

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.00

Научная специальность ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN xhsnaa

DOI 10.62980/2076-0655-2026-485-494

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА НЕЙТРАЛИЗАЦИЮ ЩЕЛОЧНО- КРЕМНЕЗЕМНОЙ РЕАКЦИИ

Абд Алвахед Фирас¹, Кривобородов Ю.Р.¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования, направленного на оценку эффективности минеральных добавок в подавлении щелочно-кремнеземной реакции (ЩКР) в бетоне, являющейся одной из основных причин внутренней деградации и снижения долговечности железобетонных конструкций, эксплуатируемых во влажных условиях. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных технологических решений, обеспечивающих стабильность микроструктуры цементного камня и увеличение срока службы бетонных сооружений, особенно мостов, гидротехнических и инфраструктурных объектов. При приготовлении бетона использовался песок Халактырский (Камчатский край, Россия), содержащий повышенное количество активного кремнезема, способного вступать в реакцию со щелочами цемента, что указывает на высокую вероятность развития щелочно-кремнеземной реакции (ЩКР) при отсутствии корректирующих добавок. Для снижения интенсивности ЩКР исследовалось влияние двух пуццолановых добавок: микрокремнезема (МКУ-85) и органоминерального модификатора МБ2-50С, представляющего собой композицию микрокремнезема и золы-уноса. Испытания проводились по ускоренной методике, регламентированной ГОСТ 8269.0, с измерением относительных линейных деформаций образцов мелкозернистого бетона, выдерживаемых в щелочной среде при температуре (80 ± 2) °С. Результаты показали, что микрокремнезем обладает наибольшим ингибирующим эффектом: при содержании 15 % от массы цемента наблюдалось снижение деформаций ниже предельного уровня (0,1 %) и стабилизация их значений, что позволяет отнести смесь к категории нереакционноспособных. Модификатор МБ2-50С также продемонстрировал способность снижать интенсивность реакции и повышать стабильность поведения бетона во времени, однако его эффективность оказалась ниже по сравнению с микрокремнеземом. При этом увеличение содержания МБ2-50С свыше 15 % может существенно повысить его ингибирующую активность, что делает данную добавку экономически оправданной альтернативой при корректировке дозировки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: щелочно-кремнеземная реакция (ЩКР), микрокремнезем, органоминеральный модификатор, пуццолановые добавки, активный кремнезем, линейные деформации, долговечность бетона.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Абд Алвахед Фирас, Кривобородов Ю.Р. Влияние применения минеральных добавок на нейтрализацию щелочно- кремнеземной реакции // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 485-494. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-485-494>, EDN xhsnaa

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN xhsnaa

DOI 10.62980/2076-0655-2026-485-494

EFFECT OF MINERAL ADDITIVES ON THE NEUTRALIZATION OF THE ALKALI-SILICA REACTION

Abd Alvahed Firas¹, Krivoborodov Yu.R.¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University

ABSTRACT

This paper presents the results of an experimental study aimed at evaluating the effectiveness of mineral admixtures in suppressing the alkali-silica reaction (ASR) in concrete, which is one of the main causes of internal deterioration and reduced durability of reinforced concrete structures operated under humid conditions. The relevance of the study is due to the need to develop effective technological solutions that ensure the stability of the cement paste microstructure and extend the service life of concrete structures, particularly bridges, hydraulic engineering facilities, and infrastructure objects. In the preparation of concrete, Khalaktyrsky sand (Kamchatka Krai, Russia) was used as fine aggregate. This sand contains an increased amount of reactive silica capable of reacting with the alkalis of cement, indicating a high probability of alkali-silica reaction (ASR) development in the absence of corrective admixtures. To reduce the intensity of ASR, the influence of two pozzolanic admixtures was investigated: silica fume (MKU-85) and the organomineral modifier MB2-50S, which represents a composition of silica fume and fly ash. The tests were carried out using an accelerated method regulated by GOST 8269.0, involving measurements of the relative linear expansion of fine-grained concrete specimens stored in an alkaline environment at a temperature of (80 ± 2) °C. The results showed that silica fume exhibited the strongest inhibiting effect: at a dosage of 15% by mass of cement, the measured expansions decreased below the limiting level (0.1%) and stabilized, allowing the mixture to be classified as non-reactive. The MB2-50S modifier also demonstrated the ability to reduce the reaction intensity and improve the long-term stability of concrete behavior; however, its effectiveness was lower compared with silica fume. At the same time, increasing the content of MB2-50S above 15% may significantly enhance its inhibiting activity, making this admixture an economically justified alternative when adjusting the dosage.

KEY WORDS: alkali-silica reaction (ASR), silica fume, organomineral modifier, pozzolanic admixtures, reactive silica, linear expansion, concrete durability.

FOR CITATION: Abd Alvahed Firas, Krivoborodov Yu.R. Effect of mineral additives on the neutralization of the alkali-silica reaction // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 485 – 494. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-485-494>, EDN xhsnaa

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее серьёзных проблем, с которыми сталкивается современное производство бетона, является щелочно-кремнезёмная реакция (ЩКР), возникающая при использовании некоторых видов заполнителей. Данный процесс является одним из ключевых факторов внутренней деградации бетона, приводящей к снижению его прочностных характеристик и долговечности [1-5]. ЩКР была зафиксирована во многих странах с различными климатическими условиями, включая регионы с повышенной влажностью и агрессивной средой [6,7]. Опасность данного процесса заключается в том, что он развивается скрытно, а его последствия становятся заметны только через значительный промежуток времени после ввода сооружения в эксплуатацию.

