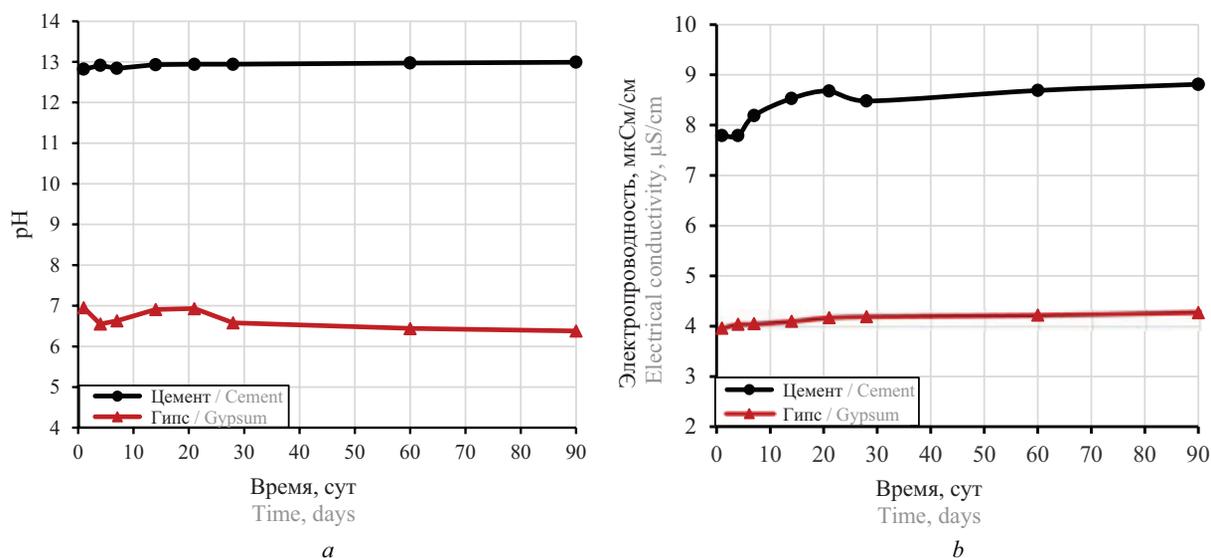


Рис. 4. Динамика изменения pH среды и электропроводности гидратирующихся цемента и гипса

Fig. 4. Dynamics of changes in pH and electrical conductivity of hydrating cement and gypsum

шения значения, то для цемента — в сторону увеличения от 12,71 до 13.

Результаты по электропроводности (рис. 4, b) показывают схожую закономерность с pH. Для цементных паст значения электропроводности варьируются в диапазоне от 7,79 до 8,81 мкСм/см, а для гипсовых — от 3,96 до 4,27 мкСм/см.

На следующем этапе работы проведено исследование изменения pH среды при гидратации гипсоцементных композиций при соотношении гипса к цементу: 1:2,33; 1:1 и 2,33:1. Результаты представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, a, добавление гипса в цемент приводит к уменьшению pH, вероятно, это за счет перевода высокоосновных гидроалюминатов

(ферритов) кальция в низкоосновные, что является фактом уменьшения концентрации гидроксид-ионов водорода $[OH^-]$ в растворе, единственным «поставщиком» которых служит $Ca(OH)_2$ [20]. Наибольший показатель pH среды, равный 12,82, имеет суспензия с 70 % цемента. Эта закономерность связана с большим количеством $Ca(OH)_2$, выделяющимся в результате гидратации силикатных фаз клинкера. Более низкие показатели pH наблюдаются при замене части портландцемента до 50 % гипсовым вяжущим. При этом количество $Ca(OH)_2$ в продуктах гидратации уменьшается и вместе с этим снижается и показатель pH до 12,56. Наименьшее значение pH среды, равное 11,91, имеет состав с 70 % гипса и 30 % цемента.

