

Известия вузов. Строительство. 2022. № 4. С. 14–24.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (4): 14–24.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.54

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-14-24

## **АКТИВИРОВАННЫЕ ЩЕЛОЧАМИ ЦЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ МЕТАКАОЛИНА И ИЗВЕСТНЯКА**

**Наиля Равилевна Рахимова<sup>1</sup>, Алексей Павлович Нефедьев<sup>2</sup>,  
Айзиля Ниязовна Хизбуллина<sup>1</sup>, Алсу Фаритовна Ахметгараева<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
Казань, Россия  
<sup>2</sup>ООО «ТД Синерго», Челябинск, Россия

**Аннотация.** Разработка низкоэмиссионных бесклинкерных вяжущих является одним из перспективных направлений устойчивого развития минеральных вяжущих и материалов на их основе. В настоящей статье представлены результаты исследования рецептурно-технологических параметров – состава вяжущего, способа введения щелочного активатора, режимов твердения на свойства теста и камня, состава продуктов твердения активированного щелочного цемента на основе метаксаолина и известняка. Установлена возможность получения водозатворяемого, воздушного, активированного метасиликатом натрия, вяжущего на основе метаксаолина и известняка. Показана возможность получения низкоэнергетомкого вяжущего с содержанием известняка до 80 % с прочностью при сжатии до 32,2 МПа. Методами рентгенофазового и термического анализов исследован состав продуктов твердения разработанных вяжущих.

**Ключевые слова:** метаксаолин, известняк, вяжущее, свойства, структура

**Для цитирования:** Рахимова Н.Р., Нефедьев А.П., Хизбуллина А.Н., Ахметгараева А.Ф. Активированные щелочами цементы на основе метаксаолина и известняка // Известия вузов. Строительство. 2022. № 4. С. 14–24. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-14-24.

Original article

## **ALKALI-ACTIVATED CEMENTS BASED ON METAKAOLIN AND LIMESTONE**

**Nailia R. Rakhimova<sup>1</sup>, Alexey P. Nefediev<sup>2</sup>, Ayzilya N. Khizbullina<sup>1</sup>,  
Alsu F. Akhmetgaraeva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

<sup>2</sup>ООО “TD Sinergo”, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The development and research of low-emission clinker-free binders is one of the promising trends for the sustainable development of mineral binders and materials based on them. This article presents the results of a study of formulation-technological parameters – the composition of the binder, the method of introducing an alkaline activator,

---

© Рахимова Н.Р., Нефедьев А.П., Хизбуллина А.Н., Ахметгараева А.Ф.,  
2022

the curing conditions on the properties of fresh and hardened pastes, the composition of the reaction products of alkali activated cements based on metakaolin and limestone. The possibility of producing a water-soluble, air, sodium metasilicate activated cement based on metakaolin and limestone has been established. The possibility of producing a low-energy binder with a limestone content of up to 80 % with a compressive strength of up to 32,2 MPa is shown. The composition of the reaction products of the designed cement was studied by the methods of X-ray, thermal, and SEM analysis.

**Keywords:** metakaolin, limestone, astrigent, features, structure

**For citation:** Rakhimova N.R., Nefediev A.P., Khizbullina A.N., Akhmetgaraeva A.F. Alkali-activated cements based on metakaolin and limestone. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (4): 14–24. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-14-24.

**Введение.** Роль глинистых и кальциево-магниевых карбонатных пород в истории минеральных вяжущих и разработке современных их разновидностей, отвечающих возрастающим требованиям устойчивого развития цементной промышленности и строительной отрасли в целом, трудно переоценить. Они являются не только основным сырьем производства извести и портландцементного клинкера, но и все больше находят применение в качестве индивидуальных и бинарных добавок к композиционным и мультикомпозиционным портландцементом, используются в разработках и исследовании бесклинкерных видов вяжущих, в том числе активированных щелочами цементов (АЩЦ) [1–11].

Изучение пригодности глин и кальциево-магниевых карбонатных пород для получения АЩЦ проводится на протяжении всей истории их развития, насчитывающей уже более 80 лет. При этом с развитием теории и технологии АЩЦ меняются представления и расширяются возможности использования этих минеральных ресурсов. В течение многих десятилетий известняк и доломит рассматривались только в качестве наполнителя к АЩЦ на основе доменного шлака, золы и других реакционноспособных алюмосиликатов.