Реакция инициируется взаимодействием щелочей, содержащихся в цементе (Na_2O и K_2O), с реакционноспособным кремнезёмом, присутствующим в составе заполнителя. В присутствии влаги образуется щелочно-кремнезёмный гель (ASR-gel), который обладает высокой способностью к сорбции воды. В результате этого происходит постепенное набухание геля, что приводит к возникновению внутренних напряжений в цементной матрице. Со временем это вызывает появление сетчатых и картографических трещин, а также снижение прочности и долговечности бетонных конструкций [8-10].

Особенно интенсивно данный процесс протекает во влажных климатических зонах, а также в конструкциях, эксплуатируемых в условиях постоянного увлажнения, например, в мостах, гидротехнических сооружениях, прибрежных платформах, а также на объектах водоподготовки. В таких условиях создаётся оптимальная среда для длительного протекания ЩКР, что приводит к прогрессирующей скрытой деградации материала [11-13].

Так как развитие реакции начинается на микроструктурном уровне, её ранняя диагностика представляет собой значительную сложность. На практике вероятность возникновения ЩКР определяется путём проведения лабораторных испытаний заполнителей до их использования, в том числе с применением стандартных методов, описанных в ASTM C1260⁸, и ГОСТ 8269.0-97⁹, позволяющих оценить потенциальную реакционную способность заполнителя путём измерения линейных деформаций при ускоренных условиях испытаний.

В современных технологиях производства бетона предотвращение ЩКР является важнейшей задачей проектирования долговечных конструкций. Одним из наиболее эффективных способов снижения риска ЩКР считается использование минеральных добавок с пуццолановыми свойствами, способных изменять щелочную среду в порах бетона и снижать доступность кремнезёма для реакции [5, 14-17].

К числу наиболее распространённых пуццолановых материалов, способных снижать интенсивность ЩКР, относятся:

- микрокремнезём;

INTRODUCTION

One of the most serious problems faced by modern concrete production is the alkali-silica reaction (ASR), which occurs when certain types of aggregates are used. This process is one of the key factors of internal concrete deterioration, leading to a reduction in its strength characteristics and durability [1-5]. ASR has been documented in many countries with different climatic conditions, including regions with high humidity and aggressive environments [6,7]. The danger of this process lies in the fact that it develops covertly, and its consequences become noticeable only after a considerable period of time following the commissioning of a structure.

The reaction is initiated by the interaction of alkalis contained in cement (Na_2O and K_2O) with reactive silica present in the aggregate. In the presence of moisture, an alkali-silica gel (ASR gel) is formed, which has a high capacity for water absorption. As a result, the gel gradually swells, leading to the development of internal stresses within the cement matrix. Over time, this results in the formation of network and map cracking, as well as a reduction in the strength and durability of concrete structures [8-10].

This process proceeds particularly intensively in humid climatic zones, as well as in structures operated under conditions of constant moisture exposure, such as bridges, hydraulic engineering structures, coastal platforms, and water treatment facilities. Under such conditions, an optimal environment is created for the long-term development of ASR, which leads to progressive hidden degradation of the material [11-13].

Since the development of the reaction begins at the microstructural level, its early diagnosis is a significant challenge. In practice, the probability of ASR occurrence is determined by conducting laboratory tests of aggregates prior to their use, including the application of standard methods described in ASTM C1260¹ and GOST 8269.0-97², which allow the potential reactivity of aggregates to be assessed by measuring linear expansion under accelerated testing conditions.

In modern concrete technology, the prevention of ASR is one of the key tasks in the design of durable structures. One of the most effective ways to reduce the risk of ASR is the use of mineral admixtures with pozzolanic properties, which are capable of modifying the alkaline environment in the pores of concrete and reducing the availability of silica for the reaction [5,14-17].

Among the most common pozzolanic materials capable of reducing the intensity of alkali-silica reaction (ASR) are:

- silica fume;
- metakaolin;
- fly ash;
- granulated blast furnace slag.

These materials exhibit high pozzolanic activity and are capable of binding calcium hydroxide formed during cement hydration, which leads to a reduction in the concentration of free alkalis and a decrease in the alkalinity of the pore solution. As

⁸ ASTM C1260 – Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). ASTM International.

⁹ ГОСТ 8269.0-97 – Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний

GOST 8269.0-97 – Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Methods of physical and mechanical testing

- метакаолин;
- зола-унос;
- гранулированный доменный шлак;

Эти материалы обладают высокой пуццолановой активностью и способны связывать гидроксид кальция, образующийся при гидратации цемента, что приводит к снижению концентрации свободных щелочей и уменьшению щёлочности порового раствора. В результате создаются менее благоприятные условия для протекания щелочно-кремнезёмной реакции. Кроме того, применение таких добавок способствует уплотнению структуры цементного камня и снижению его проницаемости, что ограничивает доступ влаги — важнейшего фактора протекания ЩКР [14–17].

Целью работы являлось оценить эффективности применения минеральных добавок в подавлении щелочно-кремнезёмной реакции (ЩКР) в бетоне.

Материалы и методы

В данном исследовании использовался цемент ЦЕМ I 42,5 Н, произведённый на заводе «Пролетарий» компании «Новоросцемент» в городе Новороссийске. Это портландцемент типа СЕМ I, характеризующийся суммарным содержанием щелочных оксидов R_2O в клинкере — 0,75 %.

В качестве заполнителя в работе использовался песок пляжа Халактырский, добытый в Камчатском крае. Для оценки его исходных свойств и пригодности к применению в составе бетонных смесей была проведена серия физико-механических испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 8736, направленных на проверку соответствия данного песка нормативным показателям качества заполнителя.

Результаты испытаний:

- насыпная плотность $\rho_n = 1536$ кг/м³;
- содержание пылевидных и глинистых частиц — 0,4 %;
- истинная плотность — 2,75 г/см³;
- органические примеси — отсутствуют;
- глина в комках не обнаружена, при нормативе не более 0,25 % по массе (таблица 4 ГОСТ 8736-93¹⁰).

