

**Строительные растворы на вяжущих щелочной активации
М.Ш. Саламанова^{1,2}, З.Х. Исмаилова^{1,2}, С.Х. Ибрагимов^{1,2}**

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова,

¹364051, г. Грозный, пр. Исаева, 100, Россия,

²Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук,

²364051, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21, Россия

Резюме. Цель. Комплексные исследования древних бетонов установили присутствие в них цеолитоподобных минералов, являющихся аналогами существующих в природе соединений, содержащих в своем составе щелочи. В работе приводятся разработки направленные на получение соединений, подобных существующим минералам земной коры, и наталкивают исследователей на развитие вяжущих систем щелочного затворения, для использования наилучших результатов в ходе ремонтно-реставрационных работ исторических объектов архитектуры. В ходе проведения эксперимента исследовались такие важные для ремонтных составов свойства как плотность, пластичность, адгезия, жизнеспособность и прочность. **Метод.** Исследования проводились согласно нормативным документам ГОСТ 12730.3–2020 Бетоны. Методы определения водопоглощения; ГОСТ 5802–86 Растворы строительные. Методы испытаний; ГОСТ 31356–2013 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний. **Результат.** Полученные результаты соответствуют по своим техническим характеристикам продукции на портландцементе; достигнуты марки раствора по прочности М75–150, по подвижности Пк1 и Пк2, жизнеспособность достаточная для проведения ремонтных и штукатурных работ 33 минут – 1,5 часа, высокая адгезионная прочность 0,62–0,72 МПа. **Вывод.** Составы растворных смесей позволят качественно выполнять разнovidный фронт работ: ремонтных, штукатурных, отделочных. Стабильные свойства компонентов, строгое соблюдение составов и технологии изготовления смесей позволят в дальнейшем синтезировать природоподобные и прочные минералы в структуре качественного и долговечного материала.

Ключевые слова: строительный раствор, щелочной активатор, сроки схватывания, термообработка, адгезия, заполнитель, опока

Для цитирования: М.Ш. Саламанова, З.Х. Исмаилова, С.Х. Ибрагимов. Строительные растворы на вяжущих щелочной активации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(2):223-231. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-223-231

Building Solutions with Alkaline activate Binders

M.Sh. Salamanova^{1,2}, Z.Kh. Ismailova^{1,2}, S.Kh. Ibragimov^{1,2}

¹M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

¹100 Kh. Isaev Ave., Grozny 364051, Russia,

²Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,

²21 Staropromyslovskoe Highway, Grozny 364051, Russia

Abstract. Objective. Comprehensive studies of ancient concretes have established the presence in them of zeolite-like minerals, which are analogues of naturally occurring compounds containing alkalis. The work presents development of research aimed at obtaining compounds

similar to existing minerals of the earth's crust, and encourages researchers to develop alkali binder systems to use the best results during repair and restoration work of historical architectural objects. During the experiment, such important properties for repair compositions as density, ductility, adhesion, viability and strength were studied. **Method.** The studies were carried out in accordance with regulatory documents GOST 12730.3–2020 Concrete. Methods for determining water absorption; GOST 5802–86 Construction mortars. Test methods; GOST 31356–2013 Dry building mixtures based on cement binder. Test methods. **Result.** The results obtained correspond in their technical characteristics to products based on Portland cement, the mortar grades were achieved in terms of strength M75–150, in terms of mobility Pk1 and Pk2, viability sufficient for carrying out repair and plastering work 33 minutes – 1.5 hours, high adhesive strength 0.62–0.72 MPa. **Conclusion.** The compositions of mortar mixtures will allow high-quality performance of a variety of work: repair, plastering, finishing. The stable properties of the components, strict adherence to the compositions and production technology of mixtures will make it possible in the future to synthesize nature-like and durable minerals in the structure of a high-quality and durable material.