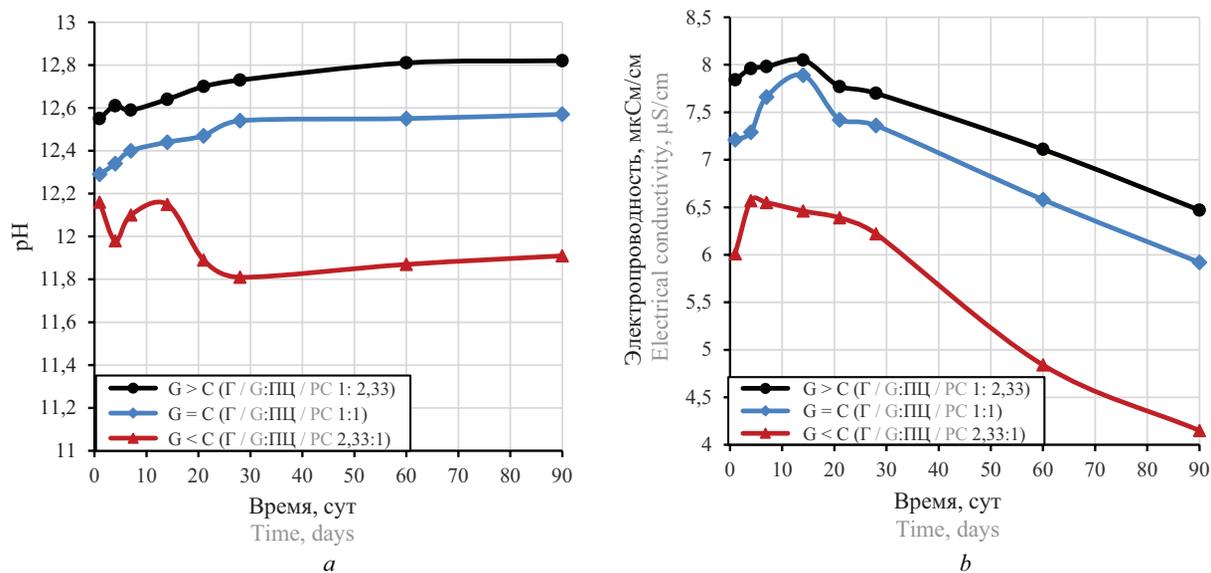


Рис. 5. Динамика изменения pH среды и электропроводности гидратирующихся цементно-гипсовых композиций

Fig. 5. Dynamics of changes in pH and electrical conductivity of hydrating cement-gypsum compositions

Итак, в составе цементно-гипсовой композиции при равном их соотношении, влияние гипса на щелочность ограничено.

Результаты электропроводности (рис. 5, *b*) показывают более высокие значения проводимости для смеси с большим содержанием цемента на начальном этапе (до 14 сут) гидратации, далее наблюдается резкое снижение. Наименьшее снижение электропроводности получено в составе с большим содержанием гипса, также в этом составе снижение электропроводности начинается после четвертых суток твердения и значения варьируются от 6,01 до 4,15 мкСм/см. Из полученных данных следует, что при замене до 50 % цемента гипсом щелочность камня изменяется не критично.

Далее проведены исследования влияния вида МД на показатель рН среды и электропроводность ГЦПВ суспензий. Результаты представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, *a*, наибольшее значение рН, равное 12,55, имеет состав ГЦПВ с МК на 14-е сут твердения, а на 90-е сут оно снизилось до 12,29. Более низкие значения рН, равные 12,06 и 11,39, показывают составы ГЦПВ с ЗУ и с ЦЕО соответственно. Бетон на основе ГЦПВ с МК и ГЦПВ с ЗУ позволит сохранить пассивирующее действие среды по отношению к стальной арматуре.

Анализ ГЦПВ суспензий по электропроводности продемонстрировал (рис. 6, *b*), что в составах ГЦПВ с МК и ЗУ до 7 сут твердения значения электропроводности увеличиваются, затем снижаются и на 28-е сут наблюдается небольшое увеличение, а далее идет снижение. Подобная зависимость в составе ГЦПВ с ЦЕО, но с меньшими значениями. Значения электропроводности во всех составах ГЦПВ с минеральными добавками ниже на одну-две единицы по сравнению с составами гипсоцементных композиций без МД.

Следует заметить, что на кондуктограмме (рис. 6, *b*) появление второго максимума в возрасте 28 сут на нисходящем участке графика можно объ-

яснить перекристаллизацией этtringита в моносульфатную форму [20, 21]. Другим объяснением может быть наличие защитных слоев вокруг зерен этtringита, которые при нарушении осмотического давления временно выделяют сульфат и другие ионы в окружающую среду.

Затем исследовали влияние бинарных минеральных добавок в составе ГЦПВ на изменение рН среды и их электропроводность при гидратации суспензии в течение 90 сут. Рассмотрены бинарные МД из смеси с МК с ЗУ; МК с ЦЕО и ЦЕО с ЗУ при их соотношении 2:1; 1:1 и 1:2. Результаты представлены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, бинарные минеральные добавки оказывают своеобразное влияние на рН-показатель и электропроводность ГЦПВ суспензий. Наиболее высокое значение рН, равное 12,46, получено на ГЦПВ с бинарной добавкой из МК с ЗУ при их соотношении 2:1 на 90-е сут твердения (рис. 7, *a*), наименьшее значение рН зафиксировано в составе ГЦПВ с добавкой из ЦЕО с ЗУ при соотношении 2:1, которое составило 11,61 на 90-е сут (рис. 7, *e*).