На основании полученных данных установлено, что песок соответствует требованиям ГОСТ 8736, что позволяет использовать его в качестве заполнителя в бетонных смесях.

Для определения реакционной активности песка были использованы две методики, предусмотренные пунктами 4.22.2 – 4.22.3 ГОСТ 8269.0-97:

- Химический метод — растворение реакционноспособного кремнезёма (SiO_2) в растворе гидроксида натрия с последующим определением его массы;
- Ускоренный метод — измерение относительных деформаций образцов мелкозернистого бетона при выдерживании в щелочной среде.

Согласно результатам анализа, содержание растворимого в щелочи диоксида кремния составило 222,8 ммоль/л, что значительно превышает нормативное значение 50 ммоль/л, установленное в приложении А ГОСТ 8736. Это указывает на высокую потенциальную реакционную способность данного заполнителя и вероятность развития ЩКР при его использовании в составе бетона.

as a result, less favorable conditions are created for the development of the alkali–silica reaction. In addition, the use of such admixtures contributes to the densification of the cement paste structure and reduces its permeability, thereby limiting the ingress of moisture—one of the key factors governing ASR development [14–17].

The aim of this study was to evaluate the effectiveness of mineral admixtures in suppressing the alkali–silica reaction (ASR) in concrete.

Materials and Methods

In this study, CEM I 42.5 N cement, produced at the Proletary plant of the Novoroscement company in Novorossiysk, was used. This is a portland cement of type CEM I, characterized by a total alkali oxide content (R_2O) in the clinker of 0.75%.

As a fine aggregate, Khalaktyrsky beach sand extracted in the Kamchatka Krai was used. To assess its initial properties and suitability for use in concrete mixtures, a series of physical and mechanical tests was carried out in accordance with the requirements of GOST 8736, aimed at verifying compliance with the standard quality indicators for aggregates.

Test results:

- bulk density $\rho_n = 1536$ kg/m³;
- content of dust and clay particles — 0.4%;
- true density — 2.75 g/cm³;
- organic impurities — not detected;
- clay lumps — not detected, with a standard limit of not more than 0.25% by mass (Table 4, GOST 8736-93³).

Based on the obtained data, it was established that the sand complies with the requirements of GOST 8736, which allows it to be used as an aggregate in concrete mixtures.

To determine the reactivity of the sand, two methods specified in clauses 4.22.2–4.22.3 of GOST 8269.0-97 were used:

- Chemical method — dissolution of reactive silica (SiO_2) in a sodium hydroxide solution followed by determination of its mass;
- Accelerated method — measurement of the relative expansion of fine-grained concrete specimens stored in an alkaline environment.

According to the analysis results, the content of alkali-soluble silicon dioxide was 222.8 mmol/L, which significantly exceeds the regulatory value of 50 mmol/L established in Appendix A of GOST 8736. This indicates a high potential reactivity of the aggregate and a high probability of ASR development when it is used in concrete.

In order to reduce the risk of ASR, additional tests were carried out on concrete mixtures with the use of inhibiting mineral admixtures, including:

¹⁰ ГОСТ 8736-93 Песок для строительных работ. Технические условия.
GOST 8736-93 Sand for construction work Specifications.

С целью снижения риска ЩКР были проведены дополнительные испытания бетонных смесей с применением ингибирующих минеральных добавок, включая:

- микрокремнезём МКУ-85 – высокоактивная минеральная добавка с выраженными пуццолановыми свойствами [18];

- органо-минеральный модификатор МБ2-50С [19] в соответствии с ГОСТ Р 56178-2014¹¹ – комплексная добавка на основе микрокремнезёма и золы-уноса, представляющая более экономичную альтернативу чистому микрокремнезёму при сохранении ингибирующих свойств в отношении ЩКР [20].

Изготовление образцов проводилось в соответствии с требованиями п. 4.22.3 ГОСТ 8269.0-97. В таблице 1 представлены составы образцов и основные характеристики мелкозернистого бетона, использованного для ускоренных испытаний.

- silica fume MKU-85 — a highly active mineral admixture with pronounced pozzolanic properties [18];

- organomineral modifier MB2-50S [19], in accordance with GOST R 56178-2014⁴ — a complex admixture based on silica fume and fly ash, representing a more economical alternative to pure silica fume while maintaining inhibitory properties with respect to ASR [20].

Specimen preparation was carried out in accordance with the requirements of clause 4.22.3 of GOST 8269.0-97. Table 1 presents the compositions of the specimens and the main characteristics of the fine-grained concrete used for the accelerated tests.

ТАБЛИЦА 1 СОСТАВЫ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА
Table 1 Composition and main characteristics of fine-grained concrete

№№ составов Composition No.	Состав бетона Concrete composition					В/Ц W/C	Распływ конуса, Cone spread (106-115мм)
	Цемент Cement	МКУ-85 Microsilica	МБ2-50С Organo-mineral supplement	Песок Sand	Вода Water		
1	400	-	-	900	148	0,37	114
2	380	20	-	900	141	0,37	113
3	360	40	-	900	148	0,41	111
4	340	60	-	900	156	0,46	113
5	380	-	20	900	125	0,33	114
6	360	-	40	900	137	0,38	110
7	340	-	60	900	136	0,4	109

Подготовка образцов и проведение ускоренного испытания

После приготовления смесей, представленных в таблице 1, образцы были сформованы и промаркированы с указанием направления «верх – низ». После распалубки образцы помещали в контейнеры с дистиллированной водой таким образом, чтобы уровень воды превышал верхнюю грань образца не менее чем на (20 ± 2) мм. Контейнеры герметично закрывали и помещали в термокамеру при температуре (80 ± 2) °С на протяжении (24 ± 1) ч для проведения предварительной водной обработки.