Многочисленными исследованиями [12–14] показано, что введение молотого известняка в состав АЩЦ дает возможность регулировать удобоукладываемость теста, ускоряет реакции структурообразования, удлиняет сроки схватывания, улучшает механические свойства, снижает водопоглощение и усадку камня смешанных АЩЦ. Еще одним преимуществом использования известняка является возможность замены алюмосиликатного компонента до 80 % в составе АЩЦ, что с учетом повсеместной распространенности карбонатных пород, экологичности ввиду возможности использования в исходном состоянии, полифункционального действия на свойства вяжущих, позволяет повышать техническую, экологическую и экономическую эффективность искусственных каменных материалов на основе АЩЦ. Положительное влияние основано на четырех эффектах молотых известняков: наполнителя, зародышеобразователя, разбавителя и химически активной добавки, проявляемых в зависимости от химико-минералогического состава минеральной составляющей АЩЦ, состава и концентрации щелочного компонента, содержания и удельной поверхности известняка [5, 12–14].

Исследования установили, что химическая активность известняка при щелочной активации ранее недооценивалась. В последние годы [15–19] показана возможность получения АЩЦ только на основе молотых кальциево-магниевого карбонатных пород. Однако молотый известняк и доломит проявляют реакционную способность при длительном твердении, высокой концентрации щелочного активатора или давлении. Так, Дж.Л. Ортега-Завалом [15] получен АЩЦ на основе молотого известняка с удельной поверхностью 600 м<sup>2</sup>/кг в качестве минерального компонента и силиката натрия в качестве щелочного активатора при соотношении SiO<sub>2</sub>: Na<sub>2</sub>O 1,0 : 1,5 с прочностью при сжатии 5–25 МПа в возрасте 1 года. Продукты твердения АЩЦ на основе известняка – смесь гелей С-S-H, N-C-S-H, N-S-H, силикагеля и частично прореагировавших частиц карбоната кальция.

В работе [16] АЩЦ с прочностью при сжатии до 5 МПа был получен путем активации молотого доломита раствором 20М NaOH и тепловой обработки при 80 °С в течение 24 ч. Однако, несмотря на низкую реакционную способность известняка, он может быть эффективно использован в сочетании с высокорекреационноспособными алюмосиликатами в смешанных АЩЦ [20–22]. В [20, 21] разработан АЩЦ на основе смеси из 20 % метаксаолина (МК) и 80 % известняка, активированной силикатом натрия (4,7 % в пересчете на Na<sub>2</sub>O), с прочностью при сжатии 52 МПа после термической обработки при 60 °С в течение 24 ч. Благодаря высокому содержанию известняка такой вид АЩЦ характеризуется меньшей потребностью в щелочном активаторе, что в комплексе снижает энергоемкость и стоимость АЩЦ по сравнению с АЩЦ на МК. Однако разработанный авторами АЩЦ затворялся водным раствором силиката натрия, что менее технологично по сравнению с водозатворяемыми вяжущими, а из свойств оценивались только прочность образцов и состав продуктов твердения.

В настоящей статье представлены результаты исследования способа введения и содержания щелочного активатора в виде безводного метасиликата натрия (водного раствора или сухого с последующим затворением водой), содержания известняка, условий твердения на свойства теста и камня АЩЦ на основе МК и известняка.

**Материалы и методы исследований.** Использовались МК (ООО «Синерго») и известняк (Владимирская область). Химический состав исходных материалов, приведенный в табл. 1, определялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии на приборе OPTIMA 4300 DV.

Минеральный состав известняка, %: кальцит – 99, кварц – 1. Удельная поверхность МК и известняка определена на приборе ПСХ-10 и составила 13 000 и 5 800 м<sup>2</sup>/кг соответственно. Зерновой состав исходных материалов установлен с помощью лазерного анализатора частиц Horiba La-950V2 (рис. 1, табл. 2).