Keywords: mortar, alkaline activator, setting time, heat treatment, adhesion, filler, flask

For citation: M.Sh. Salamanova, Z. Kh. Ismailova, S.Kh. Ibragimov. Building Solutions with Alkaline activate Binders. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51 (2): 223-231. DOI: 10.21822 /2073-6185-2024-51-2-223-231

Введение. Древнейшие бетонные строения Италии, Греции, Кипра, Мексики и др. существуют уже более 2000 лет и являются ярким примером превосходства инженерного искусства, ведь не смотря на воздействие атмосферных и климатических факторов и временных нагрузок, продолжают сохранять эксплуатационные характеристики. Но современные составы на портландцементе, применяемые для ремонта этих памятников архитектуры, не выдерживают целостности и на продолжительности 10–15 лет. Возникает дилемма, в чем кроется причина столь феноменальной прочности и устойчивости во времени античного строительства [1–3, 5]?

Постановка задачи. Технология традиционного портландцемента основана на химическом взаимодействии в условиях высоких температур двух-, трехвалентных металлов и оксида кремния, с образованием в итоге клинкерных минералов: трехкальциевого и двухкальциевого силиката, трехкальциевого алюмината и четырехкальциевого алюмоферрита. Синтез описанных минералов сопровождается огромными энерго- и ресурсозатратами, к тому же в результате получения 1 тонны клинкера, в атмосферу выделяется примерно такое же количество углекислоты. Продуктами гидратации клинкерных минералов являются гидраты силикатов, алюминатов и алюмоферритов кальция [4, 5].

Комплексные исследования римских бетонов [6–10,15,17] установили присутствие в них цеолитподобных минералов, являющихся аналогами существующих в природе соединений, содержащих в своем составе щелочи.

Образованию цеолитовых фаз $M^{n+}_{x/n}[(AlO_2)_x(SiO_2)]_zH_2O$ переменного состава содействуют химические реакции щелочных Na_2O , K_2O , щелочно-земельных CaO , MgO и кислотных оксидов SiO_2 , Fe_2O_3 и Al_2O_3 . Усилия, направленные на получение соединений, подобных существующим минералам земной коры, и наталкивают исследователей на развитие вяжущих систем щелочного затворения [11, 12, 14].

Методы исследования. С этой целью были проведены научные работы по разработке строительных композитов на основе вяжущих комбинаций, активированных щелочным раствором, в основу которых положены принципы получения «классического» шлакощелочного бетона [13, 16, 18]. Высокий водородный показатель pH среды способствует протеканию одновременных реакций геополимеризации и гидратации в щелочной системе. Механизм геополимеризации можно описать следующими переходами:

- щелочная реакция приводит к деструкции аморфных и кристаллических Si–O–Al–O–Si алюмокремнийкислородных цепочек;
- деполимеризация алюмосиликатов с общими связями, происходит встраивание тетраэдров AlO_4 между тетраэдрами SiO_4 ;
- поликонденсация – коагулирование щелочных алюмокремнезольей;
- образование алюмосиликатного гидрогеля трехмерной геополимерной структуры с повторяющимися атомами кремния и алюминия и заземлением катионов щелочных металлов (рис.1).

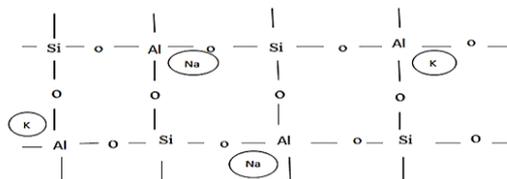


Рис. 1. Структура трехмерного геополимера
Fig. 1. Structure of a three-dimensional geopolymer

В развитие бесклинкерной технологии получения растворов был проведен большой фронт исследований по созданию и изучению свойств геополимерных вяжущих и строительных композитов на их основе, для использования наилучших результатов в ходе ремонтно-реставрационных работ исторических объектов архитектуры.

В качестве компонентов вяжущих связок «минеральный порошок – щелочной раствор» использовались отходы цементной промышленности в виде аспирационной и клинкерной пыли ($S_{уд} = 280 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $230 \text{ м}^2/\text{кг}$ соответственно), термообработанная при температуре 700°C опока, продукт 20 минутного тонкого измельчения вулканического туфа ($S_{уд} = 534 \text{ м}^2/\text{кг}$) и щелочной раствор из смеси натриевого жидкого стекла ($n = 2,8$; $\rho = 1420 \text{ кг}/\text{м}^3$) и гидроксида натрия ($\rho = 1250 \text{ кг}/\text{м}^3$), в соотношении 80 : 20%. В качестве мелкого заполнителя применяли некондиционные барханные пески Шелковского месторождения и кварцевые пески Червленского карьера. Результаты исследований основных свойств и зернового состава представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные показатели песков
Table 1. Basic indicators of sands