Исследование суспензий ГЦПВ с бинарными добавками на электропроводность (рис. 7, *a-c*) показало, что интенсивное ее снижение (более чем на 3 мСм/см) зафиксировано в составах ГЦПВ с бинарной добавкой из ЦЕО и ЗУ при соотношении 1:2 (рис. 7, *f*), а большое ее значение получено в составе ГЦПВ с бинарной добавкой из МК и ЦЕО при соотношении 2:1 (рис. 7, *d*).

В результате установлены два значимых времени твердения, в течение которых рН и электропроводность большинства исследуемых суспензий снижается — это 60 и 90 сут. Можно также отметить, что для образцов с большим содержанием МК снижение электропроводности начинается через 60 сут, тогда как для образцов с меньшим содержанием МК снижение электропроводности начинается раньше. Это объясняется тремя факторами: 1) уменьшением

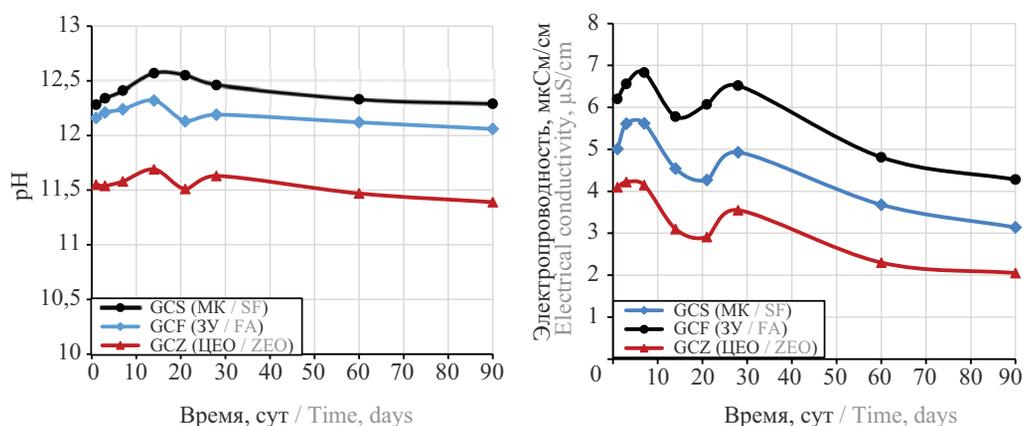


Рис. 6. Динамика изменения рН среды и электропроводности гидратирующихся ГЦПВ суспензий с монодобавками

Fig. 6. Dynamics of changes in the pH of the medium and electrical conductivity of hydrating GCPB suspension with mono-additives