Таблица 1. Химический состав исходных материалов, %

Table 1. Chemical composition of the starting materials, %

Материал	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	Другие оксиды	П.п.п
МК	53,2	44,5	2,2	–	–	–	–	–	1,6
Известняк	14,26	2,44	1,11	43,31	0,38	0,51	0,84	–	31,38

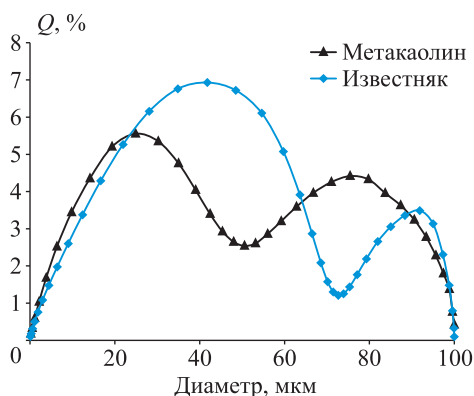


Рис. 1. Распределение частиц по размерам исходных материалов  
 Fig. 1. Particle size distribution of the starting materials

Таблица 2. Зерновой состав исходных материалов

Table 2. Grain composition of raw materials

Материал	d10	d50	d90
МК	7,3	15,2	46,5
Известняк	3,0	9,5	98,0

В качестве щелочного компонента использован 5-водный метасиликат натрия (МН). Щелочной компонент вводился в сухую смесь композиционного вяжущего с последующим затворением водой. Водопотребность и сроки схватывания теста АЩЦ определялись на тесте нормальной

густоты на приборе Вика. Прочность при сжатии образцов установлена испытанием образцов камня размером 2×2×2 см в возрасте 2, 7 и 28 сут нормально-влажностного твердения (НВТ), а также после тепловлажностной обработки (ТВО) по режиму 24+4+12+3 при температуре изотермической выдержки 80 °С. Минеральный состав исходных материалов определялся методами рентгенофазового анализа (РФА) с помощью DIFFRAC plus Evaluation Package – EVAsearch/Match, термогравиметрическим (ТГ-ДТГ) с использованием STA 443 F3 Jupiter simultaneous thermal analysis apparatus. Сканирующая электронная микроскопия выполнена с помощью FEI XL-30ESEM.

**Результаты и обсуждение.** Результаты исследования влияния содержания известняка на свойства теста АЩЦ – нормальную густоту и сроки схватывания представлены на рис. 2. АЩЦ на основе высокодисперсного

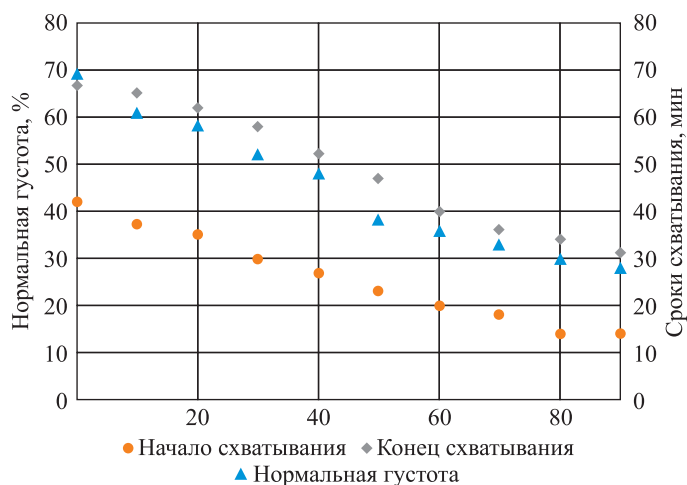


Рис. 2. Влияние содержания известняка на нормальную густоту и сроки схватывания теста АЩЦ

Fig. 2. The effect of limestone content on the normal density and setting time of the dough ASHchTs

метакаолина характеризуется высокой водопотребностью – 69 %. Введение известняка с увеличением его содержания приводит к существенному снижению нормальной густоты – с 69 до 27 % и сокращению сроков схватывания теста АЩЦ, что объясняется низкой химической активностью известняка и увеличением соотношения щелочной активатор/МК, что, в свою очередь, ускоряет активацию реакционноспособной фазы и, как следствие, структурообразование в вяжущей системе. Снижение водопотребности и увеличение соотношения щелочной компонент к МК, как реакционноспособной фазе, способствует и увеличению объема продуктов твердения, что положительно сказывается на прочностных характеристиках камня композиционного АЩЦ. На рис. 3 показаны результаты исследования условий твердения, содержания МН и известняка на прочность при сжатии камня АЩЦ.