По завершении этой стадии образцы извлекали, аккуратно удаляли влагу с поверхности влажной салфеткой и измеряли начальную длину при помощи цифрового измерительного прибора с точностью 0,05 мм.

Далее воду в контейнерах заменяли раствором гидроксида натрия концентрации 1 моль/л (приготовленным раствором 40 г NaOH в 900 мл дистиллированной воды с последующим доведением объёма до 1 л), при этом уровень раствора над образцами составлял (20 ± 2) мм. После замены раствора контейнеры вновь плотно закрывали и возвращали в климатическую камеру с постоянной температурой (80 ± 2) °С.

Preparation of Specimens and Accelerated Testing Procedure

After the preparation of the mixtures presented in Table 1, the specimens were molded and labeled with an indication of the «top–bottom» orientation. After demolding, the specimens were placed in containers filled with distilled water so that the water level exceeded the top surface of the specimen by at least (20 ± 2) mm. The containers were hermetically sealed and placed in a thermostatic chamber at a temperature of (80 ± 2) °C for (24 ± 1) h to carry out preliminary water conditioning.

After this stage was completed, the specimens were removed, surface moisture was carefully removed using a damp cloth, and the initial length was measured using a digital measuring device with an accuracy of 0.05 mm.

Subsequently, the water in the containers was replaced with a sodium hydroxide solution with a concentration of 1 mol/L (prepared by dissolving 40 g of NaOH in 900 mL of distilled water followed by dilution to a final volume of 1 L). The solution level above the specimens was maintained at (20 ± 2) mm. After replacing the solution, the containers were tightly sealed again and returned to the climatic chamber maintained at a constant temperature of (80 ± 2) °C.

¹¹ ГОСТ Р 56178-2014 Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей.

Затем проводились ежесуточные измерения линейных деформаций образцов с интервалом $(24 \pm 0,5)$ ч. Испытание продолжалось до получения не менее 11 последовательных измерений в соответствии с порядком и требованиями, установленными ГОСТ 8269.0-97.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались путём построения кривых развития линейных деформаций во времени и расчёта относительного удлинения для каждой исследуемой бетонной смеси. Эти результаты использовались для оценки реакционной активности заполнителя и эффективности минеральных добавок-ингибиторов в снижении интенсивности развития щелочно-кремнезёмной реакции (ЩКР).

В соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 8269.0-97, заполнитель признаётся нереакционноспособным, если относительная линейная деформация образцов, выдержанных в растворе гидроксида натрия, не превышает 0,1 %, а последнее измерение (одиннадцатое) отклоняется не более чем на ± 15 % от среднего значения трёх предыдущих измерений (восьмого, девятого и десятого).

В случае, если значение деформации превышает 0,1 % или разница между последним показанием и средним значением трёх предыдущих составляет более 15 %, заполнитель относится к категории потенциально реакционноспособных.

В таких случаях допустимость его применения в составе бетона должна быть подтверждена дополнительными долговременными испытаниями образцов бетонной смеси в течение одного года с последующим контролем изменения длины и состояния материала.

После завершения всех этапов измерений были получены результаты, которые отображены на графике, показанном на рисунке 1, где продемонстрировано изменение линейных деформаций во времени для каждого исследуемого состава бетона.

Thereafter, daily measurements of the linear expansion of the specimens were performed at intervals of (24 ± 0.5) h. The test continued until at least 11 consecutive measurements were obtained in accordance with the procedure and requirements established by GOST 8269.0-97.

The obtained experimental data were processed by constructing expansion–time curves and calculating the relative expansion for each investigated concrete mixture. These results were used to assess the reactivity of the aggregate and the effectiveness of mineral inhibiting admixtures in reducing the intensity of the alkali–silica reaction (ASR).

In accordance with the requirements of GOST 8269.0-97, an aggregate is considered non-reactive if the relative linear expansion of specimens stored in a sodium hydroxide solution does not exceed 0.1%, and the final measurement (the eleventh) deviates by no more than $\pm 15\%$ from the average value of the three preceding measurements (the eighth, ninth, and tenth).

If the deformation value exceeds 0.1%, or if the difference between the final measurement and the average of the three preceding values exceeds 15%, the aggregate is classified as potentially reactive.

In such cases, the admissibility of its use in concrete must be confirmed by additional long-term tests of concrete specimens conducted over one year, followed by monitoring of changes in specimen length and the condition of the material.

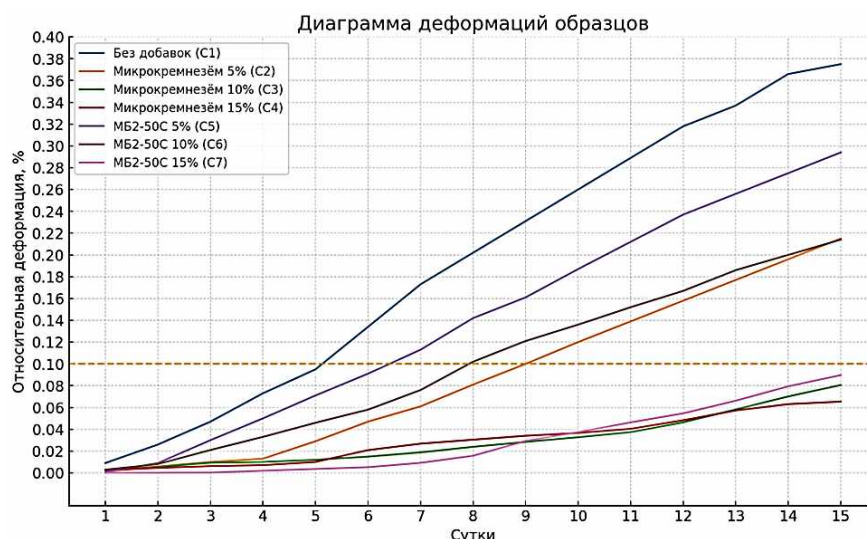
After completing all measurement stages, the results were obtained and are presented in the graph shown in Figure 1, which illustrates the change in linear expansion over time for each investigated concrete composition.