Кварцевый песок Quartz sand						
Наименование показателя Indicator name	Значение показателя Indicator value					
Размер сит, мм Size	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16
Частные остатки, % Private balances	1,5	4,5	15,4	44,6	32,2	1,8
Полные остатки, % Full balances	1,5	6,0	21,4	66,0	98,2	
Модуль крупности Size module	1,9 (мелкий/small)					
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % Content of dust and clay particles	1,92					
Истинная плотность зерен, $\text{кг}/\text{м}^3$ True grain density	2622					
Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ Bulk density	1530					
Пустотность песка, % Sand voidness	41,3					
Барханный песок Dune sand						
Размер сит, мм Size	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16
Частные остатки, % Private balances	–	3,5	2,7	3,1	31,7	59
Полные остатки, % Full balances	–	3,5	6,2	9,3	41,0	
Модуль крупности Size module	0,6 (тонкий/ thin)					
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % Content of dust and clay particles	5,3					
Истинная плотность зерен, $\text{кг}/\text{м}^3$ True grain density	2652					
Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ Bulk density	1391					
Пустотность песка, % Sand voidness	48,1					

Гранулометрия, округлый рельеф поверхности зерен песка и присутствие, превышающих по всем нормам, пылевидных, глинистых и илистых частиц относят барханные пески к разряду некондиционных, не пригодных в технологии бетона на традиционном портландцементе. В поисках применения этому многотоннажному сырью предприняты попытки получения строительных растворов, так как по известным данным установлено, что алюмосиликатная природа глинистых примесей (5,3%) будет способствовать процессам геообразования и формирования структуры, приросту прочности щелочного цементного камня.

В ходе проведения эксперимента исследовались такие важные для ремонтных составов свойства как плотность, пластичность, адгезия, жизнеспособность и прочность. Были разработаны составы растворов на вяжущих связках щелочной активации в соотношении компонентов 1:1; 1:2 и 1:3. Экспериментальным путем были установлены оптимальные дозировка вяжущей связки (табл. 2).

Таблица 2. Составы и свойства растворной смеси
Table 2. Compositions and properties of the mortar mixture

№ состава Composition N.	Состав вяжущее:заполнитель Binder composition: filler	Расход компонентов растворной смеси, кг/м ³ Consumption of mortar mixture components								Характеристики растворной смеси Characteristics of the mortar mixture		
		Вулканический туф Volcanic tuff	Аспирационная пыль Aspiration dust	Клинкерная пыль Clinker dust	Опока 700 °С Molding 700 °C	Червленский песок Chervlensky sand	Барханный песок Dune sand	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Плотность растворной смеси, кг/м ³ Density of mortar mixture, kg/m ³	Глубина погружения конуса, см Cone immersion depth	Сохраняемость, мин. Storability, min.
1.	1:1	70	494	105	-	1045	-	272	68	2093	7	33
2.		71	498	105	-	-	1020	248	62	2044	8	35
3.		71	-	105	498	1040	-	280	70	2112	4	25
4.		71	-	105	502	-	1040	244	61	2064	5	28
5.	1:2	38	285	57	-	1360	-	248	62	2059	6	64
6.		38	290	57	-	-	1333	224	56	2006	7	62
7.		43	-	64	324	1383	-	208	52	2084	4	47
8.		43	-	64	326	-	1350	192	48	2030	5	45
9.	1:3	17	127	25	-	1490	-	264	66	1998	4	122
10.		17	133	25	-	-	1470	256	64	1974	5	120
11.		18	-	27	139	1540	-	264	66	2064	3	113
12.		17	-	27	136	-	1510	264	66	2025	4	109

В цементных композициях «аспирационная пыль – клинкерная пыль – вулканический туф – Na₂SiO₃ – NaOH» и «термообработанная опока – клинкерная пыль – вулканический туф – Na₂SiO₃ – NaOH» все компоненты являются продуктами теплового воздействия и обладают определенной аморфной субстанцией. Добавление в цементную композицию минерального порошка вулканического туфа более высокой удельной поверхности

($S_{уд} = 534 \text{ м}^2/\text{кг}$) в количестве 10 % позволило увеличить сроки схватывания щелочного цементного теста, снизить наличие открытой пористости, плюс доля пуццолановой составляющей все в комплексе благоприятно отразится на процессах структурообразования.