Как видно, наибольшие прочностные показатели достигаются при содержании известняка в составе вяжущего 70–80 %, что согласуется с данными [20, 21]. Прочность образцов камня АЩЦ также возрастает с увеличением содержания щелочного активатора и при твердении в условиях ТВО. Более высокие механические показатели образцов АЩЦ после ТВО, вероятно, объясняются тем, что ТВО интенсифицирует реакции взаимодействия алюмосиликатной составляющей композиционного вяжущего со щелочным активатором. В зависимости от содержания МН прочность образцов после ТВО составов составила 21,7–32,2 МПа, тогда как в возрасте 28 сут НВТ – 7,1–10,6 МПа. Молярные соотношения Si/Al и Na/Al реакционноспособных оксидов оптимальных составов АЩЦ, активированных МН в пересчете на Na<sub>2</sub>O 5 %, составили 2,69–3,00 и 0,62–0,93, Na<sub>2</sub>O 10 % – 3,31–3,93 и 1,24–1,86.

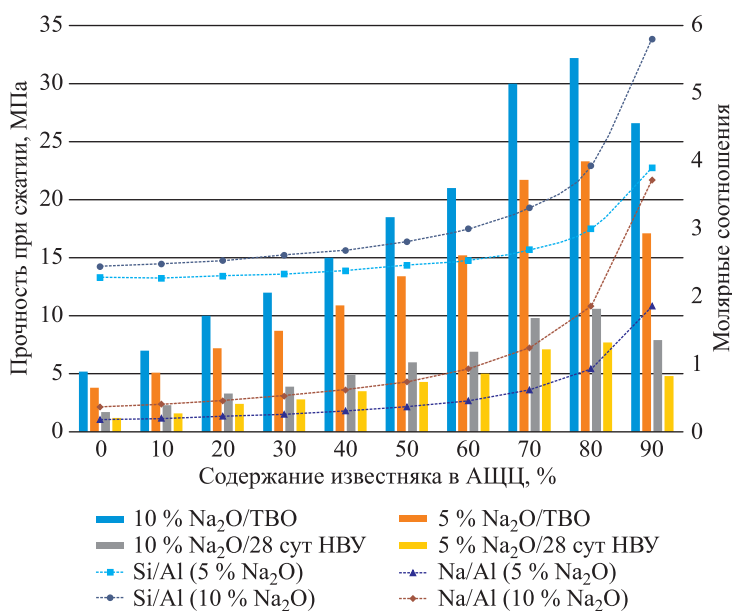


Рис. 3. Влияние содержания известняка на прочность при сжатии камня АЩЦ и молярные соотношения реакционноспособных оксидов

Fig. 3. The effect of limestone content on the compressive strength of the stone AShchTs and molar ratios of reactive oxides

Максимальные прочностные характеристики объясняются и тем, что достигаемые при высоком содержании известняка молярные соотношения реакционноспособных оксидов близки к оптимальным, установленным многочисленными исследованиями, обеспечивают высокую скорость и полноту реакции геополимеризации – преобразования реакционноспособного метакаолина в натриевый алюмосиликатный гидрогель (N-A-S-H) с вяжущими свойствами. Повышение механических свойств при введении известняка связано также с проявлением известняком эффекта наполнителя, состоящего в увеличении плотности упаковки частиц смешанного вяжущего.

При содержании известняка 70–80 % алюмосиликатный гидрогель АЩЦ образуется в объеме, необходимом для создания непрерывной минеральной матрицы с достаточной прочностью, обеспеченной высокой степенью геополимеризации. При увеличении концентрации известняка более 80 % резко снижается количество алюмосиликатного гидрогеля, что приводит к образованию матрицы в объеме, недостаточном для получения непрерывной фазы смешанного вяжущего, увеличению пористости и снижению прочности искусственного камня.

Исследование характера кинетики набора прочности оптимального состава АЩЦ, содержащего 80 % известняка (АЩЦ-80), показало (рис. 4), что в отличие от вяжущих на основе кальциево-силикатного гидрогеля С-S-H, образцы камня на основе N-A-S-H характеризуются быстрым набором прочности в ранние сроки до 2 сут с последующим снижением интенсивности набора прочности.

Изучение водостойкости образцов выявило, что коэффициент размягчения АЩЦ-80 составил 0,3, что позволяет его отнести к воздушным вяжущим.