РИСУНОК 1

ЗАВИСИМОСТЬ РАЗВИТИЯ ЛИНЕЙНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИССЛЕДУЕМЫХ СОСТАВОВ БЕТОНА

Figure 1

Dependence of the development of linear deformations over time for the studied concrete compositions



Анализ полученных данных по относительным деформациям образцов свидетельствует о заметной вариативности поведения исследованных составов в зависимости от типа применённой добавки и её доли от массы цемента. В контрольном составе, не содержащем каких-либо минеральных

The analysis of the obtained data on the relative expansion of the specimens indicates significant variability in the behavior of the investigated compositions depending on the type of admixture used and its proportion relative to the mass of cement. In the control mixture, which did

или органоминеральных модификаторов, конечная деформация (КД) достигла 0,375 %, при среднем значении (СД) за 12–14-е сутки на уровне 0,340 % и относительном расхождении в 9,2 %. Несмотря на удовлетворительную стабильность показателей на заключительном этапе, сам уровень деформации существенно превышает нормативный предел, что указывает на выраженную склонность заполнителя к щелочно-кремнезёмной реакции. Такой состав следует признать реакционноспособным.

Во втором составе, содержащем микрокремнезём в количестве 5 % от массы цемента, конечная деформация снизилась до 0,215 %, однако среднее значение за 12–14-е сутки составило 0,177 %, а относительное расхождение достигло 17,7 %, что превышает допустимую величину. Несмотря на некоторое снижение уровня деформаций, показатели остаются выше нормативного предела, а нестабильность в конце наблюдений подтверждает сохраняющуюся активность химического взаимодействия. Следовательно, данный состав также относится к реакционноспособным.

В третьем составе, модифицированном микрокремнезёмом в количестве 10 %, конечное значение деформации составило 0,0806 %, что укладывается в нормативный предел. Однако среднее значение за 12–14-е сутки (0,0582 %) и высокий уровень относительного расхождения (27,8 %) указывают на отсутствие стабилизации процесса на поздней стадии испытаний. Несмотря на снижение интенсивности реакций, развитие деформаций продолжается, что позволяет классифицировать данный состав как потенциально реакционноспособный.

Наиболее благоприятный результат продемонстрирован четвёртым составом, содержащим 15 % микрокремнезёма. Конечная деформация составила 0,0654 %, среднее значение — 0,0562 %, а относительное расхождение — 14,1 %, что находится в пределах допустимых значений. Достигнутая стабильность показателей и низкий уровень деформаций свидетельствуют об эффективном снижении концентрации свободных щелочей и о формировании более плотной структуры цементного камня. Этот состав можно отнести к категории неактивных по отношению к щелочам.

Гистограмма конечных деформаций и их средних значений за 12–14-е сутки образцов выдержанных в растворе гидроксида натрия в зависимости от микрокремнезёма и его доли от массы цемента представлены на рис. 2. Уровень деформации и его нормативный предел для образцов содержащих микрокремнезём представлен на рис. 3.

Таким образом, увеличивая в составе мелкозернистого бетона содержание микрокремнезёма до 15 % можно добиться снижения реакционной способности цементного камня.

В пятом составе, содержащем органоминеральный модификатор МБ2-50С в количестве 5 %, конечная деформация достигла 0,294 %, при среднем значении 0,256 % и относительном расхождении 12,9 %. Несмотря на удовлетворительную стабильность заключительных измерений, уровень деформаций остаётся значительно выше нормативного, что указывает на недостаточную эффективность добавки при таком содержании, т.е. состав является реакционноспособным.

В шестом составе количество МБ2-50С увеличено до 10 %, что привело к частичному снижению деформаций, однако конечное значение 0,214 % и среднее за 12–14-е сутки 0,184 %, при относительном расхождении 14 %, по-прежнему свидетельствуют о превышении нормативного

not contain any mineral or organomineral modifiers, the final expansion (FE) reached 0.375%, with an average value (AE) for days 12–14 of 0.340% and a relative deviation of 9.2%. Despite the satisfactory stability of the results at the final stage, the deformation level itself significantly exceeds the regulatory limit, indicating a pronounced tendency of the aggregate toward alkali–silica reaction (ASR). Such a mixture should therefore be classified as reactive.

In the second mixture, containing 5% silica fume by mass of cement, the final expansion decreased to 0.215%. However, the average value for days 12–14 was 0.177%, and the relative deviation reached 17.7%, which exceeds the permissible limit. Although a certain reduction in expansion was observed, the values remain above the regulatory threshold, and the instability at the end of the observation period confirms the continuing activity of chemical interaction. Consequently, this mixture should also be classified as reactive.

In the third mixture, modified with 10% silica fume, the final expansion value was 0.0806%, which falls within the regulatory limit. However, the average value for days 12–14 (0.0582%) and the high level of relative deviation (27.8%) indicate a lack of stabilization of the process at the late stage of testing. Despite the reduced intensity of the reactions, the development of expansion continues, which allows this mixture to be classified as potentially reactive.

The most favorable result was demonstrated by the fourth mixture, containing 15% silica fume. The final expansion was 0.0654%, the average value was 0.0562%, and the relative deviation was 14.1%, which is within the permissible limits. The achieved stability of the indicators and the low level of expansion indicate an effective reduction in the concentration of free alkalis and the formation of a denser cement paste structure. This mixture can therefore be classified as non-reactive with respect to alkalis.