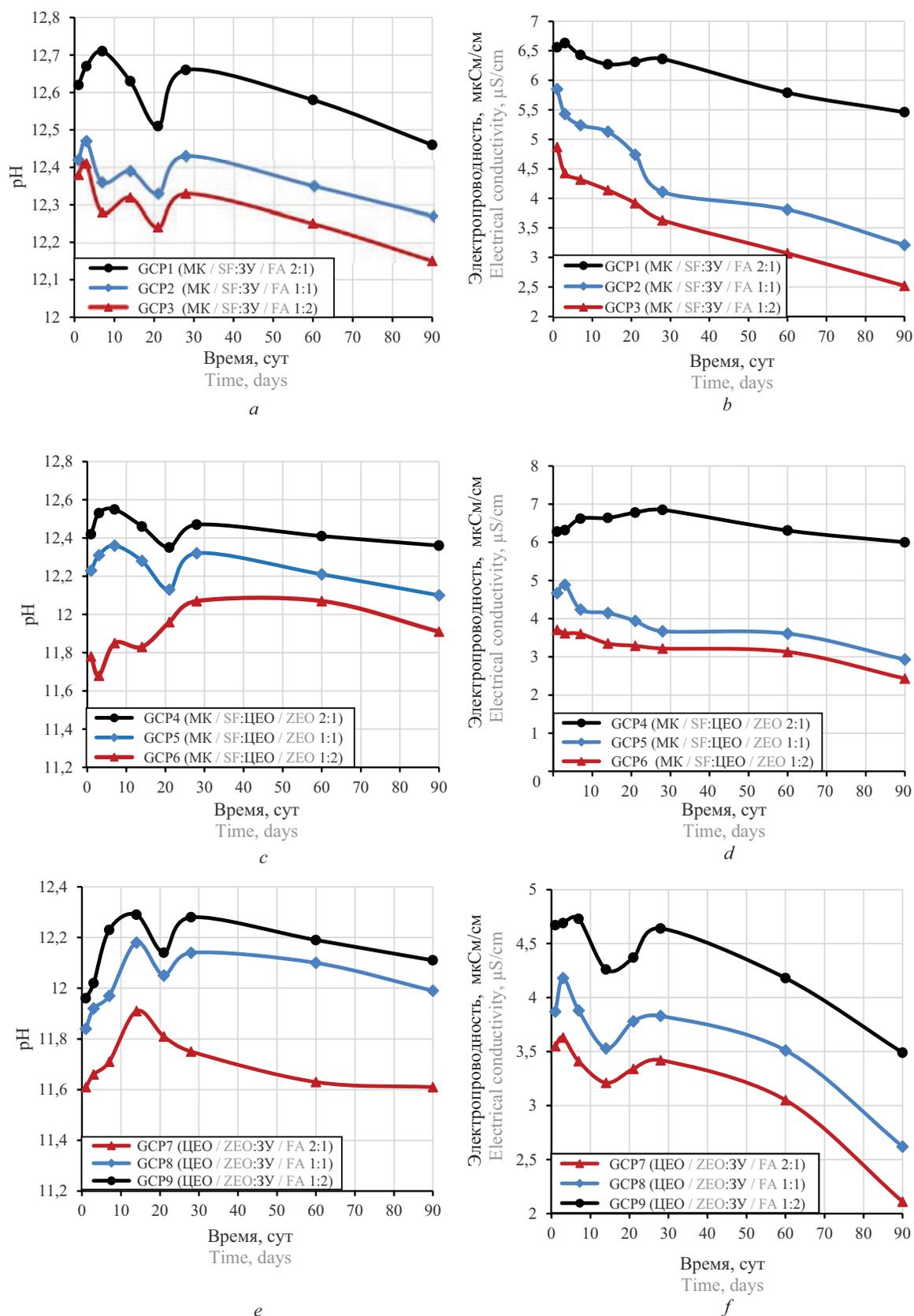


Рис. 7. Динамика изменения pH среды и электропроводности гидратирующихся ГЦПВ суспензией с бинарными добавками: *a, b* — МК с ЗУ при соотношении 1:2; 1:1; 2:1; *c, d* — МК с ЦЕО при соотношении 1:2; 1:1; 2:1; *e, f* — ЦЕО с ЗУ при соотношении 1:2; 1:1; 2:1

Fig. 7. Dynamics of changes in pH and electrical conductivity of hydrating GCPB suspension with binary additives: *a, b* — SF with FA at a ratio of 1:2; 1:1; 2:1; *c, d* — SF with ZEO at a ratio of 1:2; 1:1; 2:1; *e, f* — ZEO with FA at a ratio of 1:2; 1:1; 2:1

количества выщелачивающих ионов во время гидратации ПЦ по мере уменьшения его доли в смесях; 2) степенью потребления свободного Са(ОН)₂, высвобождаемый при гидратации ПЦ увеличивается по мере увеличения содержания МД; 3) взаимодействие минеральных добавок со свободным Са(ОН)₂ высвобождается в результате гидратации ПЦ, приводящей к образованию плохокристаллизованных гидратов силиката кальция.

На следующем этапе работы были изучены технологические и физико-механические свойства ГЦПВ при их модификации с индивидуальными и бинарными МД. Гипсоцементная композиция представлена для сравнения. Полученные результаты приведены в табл. 5 и на рис. 8, 9.

Как видно из данных табл. 5, исследуемые минеральные добавки несущественно изменяют водопотребность и сроки схватывания ГЦПВ смеси.

Как видно из табл. 5, с течением времени наблюдается рост плотности бетона изученных со-

ставов. Наибольшую плотность (1512 кг/см³) ГЦПВ камня имеет состав ГЦПВ с бинарной добавкой из МК с ЦЕО при их соотношении 2:1. Наибольшее снижение водопоглощения, равное 15,45 %, имеет состав ГЦПВ с бинарной добавкой из МК с ЦЕО при их соотношении 2:1, что на 1,7 раза меньше контрольного состава без минеральных добавок, его водопоглощение составило 25,6 %.

Как видно из рис. 8, 9, МД в зависимости от их вида и способа модификации оказывают существенное влияние на предел прочности при сжатии и коэффициент размягчения камней из ГЦПВ. Как видно из рис. 8, при введении в состав ГЦПВ мономинеральных добавок наибольший прирост прочности и коэффициент размягчения отмечается в составе ГЦПВ с добавкой МК и составляет на 28 сут 51 и 12 % соответственно по сравнению с составом без минеральных добавок.