Результаты РФА, термического анализа и сканирующей электронной микроскопии приведены на рис. 5–7 соответственно. Из представленных данных следует, что на дифрактограмме образца камня АЩЦ-80 присутствует рентгеноаморфное гало в области 2 $\theta$  26 и 29, что, согласно результатам [20, 21], свидетельствует об образовании натрий-алюмосиликатного гидрогеля. Эндотермический пик на термограмме АЩЦ-80 в диапазоне температур 50–175 °С с потерей массы 4,51 %, указывающий на удаление воды, подтверждает присутствие геля в составе продуктов твердения. Эндотермический пик в области 650–820 °С с потерей массы в 17,2 %, вследствие декарбонизации, говорит о присутствии значительного содержания кальция.

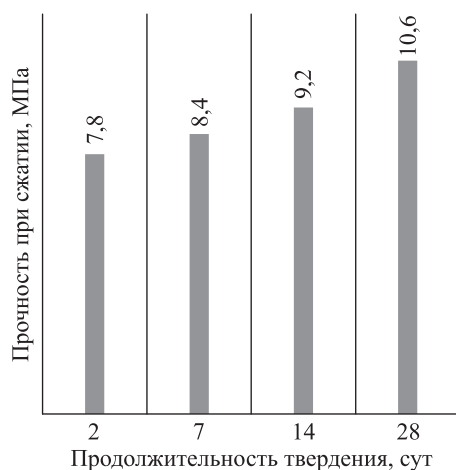


Рис. 4. Кинетика набора прочности образцов камня АЩЦ-80

Fig. 4. Kinetics of the strength set of stone samples ASHchTs-80

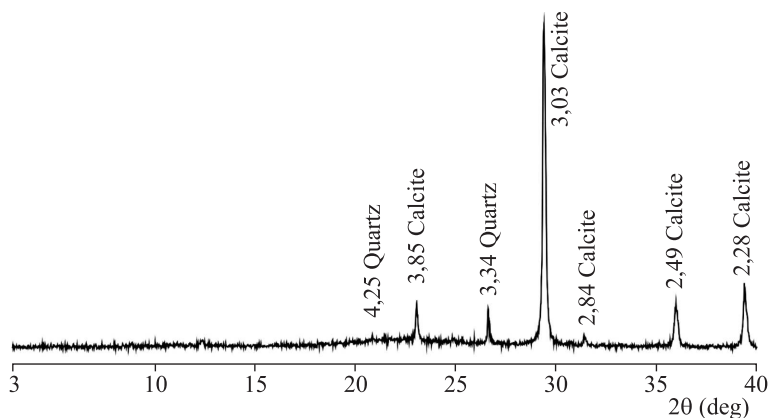


Рис. 5. Рентгенограмма образца камня АЩЦ-80

Fig. 5. Radiograph of the stone sample AShchTs-80

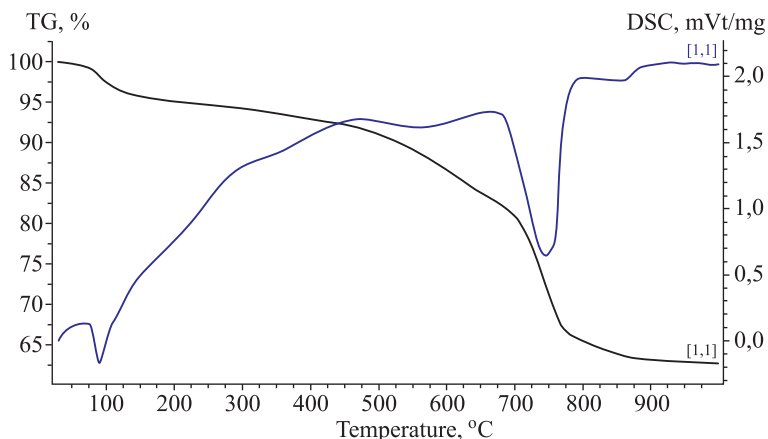


Рис. 6. Термограмма образца камня АЩЦ-80

Fig. 6. Termogram of the stone sample AShchTs-80

Электронная микроскопия образцов камня АЩЦ-80 подтвердила образование гелевидных продуктов реакции, связывающих частицы карбоната кальция. Элементный состав позволил определить состав гелевидных продуктов. Элементный анализ продуктов реакции в системе МК-известняк-МН выявил образование геля состава N-A-S-H, а также замещение натрия кальцием с образованием кальцийзамещенного геля состава (N,C)-A-S-H (см. рис. 6).