A histogram of the final expansions and their average values for days 12–14 of specimens stored in a sodium hydroxide solution, depending on the silica fume content and its proportion relative to the mass of cement, is presented in Figure 2. The expansion level and its regulatory limit for specimens containing silica fume are shown in Figure 3.

Thus, increasing the silica fume content in fine-grained concrete to 15% makes it possible to reduce the reactivity of the cement paste.

In the fifth mixture, containing the organomineral modifier MB2-50S in an amount of 5%, the final expansion reached 0.294%, with an average value of 0.256% and a relative deviation of 12.9%. Despite the satisfactory stability of the final measurements, the expansion level remains significantly above the regulatory limit, indicating insufficient effectiveness of the admixture at this dosage; therefore, this mixture is classified as reactive.

In the sixth mixture, the content of MB2-50S was increased to 10%, which led to a partial reduction in expansion. However, the final expansion value of 0.214% and the average value for days 12–14 of 0.184%, with a relative deviation of 14%, still indicate that the regulatory limit is exceeded. This demonstrates the limited ability of

предела. Это указывает на ограниченную способность добавки подавлять развитие щёлочно-кремнезёмной реакции, и данный состав также следует считать реакционноспособным.

the admixture to suppress the development of the alkali-silica reaction, and therefore this mixture should also be considered reactive.

РИСУНОК 2

ГИСТОГРАММА КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ИХ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ОБРАЗЦОВ С МИКРОКРЕМНЕЗЕМОМ

КД – конечная деформация
СД – среднее значение деформация за 12–14-е сутки

Figure 2

Histogram of final deformations and their average values for samples with microsilica
KD – final deformation
SD – average deformation value for the 12th–14th day

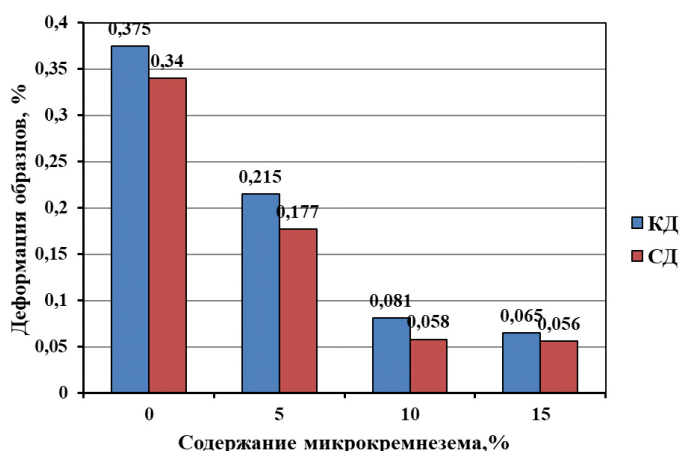
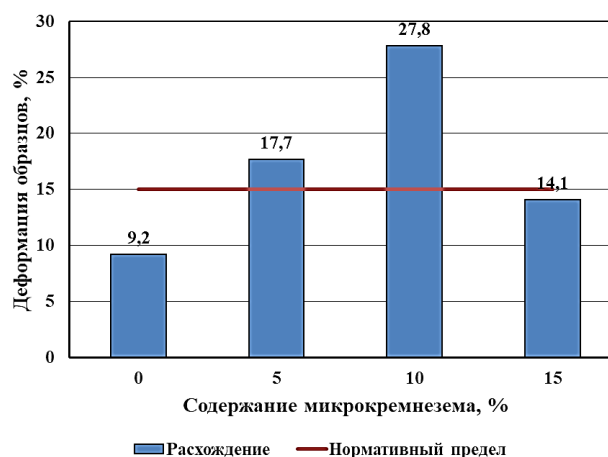


РИСУНОК 3

УРОВЕНЬ ДЕФОРМАЦИИ И ЕГО НОРМАТИВНЫЙ ПРЕДЕЛ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ СОДЕРЖАЩИХ МИКРОКРЕМНЕЗЕМ

Figure 3

The level of deformation and its standard limit for samples containing microsilica



В седьмом составе, содержащем 15 % МБ2-50С, конечная деформация уменьшилась до 0,0897 %, что формально соответствует нормативному ограничению. Однако среднее значение за 12–14-е сутки составило 0,0667 %, а относительное расхождение достигло 25,6 %, что является свидетельством нестабильности процесса на завершающем этапе. Несмотря на снижение общего уровня деформаций, сохранение значительного прироста в конце испытания указывает на продолжающееся развитие реакционных процессов. Такой состав следует классифицировать как потенциально реакционноспособный.

Гистограмма конечных деформаций и их средних значений за 12–14-е сутки образцов выдержанных в растворе гидроксида натрия в зависимости от содержания органоминерального модификатора МБ2-50С представлены на рис. 4. Уровень деформации и его нормативный предел для образцов содержащих МБ2-50С представлен на рис. 5.

Выводы

Проведённые исследования показали, что увеличение содержания микрокремнезёма — особенно до уровня 15 % — является наиболее эффективным способом подавления щёлочно-кремнезёмной реакции и предотвращения связанных с ней деформаций. В данном случае были

In the seventh mixture, containing 15% MB2-50S, the final expansion decreased to 0.0897%, which formally complies with the regulatory limit. However, the average value for days 12–14 was 0.0667%, and the relative deviation reached 25.6%, indicating instability of the process at the final stage. Despite the overall reduction in expansion, the continued significant increase at the end of the test indicates that reaction processes are still developing. Therefore, this mixture should be classified as potentially reactive.

A histogram of the final expansions and their average values for days 12–14 of specimens stored in a sodium hydroxide solution, depending on the content of the organomineral modifier MB2-50S, is presented in Figure 4. The expansion level and its regulatory limit for specimens containing MB2-50S are shown in Figure 5.