Наилучшие физико-механические показатели ГЦПВ камня получены с бинарной минеральной

Табл. 5. Свойства ГЦПВ камня

Table 5. Properties of GCPB stone

Условное обозначение состава Conventional designation of composition	В/Т смеси W/S mixtures	Рас- плыв, мм Spread, mm	Сроки схватывания, мин:с / Setting time, min:sec		Средняя плотность, кг/м ³ , и коэффициент размягчения в возрасте, сут / Average density, kg/m ³ , and softening coefficient at age, days				Водо- поглощение образцов в возрасте 28 сут, % Water ab- sorption of specimens at the age of 28 days, %
			начало star	конец end	3	7	28	90	
G > C (конт) / (cont) (МД / MA = 0)	0,565	185 ± 5	8:30	13:30	1223 0,58	1254 0,58	1273 0,59	1277 0,56	25,62
GC	0,560		8:50	13:45	1373 0,64	1388 0,65	1485 0,66	1528 0,67	21,42
GCF	0,570		8:00	13:00	1323 0,62	1329 0,62	1347 0,64	1355 0,65	23,07
GCZ	0,575		7:30	12:30	1190 0,6	1204 0,61	1226 0,62	1237 0,63	16,24
GCP1	0,582		8:20	13:35	1314 0,65	1365 0,66	1463 0,68	1512 0,71	21,45
GCP2	0,575		8:15	13:25	1291 0,63	1318 0,64	1340 0,66	1478 0,67	22,73
GCP3	0,584		8:10	13:20	1297 0,61	1315 0,62	1348 0,63	1436 0,64	23,26
GCP4	0,580		8:00	13:15	1381 0,67	1309 0,68	1312 0,69	1396 0,73	15,45
GCP5	0,585		7:45	13:00	1268 0,64	1274 0,66	1311 0,67	1374 0,69	16,69
GCP6	0,595		7:25	12:50	1241 0,61	1275 0,63	1282 0,63	1287 0,65	16,17
GCP7	0,595		7:00	12:00	1230 0,6	1264 0,62	1288 0,62	1293 0,61	19,81
GCP8	0,600		7:40	12:30	1272 0,61	1278 0,61	1311 0,62	1321 0,62	20,63
GCP9	0,610		7:15	12:10	1284 0,61	1297 0,62	1326 0,63	1344 0,63	22,36