**Заключение.** Исследования влияния содержания известняка, способа и концентрации щелочного компонента, условий твердения на свойства теста и камня АЩЦ на основе МК и известняка, состава продуктов твердения показали следующее. Установлена возможность получения водозатворяемого активированного щелочами цемента на основе МК с высоким содержанием (до 80 %) известняка с прочностью при сжатии до 32,2 МПа в зависимости от условий твердения и содержания щелочного активатора.

В разработанном вяжущем МК играет роль реакционноспособной фазы, при активации МН, обеспечивающей образование натрий-алюмосиликатно-

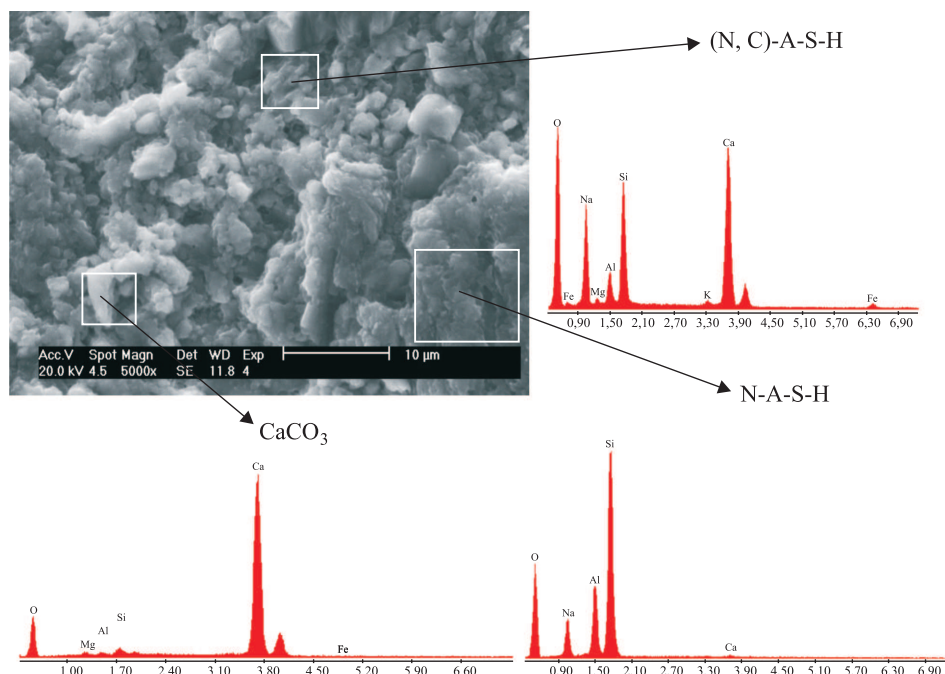


Рис. 7. Результаты сканирующей электронной микроскопии образца камня АЩЦ-80

Fig. 7. Results of scanning electron microscopy of a stone sample AShhTs-80

го гидрогеля с вяжущими свойствами. Известняк, обладая гораздо более низкой по сравнению с МК реакционной способностью, играет роль наполнителя, разбавителя и кристаллизатора твердения. Проявление химической активности известняка состоит в частичном замещении натрия в N-A-S-H кальцием и образовании в результате геля смешанного состава, а именно (N,C)-A-S-H.

Таким образом, главным продуктом реакции, обладающей вяжущими свойствами и прочностью в системе МК-известняк-МН, является смесь гелей N-A-S-H и (N,C)-A-S-H. Прочностные характеристики камня АЩЦ образуются также с участием известняка, способствующего снижению водопотребности, повышению плотности упаковки частиц смешанного вяжущего, формированию геля вяжущего. Кроме того, замещение МК известняком на 70–80 % обеспечивает достижение оптимальных для высокой степени геополимеризации значений молярных соотношений Si/Al и Na/Al. Тем не менее, при указанном содержании известняка, водостойкость камня АЩЦ определяется, очевидно, низкой водостойкостью известняка. Поэтому разработанное вяжущее при коэффициенте размягчения 0,3 является воздушным.

#### Список источников

1. Wang D., Shi C., Farzadnia N., Shi Z., Jia H., Ou Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 181. P. 659–672.
2. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi S., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC3) // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. P. 49–56.