Conclusions

The conducted study demonstrated that increasing the silica fume content, particularly up to 15%, is the most effective way to suppress the alkali-silica reaction (ASR) and prevent the associated expansions. In this case, the requirements of GOST 8269.0-97 were fully satisfied both in terms

полностью выполнены требования ГОСТ 8269.0-97 как по величине конечной деформации, так и по стабильности её значений на заключительных стадиях испытаний. Указанный эффект обусловлен высокой пуццолановой активностью микрокремнезёма, его способностью связывать гидроксид кальция и модифицировать микроструктуру цементного камня, что приводит к снижению концентрации свободных щелочей и ограничению образования расширяющегося щёлочно-кремнезёмного геля.

of the final expansion value and the stability of the measurements at the final stages of testing. This effect is attributed to the high pozzolanic activity of silica fume, its ability to bind calcium hydroxide, and to modify the microstructure of the cement paste, which results in a reduction in the concentration of free alkalis and limits the formation of expansive alkali-silica gel.

РИСУНОК 4

ГИСТОГРАММА КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ИХ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ОБРАЗЦОВ С МВ2-50С

КД – конечная деформация
СД – среднее значение деформация за 12–14-е сутки

Figure 4

Histogram of final deformations and their average values for samples with MB2-50C

KD – final deformation
SD – average deformation value for the 12th–14th day

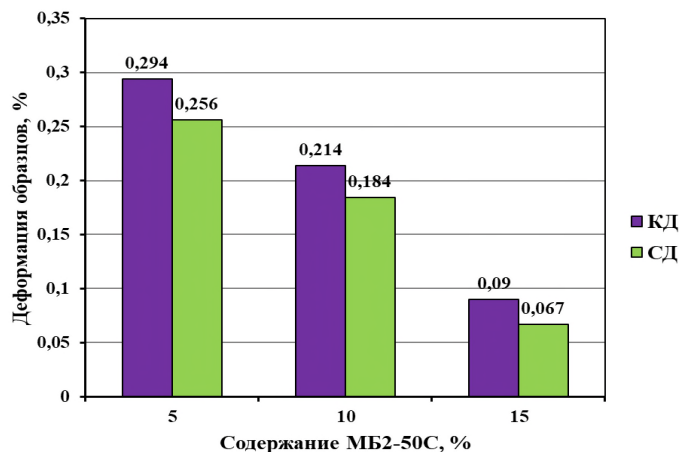
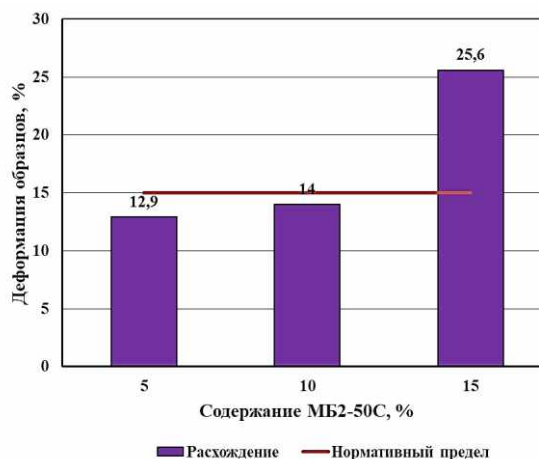


РИСУНОК 5

УРОВЕНЬ ДЕФОРМАЦИИ И ЕГО НОРМАТИВНЫЙ ПРЕДЕЛ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ СОДЕРЖАЩИХ МВ2-50С

Figure 5

The level of deformation and its standard limit for samples containing MB2-50C



Несмотря на высокую техническую эффективность данного подхода, его применение связано со значительными экономическими затратами. Микрокремнезём относится к материалам с относительно высокой стоимостью, что делает его использование в больших количествах экономически нецелесообразным при реализации крупномасштабных строительных проектов — таких, как мостовые сооружения, гидротехнические объекты и инфраструктурные комплексы.

Despite the high technical efficiency of this approach, its application is associated with considerable economic costs. Silica fume is a relatively expensive material, which makes its use in large quantities economically impractical for large-scale construction projects such as bridges, hydraulic engineering structures, and infrastructure complexes.

Результаты применения модификатора МВ2-50С показывают, что увеличение его дозировки в составе бетонной смеси способствует постепенному и закономерному повышению стойкости бетона к щёлочно-кремнезёмной реакции. С ростом содержания модификатора наблюдается уменьшение деформаций и повышение стабильности их развития во времени, что указывает на способность МВ2-50С регулировать щелочной режим порового пространства и снижать интенсивность протекания реакции. Несмотря на то, что отдельные составы не достигли уровня полного ингибирования щелочно-кремнезёмной реакции в соответствии с требованиями стандарта,

The results obtained for the MB2-50S modifier show that increasing its dosage in the concrete mixture leads to a gradual and consistent improvement in the resistance of concrete to the alkali-silica reaction. As the modifier content increases, a reduction in expansion and greater stability of their development over time are observed, indicating the ability of MB2-50S to regulate the alkaline conditions of the pore solution and reduce the intensity of the reaction. Although some mixtures did not achieve the level of complete inhibition of ASR in accordance with the standard requirements, the overall trend of the results indicates

общая тенденция результатов свидетельствует о том, что увеличение доли модификатора позволяет снизить воздействие реакции до практически приемлемых значений при сохранении экономической целесообразности.