Использование в составах растворов барханного песка, богатого наличием глинистых и пылевидных фракций, хорошо отразилось на подвижности смеси, глубина погружения конуса выше на один показатель; сохраняемость формовочной массы вела себя неоднозначно, и в зависимости от увеличения содержания заполнителя незначительно, но уменьшалась. Также следует отметить, что растворная смесь трудно отлипала от инструмента. Особенно это было ощутимо в составах 1:1, в которых преобладало присутствие активной вяжущей составляющей. Из полученных растворных смесей были изготовлены образцы кубики размером 7 см, которые после распалубки твердели в нормальных условиях в течении 28 суток. Результаты испытаний приведены в табл. 3. Серии образцов подвергались исследованию на водопоглощение, по методике ГОСТ 12730.3 – 2020 Бетоны. Методы определения водопоглощения. Наилучшие показатели водопоглощения по массе достигли образцы составов 1:2 и составили 2,6 – 3,3 %. В целом этот показатель не существенно отличается от растворов на традиционном портландцементе. По нему можно судить, что структура камня достаточно плотная, присутствие открытых пор незначительно, что положительно отразится на прочностных показателях (ГОСТ 5802–86 Растворы строительные. Методы испытаний), именно образцы состава 1:2 характеризуются максимальными значениями прочности на сжатие 13,4 – 15,1 МПа.

Таблица 3. Свойства строительных растворов
Table 3. Properties of mortars

№ состава Composition	Плотность раствора, кг/м ³ Density of the solution	Водопоглощение, Water absorption %	Прочность на сжатие, 28 сут. МПа, при $t = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ Compressive strength, 28 days MPa, at $t = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	Адгезионная прочность, МПа на 28 суток Adhesive strength, MPa at 28 days	
				Бетонная основа Concrete the basis	Кирпичная основа Brick the basis
1.	2024	3,1	14,6	0,641	0,686
2.	1975	3,5	12,3	0,632	0,670
3.	2042	3,3	14,8	0,626	0,631
4.	1994	3,6	12,4	0,601	0,611
5.	1990	2,7	14,0	0,708	0,627
6.	1938	3,0	13,4	0,698	0,619
7.	2015	2,6	15,1	0,723	0,716
8.	1960	3,3	13,6	0,695	0,691
9.	1927	7,6	9,3	0,630	0,634
10.	1902	7,8	8,2	0,625	0,629
11.	1996	7,9	8,8	0,628	0,636
12.	1995	7,9	8,0	0,624	0,630

Примечание: растворы состав В : З = активный порошок – клинкерная пыль – вулканический туф – Na_2SiO_3 – NaOH : наполнитель

Note: solutions composition B: W = active powder – clinker dust – volcanic tuff – Na_2SiO_3 – NaOH : filler

Обсуждение результатов. Адгезия растворной смеси и раствора к различной поверхности является важной технической характеристикой и определяется

по показателю силы отрыва адгезива от основания. Для проведения исследования были подготовлены бетонное и кирпичное основания, на которые равномерно наносились разработанные составы толщиной 1 см, после истечения 28 суток проводили испытания согласно ГОСТ 31356–2013 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний (рис. 2).



Рис. 2. Фрагмент испытаний на адгезионную прочность
Fig. 2. Fragment of adhesion strength tests

Результаты исследований установили смешанный характер отрыва адгезива.

Известно [15, 18–20], что вяжущие связки на жидком стекле интенсивно набирают прочность в процессе взаимодействия с углекислотой воздуха, поэтому поверхностные слои раствора захватили при разрыве часть основания, независимо бетона или кирпича, следовательно, контактная прочность и раствора выше прочности поверхности стенда.