3. *Sharma M., Bishnoi S., Martirena F., Scrivener K.* Limestone calcined clay cement and concrete: a state-of-the-art review // *Cement and Concrete Research*. 2021. Vol. 149. P. 106564.
4. *Juenger M.C.G., Snellings R., Bernal S.A.* Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 122. P. 257–273.
5. *Rakhimova N.R.* Calcium and/or magnesium carbonate and carbonate-bearing rocks in the development of alkali-activated cements – A review // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 325. P. 126742.
6. *Khalifa A.Z., Cizer O., Pontikes Y., Heath A., Patureau P., Bernal S.A., Marsh A.T.M.* Advances in alkali-activation of clay minerals // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 132. P. 106050.
7. *Хозин В.Г., Хохряков О.В., Козлов П.В.* Экологический рейтинг «карбонатных» цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе // *Известия КГАСУ*. 2021. № 2. С. 60–66.
8. *Халиуллин М.И., Файзрахманов И.И.* Влияние пластифицирующей добавки на состав композиционного гипсового вяжущего с применением термоактивированной глины // *Известия КГАСУ*. 2019. № 3. С. 190–196.
9. *Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Гайфуллин А.Р., Морозов В.П.* Влияние добавок термоактивированного мергеля на свойства цементного камня // *Известия КГАСУ*. 2017. № 2. С. 228–240.
10. *Рахимова Н.Р., Фахретдинова И.И.* О возрастающей роли кальциево-магниевых карбонатных пород в развитии современных минеральных вяжущих // *Academia. Архитектура и строительство*. 2022. № 2. С. 111–118.
11. *Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Гайфуллин А.Р., Бикмухаметов А.Р., Морозов В.П.* Влияние состава и температуры прокаливания добавок каолиновой и полиминеральной глины в портландцемент на свойства цементного камня // *Известия КГАСУ*. 2019. № 3. С. 172–180.
12. *Zhu X., Kang X., Deng J., Yang K., Jiang S., Yang C.* Chemical and physical effects of high-volume limestone powder on sodium silicate-activated slag cement (AASC) // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 292. P. 123257.
13. *Gao X., Yu Q.L., Brouwers H.J.H.* Properties of alkali activated slag-fly ash blends with limestone addition // *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 59. P. 119–128.
14. *Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z., Naumkina N.I., Khuzin A.F., Osin Y.N.* Influence of limestone content, fineness, and composition on the properties and microstructure of alkali-activated slag cement // *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 72. P. 268–274.
15. *Ortega-Zavala D., Santana-Carrillo J.L., Burciaga-Díaz O., Escalante-García J.I.* An initial study on alkali activated limestone binders // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 120. P. 267–278.
16. *Aizat E.A., Al Bakri A.M.M., Liew Y.M., Heah C.Y.* Chemical composition and strength of dolomite geopolymer composites // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1885, Issue 1. P. 020192.
17. *Yin Q., Wen Z.Y.* Reaction between carbonaceous rocks and water glass // 12<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal Canada, 2007. P. 5.
18. *Cousture A., Gallias J.-L.* Study of a binder based on alkaline activated limestone // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 311. P. 125323.
19. *Lin W., Zhou F., Luo W., You L.* Recycling the waste dolomite powder with excellent consolidation properties: Sample synthesis, mechanical evaluation, and consolidation mechanism analysis // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 290. P. 123198.

20. Perez-Cortes P., Escalante-Garcia J.I. Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakaolin – A comparison of strength, microstructure and sustainability with portland cement and geopolymers // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 273. P. 123118.
21. Perez-Cortes P., Escalante-Garcia J.I. Alkali activated metakaolin with high limestone contents - statistical modeling of strength and environmental and cost analyses // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 106. P. 103450.
22. Coppola B., Palmero P., Montanaro L., Tulliani J.-M. Alkali-activation of marble sludge: Influence of curing conditions and waste glass addition // *Journal of European Ceramic Society*. 2020. Vol. 40, no. 11. P. 3776–3787.