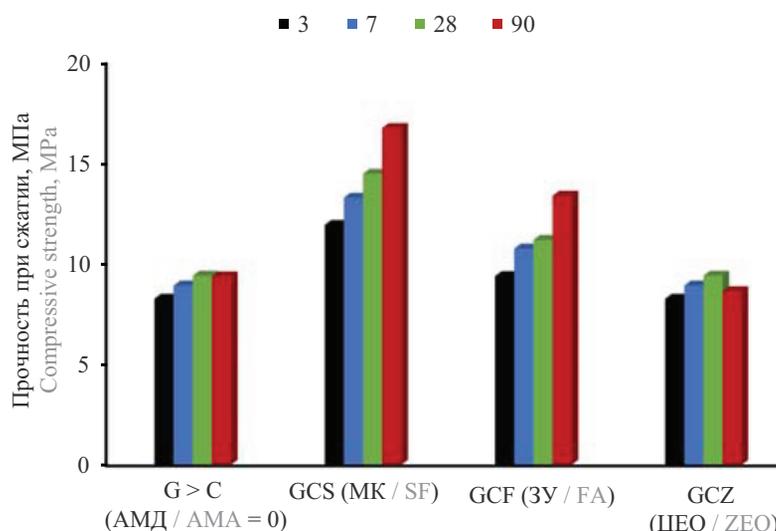


Рис. 8. Кинетика прочности при сжатии ГЦПВ камня с монодобавками

Fig. 8. Kinetics of compressive strength of GCPB stone with mono-additives

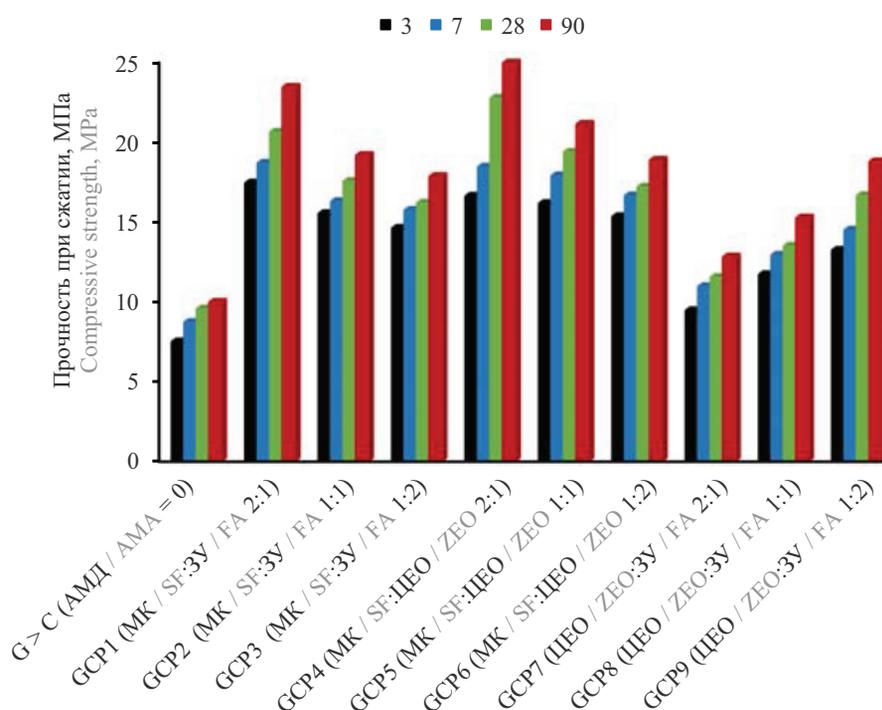


Рис. 9. Кинетика прочности при сжатии ГЦПВ камня с бинарными добавками

Fig. 9. Kinetics of compressive strength of GCPB stone with binary additives

добавкой, состоящей из МК:ЦЕО = 2:1 (рис. 9). При этом прочность и коэффициент размягчения ГЦПВ камня в 28-суточном возрасте составляют 23 МПа и 0,69 соответственно, а на 90-е сутки твердения возрастают до 25 МПа и 0,73 соответственно.

Полученные сведения по электрохимическим свойствам (рН и электропроводность), а также по физико-механическим показателям (прочность на сжатие и коэффициент размягчения) дают возможность заявить о достаточной долговечности ГЦПВ для конструкционных бетонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

- установлено, что наибольшее значение рН среды ГЦПВ камня, равное 12,45, имеет состав с бинарной АМД из микрокремнезема и цеолита при соотношении 2:1, а с монодобавкой цеолита — 11,45 и оно наименьшее;
- изменения электропроводности суспензий ГЦПВ с АМД в течение 90 сут свидетельствуют о том, что МК способствует растворению минералов цемен-

та и переходу ионов в раствор, а ЦЕО замедляет этот процесс. Полученные данные необходимы при проектировании составов ГЦПВ бетонов и выборе эффективных водоредуцирующих добавок для матрицы ГЦПВ;

- наилучшие физико-механические показатели ГЦПВ получены с бинарной АМД, состоящей из микрокремнезема и цеолита при соотношении 2:1. Прочность ГЦПВ камня в 28-суточном возрасте составляет

23 МПа и возрастает до 25 МПа на 90-е сутки твердения;

- получен состав ГЦПВ, который может быть использован для конструкционного быстротвердеющего бетона, включающего 60 % гипсового вяжущего марки Г-5, 25 % портландцемента ЦЕМ I 42,5Н, комплексную активную минеральную добавку на основе природного цеолита Йеменского месторождения и микрокремнезема МК-85 при соотношении 2:1 по массе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шахов С.А. Влияние механоакустической активации волластонита на структуру и прочность цементного камня // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 4 (70). С. 8–18. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.1. EDN VKAWQL.

2. Смирнов Д.С., Мавлиев Л.Ф., Хузиахметова К.Р., Мотыйгуллин И.Р. Влияние минеральной добавки на основе молотого доменного шлака на свойства бетонов и бетонных смесей // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 4 (62). С. 61–69. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_61. EDN KQDLZR.

3. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Строганов В.Ф. Проектирование дорожных одежд со слоями из модифицированных кремнийорганическими соединениями цементогрунтов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 1 (67). С. 207–216. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.20. EDN ZABBNC.

4. Морозова Н.Н., Гуляков Е.Г. Свойства бетона на цеолитсодержащем вяжущем // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 2 (64). С. 27–39. DOI: 10.52409/20731523_2023_2_27. EDN LCQWVC.

5. Гизатуллин А.Р., Морозова Н.Н., Нестерова К.О. Функционализированные наполнители для применения в цементных бетонах // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. № 1 (11). С. 47–57. EDN CBGPNV.

6. Хозин В.Г. Перспективы развития отрасли строительных материалов в свете использования вторичных ресурсов // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. № 1 (11). С. 22–29. EDN NEVNVS.

7. Морозова Н.Н., Закиров К.И. Сравнительная эффективность замедлителей схватывания гипсоцементно-пуццоланового бетона для 3D-печати // Решения современных проблем материаловедения и технологий в строительстве. ВладСтройТех 2024 : мат. I Междунар. конф. молодых ученых. 2024. С. 143–149. EDN OTOSPD.