По внутренней части раствора (рис. 2) видно, что, отрыв произошел по раствору, следовательно, контактная прочность и основания выше прочности массива строительного раствора. Анализируя полученные результаты адгезионной прочности, можно сделать вывод, что наилучшие показатели показали образы растворных составов 1:2 на вяжущей связке «термообработанная опока – клинкерная пыль – вулканический туф – Na_2SiO_3 – NaOH »; использование чистого кварцевого песка в роли заполнителя привело к повышению прочности на отрыв 0,716–0,723 МПа; барханный песок снизил на 5–6 % адгезионную прочность раствора 0,691–0,695 МПа. Вяжущие связки с использованием термоактивированной при температуре 700 °С опоки показали сравнительно с аспирационной пылью высокие результаты. Микроструктура порошка активированной опоки для обоснования результатов исследовалась РЭМ VEGA II LMU. Результаты электронно-зондового микроанализа представлены на рис. 3 и в табл. 4.

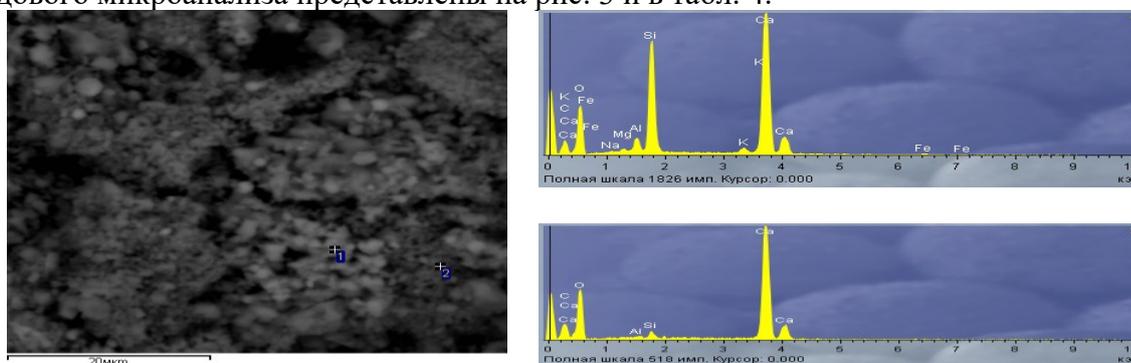


Рис. 3. Участки разного состава и их энергетические спектры
Fig. 3. Areas of different composition and their energy spectra

Таблица 4. Результаты анализа типичных микрофаз (участки анализа указаны на рис. 3.)
Table 4. Results of analysis of typical microphases (analysis areas are shown in Fig. 3.)

Спектр/range	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	Итого Bottom line
1	0,06	0,25	3,17	30,11	61,27	0,24	95,10
2	-	-	0,32	4,64	69,63	-	74,59

Судя по анализу участков, в составе опоки, подвергнутой тепловому воздействию при температуре 700 °С присутствуют гидраты кальциевых силикатов β модификация Ca₂SiO₄ и портландит Ca(OH)₂, что обуславливает сравнительно высокие показатели контактной прочности растворов на цементной композиции «термообработанная опока – клинкерная пыль – вулканический туф – Na₂SiO₃ – NaOH».

В результате химического взаимодействия компонентов вяжущей системы происходит формирование ключевых структурообразующих фаз типа кальцит, портландит, мусковит, кварц, альбит, ортоклаз и цеолитов близких по составу к гаррониту, анальциму, жисмондиту, гаррониту и парагониту, подтверждение чему результаты рентгенофазового анализа (рис. 4).

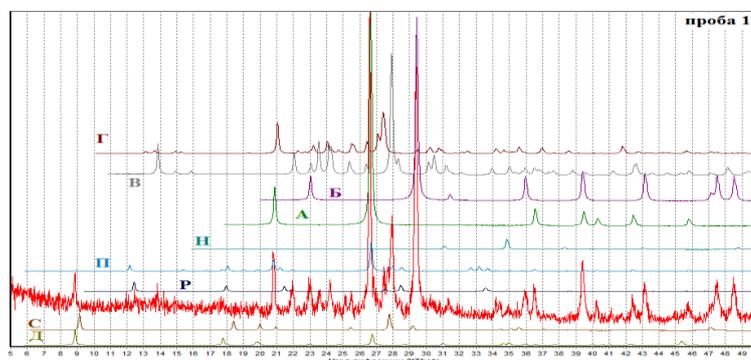


Рис. 4. Дифрактограмма образца раствора состава 1:2 на связке «термообработанная опока – клинкерная пыль – вулканический туф – Na₂SiO₃ – NaOH» А – кварц, Б – кальцит, В – альбит, Г – калиевый полевой шпат, Д – мусковит, Н – анальцим, П – жисмондит, Р – гарронит, С – парагонит