### References

1. Wang D., Shi C., Farzadnia N., Shi Z., Jia H., Ou Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*. 2018; (181): 659–672.
2. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi S., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*. 2018; (114): 49–56.
3. Sharma M., Bishnoi S., Martirena F., Scrivener K. Limestone calcined clay cement and concrete: a state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*. 2021; (149): 106564.
4. Juenger M.C.G., Snellings R., Bernal S.A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*. 2019; (122): 257–273.
5. Rakhimova N.R. Calcium and/or magnesium carbonate and carbonate-bearing rocks in the development of alkali-activated cements – A review. *Construction and Building Materials*. 2022; (325): 126742.
6. Khalifa A.Z., Cizer O., Pontikes Y., Heath A., Patureau P., Bernal S.A., Marsh A.T.M. Advances in alkali-activation of clay minerals. *Cement and Concrete Research*. 2020; (132): 106050.
7. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Kozlov R.V. Ecological rating of "carbonate" cements of low water demand and concretes based on them. *Izvestiya KGASU = KSUAE News*. 2021; (2): 60–66. (In Russ.).
8. Khaliullin M.I., Phayzrakhmanov I.I. Influence of a plasticizing additive on the composition of a composite gypsum binder using thermally activated clay. *Izvestiya KGASU = KSUAE News*. 2019; (3): 190–196. (In Russ.).
9. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Gaifullin A.R., Morozov V.P. Influence of additives of thermally activated marl on the properties of cement stone. *Izvestiya KGASU = KSUAE News*. 2017; (2): 228–240. (In Russ.).
10. Rakhimova N.R., Phakretdimova I.I. On the increasing role of calcium-magnesium carbonate rocks in the development of modern mineral binders. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo = Academia. Architecture and Building Construction*. 2022; (2): 111–118. (In Russ.).
11. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Gaifullin A.R., Bikmukhametov A.R., Morozov V.P. Influence of the composition and calcination temperature of additives of kaolin and polymineral clay to portland cement on the properties of cement stone. *Izvestiya KGASU = KSUAE News*. 2019; (3): 172–180. (In Russ.).
12. Zhu X., Kang X., Deng J., Yang K., Jiang S., Yang C. Chemical and physical effects of high-volume limestone powder on sodium silicate-activated slag cement (AASC). *Construction and Building Materials*. 2021; (292): 123257.
13. Gao X., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Properties of alkali activated slag-fly ash blends with limestone addition. *Cement and Concrete Composites*. 2015; (59): 119–128.

14. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z., Naumkina N.I., Khuzin A.F., Osin Y.N. Influence of limestone content, fineness, and composition on the properties and microstructure of alkali-activated slag cement. *Cement and Concrete Composites*. 2016; (72): 268–274.
15. Ortega-Zavala D., Santana-Carrillo J.L., Burciaga-Díaz O., Escalante-García J.I. An initial study on alkali activated limestone binders. *Cement and Concrete Research*. 2019; (120): 267–278.
16. Aizat E.A., Al Bakri A.M.M., Liew Y.M., Heah C.Y. Chemical composition and strength of dolomite geopolymer composites. *AIP Conference Proceedings*. 2017; 1885(1): 020192.
17. Yin Q., Wen Z.Y. Reaction between carbonaceous rocks and water glass. 12<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal Canada, 2007. P. 5.
18. Cousture A., Gallias J.-L. Study of a binder based on alkaline activated limestone. *Construction and Building Materials*. 2021; (311): 125323.
19. Lin W., Zhou F., Luo W., You L. Recycling the waste dolomite powder with excellent consolidation properties: Sample synthesis, mechanical evaluation, and consolidation mechanism analysis. *Construction and Building Materials*. 2021; (290): 123198.
20. Perez-Cortes P., Escalante-García J.I. Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakaolin – A comparison of strength, microstructure and sustainability with portland cement and geopolymers. *Journal of Cleaner Production*. 2020; (273): 123118.
21. Perez-Cortes P., Escalante-García J.I. Alkali activated metakaolin with high limestone contents – statistical modeling of strength and environmental and cost analyses. *Cement and Concrete Composites*. 2020; (106): 103450.
22. Coppola B., Palmero P., Montanaro L., Tulliani J.-M. Alkali-activation of marble sludge: Influence of curing conditions and waste glass addition. *Journal of European Ceramic Society*. 2020; 40(11): 3776–3787.

#### **Информация об авторах**

**Н.Р. Рахимова** – доктор технических наук, профессор

**А.П. Нефедьев** – директор

**А.Н. Хизбуллина** – студент

**А.Ф. Ахметгараева** – студент

#### **Information about the authors**

**N.R. Rakhimova** – DSc, Professor

**A.P. Nefediev** – Director

**A.N. Khizbullina** – Student

**A.F. Akhmetgaraeva** – Student

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.02.2022  
Одобрена после рецензирования 16.03.2022  
Принята к публикации 23.03.2022

The article was submitted 16.02.2022  
Approved after reviewing 16.03.2022  
Accepted for publication 23.03.2022