8. Рахимов Р.З., Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Совершенствование аддитивных техно-

логий малоэтажного жилищного строительства // Жилищное строительство. 2024. № 8. С. 11–19. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-8-11-19. EDN IUNORV.

9. Мухаметрахимов Р.Х. Влияние пластифицирующих добавок на основе поверхностно-активных натриевых солей на свойства бетонов, применяемых в технологии 3D-печати // Полимеры в строительстве : научный интернет-журнал. 2022. № 1 (10). С. 47–61. EDN ZIMNSF.

10. Ферронская А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2006. 335 с. EDN QNMOKT.

11. Deschner F., Winnefeld F., Lothenbach B., Seufert S., Schwesig P., Dittrich S. et al. Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Issue 10. Pp. 1389–1400. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.06.009

12. Liu X., Niu D., Li X., Lv Y., Fu Q. Pore Solution pH for the Corrosion Initiation of Rebars Embedded in Concrete under a Long-Term Natural Carbonation Reaction // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 1. P. 128. DOI: 10.3390/app8010128

13. Изотов В.С. Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре как функция структуры цементного композита // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2006. № 1 (5). С. 23–27. EDN KBBJUN.

14. Hsu T., Slate F., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve // ACI Journal Proceedings. 1963. Vol. 60. Issue 2. DOI: 10.14359/7852

15. Степанова В.Ф., Спивак Н.А., Королева Е.Н. Влияние степени коррозионного поражения арматуры на совместную работу с бетоном // Вестник НИЦ Строительство. 2024. № 1 (40). С. 105–116. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-1(40)-105-116. EDN ORPAWU.

16. Клименко В.Г., Володченко А.Н. Кинетика гидратации и гидролиза различных форм сульфата кальция // Современные проблемы строительного материаловедения : мат. Междунар. науч.-техн. конф. Четвертые академические чтения РААСН. 1998. С. 53–54.

17. Аунг Ч.Н., Потапова Е.Н. Влияние вида пуццолановой добавки на состав и свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Успехи в химии и химической технологии*. 2022. Т. 36. № 3 (252). С. 7–9. EDN ВХМІЕА.

18. Халиуллин М.И., Гильманишина А.И. Влияние вида и механоактивации минеральных наполнителей на свойства композиционных гипсовых вяжущих. М. : Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. С. 148–155.

19. Кайс Х.А., Морозова Н.Н. О возможности изготовления строительных изделий на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего в Республике Йемен // *Решения современных проблем материаловедения и технологий в строительстве*. ВладСтрой-

Тех 2024 : мат. I Междунар. конф. молодых ученых. 2024. С. 238–243. EDN ALTVDG.

20. Tashima M.M., Soriano L., Monzó J., Borrachero M.V., Akasaki J.L., Payá J. New method to assess the pozzolanic reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime:pozzolan suspensions // *Materiales de Construcción*. 2014. Vol. 64. Issue 316. P. e032. DOI: 10.3989/mc.2014.00914

21. Sinthaworn S., Nimityongskul P. Effects of temperature and alkaline solution on electrical conductivity measurements of pozzolanic activity // *Cement and Concrete Composites*. 2011. Vol. 33. Issue 5. Pp. 622–627. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.02.012

Поступила в редакцию 4 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 23 июля 2025 г.

Одобрена для публикации 23 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Хамза Абдулмалек Кайс** — преподаватель-исследователь; **Университет Саны**; 13064, г. Сана, Йеменская Республика; SPIN-код: 9386-8763, РИНЦ ID: 868818, ORCID: 0009-0000-2805-7760; hamza.qais@mail.ru;

Нина Николаевна Морозова — кандидат технических наук, доцент; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0002-7867-4203; ninamor@mail.ru.

Вклад авторов:

Кайс Х.А. — концепция исследования, написание статьи, сбор материала, обработка материала.

Морозова Н.Н. — научное руководство, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Shakhov S.A. Effect of mechanoacoustic activation of wollastonite on the structure and strength of cement stone. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 4(70):8-18. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.1. EDN BKAWQL. (rus.).

2. Smirnov D.S., Mavliev L.F., Khuziakhmetova K.R., Motygullin I.R. Effect of mineral additive based on ground blast furnace slag on the properties of concrete and concrete mixtures. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022; 4(62):61-69. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_61. EDN KQDLZR. (rus.).

3. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Stroganov V.F. Design of road pavements with layers of soil-cement modified with organosilicon. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 1(67):207-216. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.20. EDN ZABBNC. (rus.).

4. Morozova N.N., Gulyakov E.G. Properties of concrete based on zeolite-containing binder. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 2(64):27-39. DOI: 10.52409/20731523_2023_2_27. EDN LCQWVC. (rus.).