Fig. 4. X-ray diffraction pattern of a sample of a solution of composition 1:2 on a bond of “heat-treated flask – clinker dust – volcanic tuff – Na₂SiO₃ – NaOH” А – quartz, В – calcite, С – albite, D – potassium feldspar, D – muscovite, N – analcime, P – gismondite, P – garronite, C – paragonite

Вывод. Таким образом, следует отметить, что получены рецептуры строительных растворов на вяжущих связках «аспирационная пыль – клинкерная пыль – вулканический туф – Na₂SiO₃ – NaOH» и «термообработанная опока – клинкерная пыль – вулканический туф – Na₂SiO₃ – NaOH», в которых в качестве мелкого заполнителя используют местный материал, кварцевые пески и некондиционные тонкие барханские пески.

Полученные результаты соответствуют по своим техническим характеристикам продукции на портландцементе, достигнуты марки раствора по прочности М75 – 150, по подвижности П_{к1} и П_{к2}, жизнеспособность достаточная для проведения ремонтных и штукатурных работ 33 минут – 1,5 часа, высокая адгезионная прочность 0,62–0,70 МПа.

Составы растворных смесей позволят качественно выполнять разнородный фронт работ: ремонтных, штукатурных, отделочных. Стабильные свойства компонентов, строгое соблюдение составов и технологии изготовления смесей позволит в дальнейшем синтезировать природоподобные и прочные минералы в структуре качественного и долговечного материала.

Библиографический список:

1. Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2014. № 2. Pp. 16 – 27. DOI: 10.4236/msce.2014.27002.
2. Мургазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. 2020. № 1-2. С.73-77.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77>

3. Chen L., Wang Z., Wang Y. and Feng J. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer // *Materials*. 2016. Vol. 9. Pp. 767. doi: 10.3390/ma9090767.
4. Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture // *Cement and Concrete Research*. 2016. Pp. 163 – 173. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.04.007.
5. Рахимова Н.Р. Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов // *Строительные материалы*. 2008. №9. С.77 – 80.
6. Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D., Rangan B. On the development of fly ash-based geopolymer concrete // *ACJ Materials Journal*. 2004. Vol.101. Pp. 467– 472.
7. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008.592p.
8. Fadhil Nuruddin M., Demie S., Fareed Ahmed M., Nasir Shafiq Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self- Compacting Geopolymer Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2011. № 75. p. 908–914.
9. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere // *International Journal of Mineral Processing*. 2013. Vol. 216. Pp. 102–107. DOI: 10.1016/j.minpro.2013.06.001.
10. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Pp. 2084 – 2090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052.
11. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Композиционные шлакощелочные вяжущие с минеральными добавками различного типа активности // *Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук*. 2013. № 16. С. 204 – 216.
12. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintshev M.Sh., Bisultanov R.G. Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging // *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. Pp.500 – 503. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914231>
13. Bataev D.K.-S., Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders // *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. Pp. 457 – 460. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914222>
14. Рахимов М.М., Хабибуллина Н.Р., Рахимов Р.З. Механизм отверждения боратных солевых растворов шлакощелочными вяжущими // *Цемент и его применение*. 2016. № 3. С. 96 – 99.
15. Dombrowski K. The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers // *Journal of Materials Science*. Vol. 42. №. 9. 2007. Pp. 3033 – 3043. DOI: 10.1007/s10853-006-0532-7.
16. Pawlasova S., Skvara F. High-Temperature Properties of Geopolymer Materials // *Alkali Activated Materials*. 2008. Pp. 523 – 525.
17. Khater H.M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT // *Advances in Nano Research*. 2015. Vol. 3. №. 4. Pp.225 – 242.
18. Khater H.M., El Nagar A.M., Ezzat M. Optimization of Alkali Activated Grog/Ceramic Wastes Geopolymer Bricks // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37– 46. DOI: 10.15680/IJRSET.2015.0501001.
19. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand // *Int. J. Chem. Sci*. 2016. № 14(Vol.1). Pp. 115 – 126.
20. Amer I., Kohail M., El-Feky M.S., Rashad A. and Khalaf M. A. A Review on Alkali-Activated Slag Concrete. // *Ain Shams Engineering Journal*. 2021;12: 1475-1499.

References:

1. Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2014; 2:16 – 27. DOI: 10.4236/msce.2014.27002.
2. Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R. Possible ways of alternative solutions to problems in the cement industry. *Construction materials*. 2020;1-2:73-77. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77> (In Russ)
3. Chen L., Wang Z., Wang Y. and Feng J. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin- Based Geopolymer. *Materials*. 2016; 9: 767. doi: 10.3390/ma9090767.
4. Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture. *Cement and Concrete Research*. 2016;163–173. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.04.007.

5. Rakhimova H.P. State and promising directions for the development of research and production of composite slag-alkaline binders, mortars and concretes. *Construction materials*. 2008; 9:77 – 80. (In Russ)
6. Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D., Rangan B. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACJ Materials Journal*. 2004;101: 467– 472.
7. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer. 2008;592.
8. Fadhil Nuruddin M., Demie S., Fareed Ahmed M., Nasir Shafiq Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and Microstructure Properties of Self- Compacting Geopolymer Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2011;75: 908–914.
9. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere. *International Journal of Mineral Processing*. 2013; 216: 102 –107. DOI: 10.1016/j.minpro.2013.06.001.
10. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials*. 2010;24:2084 – 2090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052.
11. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Composite slag-alkaline binders with mineral additives of various types of activity. *Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2013;16:204 – 216. (In Russ)
12. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G. Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019;1:500 – 503. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914231>
13. Bataev D.K-S., Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019;1:457 – 460. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914222>
14. Rakhimov M.M., Khabibullina N.R., Rakhimov R.Z. The mechanism of hardening of borate salt solutions with slag-alkaline binders. *Cement and its application*. 2016; 3: 96 – 99. (In Russ)
15. Dombrowski K. The Influence of Calcium Content on the Structure and Thermal Performance of Fly Ash Based Geopolymers. *Journal of Materials Science*. 2007; 42(9):3033 – 3043. DOI: 10.1007/s10853-006-0532-7.
16. Pawlasova S., Skvara F. High-Temperature Properties of Geopolymer Materials. *Alkali Activated Materials*. 2008; 523 – 525.
17. Khater H.M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT. *Advances in Nano Research*. 2015; 3(4):225 – 242.
18. Khater H.M., El Nagar A.M., Ezzat M. Optimization of Alkali Activated Grog/Ceramic Wastes Geopolymer Bricks. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016; 5(1):37– 46. DOI: 10.15680/IJRSET.2015.0501001.
19. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand. *Int. J. Chem. Sci*. 2016;4(1):115 – 126.
20. Amer I., Kohail M., El-Feky M.S., Rashad A. and Khalaf M. A. A Review on Alkali-Activated Slag Concrete. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021;12: 1475-1499.

Сведения об авторах:

Саламанова Мадина Шахидовна, доктор технических наук, доцент, институт строительства, архитектуры и дизайна; madina_salamanova@mail.ru

Исмаилова Зулихан Хасановна, кандидат технических наук, доцент, институт строительства, архитектуры и дизайна; ismailova-z-h@mail.ru

Ибрагимов Сайпудин Хусайнович, старший преподаватель, институт строительства, архитектуры и дизайна; bilto01@mail.ru

Information about authors:

Madina Sh. Salamanova, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Institute of Construction, Architecture and Design; madina_salamanova@mail.ru

Zulikhan Kh. Ismailova, Cand. Sci.(Eng.), Assoc. Prof., Institute of Construction, Architecture and Design; ismailova-z-h@mail.ru

Saipudin Kh. Ibragimov, Senior Lecturer, Institute of Construction, Architecture and Design; mail: bilto01@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 25.01.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 18.02.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 18.02.2024.