5. Gizzatullin A.R., Morozova N.N., Nesterova K.O. Functionalized fillers for use in cement con-

cretes. *Polymers in Construction: Scientific Online Journal*. 2023; 1(11):47-57. EDN CBGPNV. (rus.).

6. Khozin V.G. Prospects for the development of the building materials industry in the light of the use of secondary resources. *Polymers in Construction: Scientific Online Journal*. 2023; 1(11):22-29. EDN NEVNVV. (rus.).

7. Morozova N.N., Zakirov K.I. Comparative effectiveness of setting retarders of gypsum cement-pozzolan concrete for 3D printing. Solutions to modern problems of materials science and technology in construction. *VladStroyTech 2024 : Proceedings of the 1st International Conference of Young Scientists*. 2024; 143-149. EDN OTOCPD. (rus.).

8. Rakhimov R.Z., Mukhametrakhimov R.K., Ziganshina L.V. Improving additive manufacturing for housing construction. *Housing Construction*. 2024; 8:11-19. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-8-11-19. EDN IUNORV. (rus.).

9. Mukhametrakhimov R.Kh. Influence of plasticizing additives based on surface-active sodium salt on the properties of concrete used in 3D printing technology. *Polymers in Construction: Scientific Online Journal*. 2022; 1(10):47-61. EDN ZIMNSF. (rus.).

10. Ferronskaya A.V. *Durability of structures made of concrete and reinforced concrete : tutorial*. Moscow,

ASV Publishing House, 2006; 335. EDN QNMOKT. (rus.).

11. Deschner F., Winnefeld F., Lothenbach B., Seufert S., Schwesig P., Ditttrich S. et al. Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(10): 1389-1400. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.06.009

12. Liu X., Niu D., Li X., Lv Y., Fu Q. Pore Solution pH for the Corrosion Initiation of Rebars Embedded in Concrete under a Long-Term Natural Carbonation Reaction. *Applied Sciences*. 2018; 8(1):128. DOI: 10.3390/app8010128

13. Izotov V.S. Protective properties of concrete in relation to steel reinforcement as a function of the structure of the cement composite. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2006; 1(5):23-27. EDN KBBJUN. (rus.).

14. Hsu T., Slate F., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve. *ACI Journal Proceedings*. 1963; 60(2). DOI: 10.14359/7852

15. Stepanova V.F., Spivak N.A., Koroleva E.N. Effect of the degree of corrosion damage in reinforcing bars on composite action with concrete. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2024; 1(40):105-116. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-1(40)-105-116. EDN ORPAWU. (rus.).

16. Klimenko V.G., Volodchenko A.N. Kinetics of hydration and hydrolysis of various forms of calcium sulfate. Modern problems of construction materials science : Proceedings of the Int. scientific and technical

conference. *Fourth academic readings of RAASN*. 1998; 53-54. (rus.).

17. Aung K.N., Potapova E.N. Influence of the type of pozzolan additive on the composition and properties of gypsum-cement-pozzolan binder. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2022; 36(3):(252):7-9. EDN BXMIEA. (rus.).

18. Khaliullin M.I., Gilmanshina A.I. *Influence of the type and mechanical activation of mineral fillers on the properties of composite gypsum binders*. Moscow, Publishing House of MISI – MGSU, 2021; 148-155. (rus.).

19. Qais H.A., Morozova N.N. On the possibility of manufacturing construction products based on gypsum-cement-pozzolan binder in the republic of Yemen. Solutions to modern problems of materials science and technology in construction. *VladStroyTech 2024 : Proceedings of the 1st International Conference of Young Scientists*. 2024; 238-243. EDN ALTVDG. (rus.).

20. Tashima M.M., Soriano L., Monzó J., Borrachero M.V., Akasaki J.L., Payá J. New method to assess the pozzolanic reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime:pozzolan suspensions. *Materiales de Construcción*. 2014; 64(316):e032. DOI: 10.3989/mc.2014.00914

21. Sinthaworn S., Nimityongskul P. Effects of temperature and alkaline solution on electrical conductivity measurements of pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2011; 33(5):622-627. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.02.012

Received March 4, 2025.

Adopted in revised form on July 23, 2025.

Approved for publication on July 23, 2025.

B I O N O T E S : **Hamza A. Qais** — teacher-researcher; **Sana'a University**; Sana'a, 13064, Republic of Yemen; SPIN-code: 9386-8763, ID RSCI: 868818, ORCID: 0009-0000-2805-7760; hamza.qais@mail.ru;

Nina N. Morozova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7867-4203; ninamor@mail.ru.

Contribution of the authors:

Hamza A. Qais — concept of research, article writing, research, illustrations.

Nina N. Morozova — scientific management, scientific text editing.

Authors report about the absence of conflict of interests.