Таким образом, микрокремнезём следует рассматривать как наиболее эффективный ингибитор щелочно-кремнезёмной реакции с точки зрения технического эффекта, однако его широкое применение ограничивается экономическими факторами. Повышение содержания модификатора МБ2-50С обеспечивает более сбалансированное решение, сочетающее удовлетворительный уровень подавления реакции с оптимальными затратами, что делает данный подход практически оправданным для инженерных применений, особенно в проектах крупного масштаба, где требуется обеспечить надёжность эксплуатации при сохранении экономической эффективности.

Литература:

1. Брыков, А. С. Щелоче-кремнеземные реакции, щелочная коррозия портландцементных бетонов и пуццолановые добавки - ингибиторы коррозии / А. С. Брыков, М. Е. Воронков // Цемент и его применение. – 2014. – № 5. – С. 87-94. – EDN TIREAB.
2. Розенталь, Н. К. Способы защиты бетона от щелочной коррозии / Н. К. Розенталь, Г. В. Любарская, А. Н. Розенталь // Бетон и железобетон. – 2015. – № 1. – С. 24-27. – EDN WHTAVF.
3. Розенталь, Н. К. Реакционноспособные со щелочами заполнители: коррозия и защита бетона / Н. К. Розенталь, Г. В. Чехний, А. Н. Розенталь // Вестник НИЦ Строительство. – 2024. – № 4(43). – С. 141-155. – [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-141-155](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-141-155). – EDN OBMIJU.
4. Влияние минеральных добавок на развитие щелочной коррозии в портландцементных бетонах с реакционноспособным гравийным заполнителем / Я. Жвиронайте, Ю. Малайшкене, Й. Пранцкявичене [и др.] // Цемент и его применение. – 2020. – № 2. – С. 64-69. – EDN FKPGMY.
5. Портландцемент, содержащий золу-унос для предотвращения щелочной коррозии бетона / Г. С. Рояк, И. В. Грановская, Н. В. Стржалковская, Д. А. Миленин // Цемент и его применение. – 2015. – № 1. – С. 89-92. – EDN TSNQDF.
6. Хироно С., Ямада К., Андо Й., Тории К. Проблемы, связанные с щелоче-кремнеземной реакцией, в Японии и Таиланде // Цемент и его применение. – 2016. – № 3. – С. 88-94.
7. Льюис Р.С., Байрак Э. Применение микрокремнезема для профилактики щелоче-кремнеземной реакции с целью обеспечить использование местных заполнителей в Турции // Цемент и его применение. – 2016. – № 4. – С. 108-111.
8. Курдовски В. Значение щелочей в цементе для технологии бетона // Цемент и его применение. 2015. №1. С. 89-92.
9. Рояк, Г. С. Продукты реакции при развитии щелочной коррозии бетона и меры ее предотвращения / Г. С. Рояк, И. В. Грановская // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2014. – № 1(33). – С. 58-67. – EDN RYWPPV.
10. Добшиц, Л. М. Требования к качеству используемых материалов для изготовления долговечных железобетонных изделий и конструкций / Л. М. Добшиц, А. А. Николаева // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2023. – № 2(71). – С. 38-45. – EDN CHYWPD.
11. Королев, Е. В. Оценка условий протекания щелочной коррозии. Исследование объёмного распределения воды в материале / Е. В. Королев, А. Н. Гришина, С. Ли // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3(60). – С. 5-18. – https://doi.org/10.54734/20722958_2024_3_5. – EDN EPNHWD.
12. Влажностные деформации бетона, подверженного щелочной коррозии. Модель процесса / Е. В. Королев, А. Н. Гришина, А. В. Михеев, В. А. Гладких // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 4(81). – С. 134-143. – <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-134-143>. – EDN ABJKUI.
13. Влажностные деформации бетона, подверженного

that increasing the proportion of the modifier makes it possible to reduce the impact of the reaction to practically acceptable levels while maintaining economic feasibility.

Thus, silica fume should be considered the most effective ASR inhibitor from a technical perspective; however, its widespread use is limited by economic factors. Increasing the content of the MB2-50S modifier provides a more balanced solution that combines a satisfactory level of reaction suppression with optimized costs. This makes the approach practically justified for engineering applications, especially in large-scale projects where operational reliability must be ensured while maintaining economic efficiency.

References

1. Brykov, A. S. Schelochekremnezemnyye reakcii, shelochnaya korrozziya portlandcementnyh betonov i puccolanovyie dobavki - ingibitory korrozii / A. S. Brykov, M. E. Voronkov // Cement i ego primenenie. – 2014. – № 5. – S. 87-94. – EDN TIREAB.
2. Rozental', N. K. Sposoby zaschity betona ot shelochnoy korrozii / N. K. Rozental', G. V. Lyubarskaya, A. N. Rozental' // Beton i zhelezobeton. – 2015. – № 1. – S. 24-27. – EDN WHTAVF.
3. Rozental', N. K. Reakcionnosposobnyye so shelochami zapolnители: korrozziya i zaschita betona / N. K. Rozental', G. V. Chehniy, A. N. Rozental' // Vestnik NIC Stroitel'stvo. – 2024. – № 4(43). – S. 141-155. – [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-141-155](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-141-155). – EDN OBMIJU.
4. Vliyanie mineral'nyh dobavok na razvitie shelochnoy korrozii v portlandcementnyh betonah s reakcionnosposobnym graviynym zapolnitelem / Ya. Zhvironayte, Yu. Malayshkene, Y. Prancykavichene [i dr.] // Cement i ego primenenie. – 2020. – № 2. – S. 64-69. – EDN FKPGMY.
5. Portlandcement, soderzhaschii zolu-unos dlya predotvrashcheniya shelochnoy korrozii betona / G. S. Royak, I. V. Granovskaya, N. V. Strzhalkovskaya, D. A. Milenin // Cement i ego primenenie. – 2015. – № 1. – S. 89-92. – EDN TSNQDF.
6. Hirono S., Yamada K., Ando Y., Torii K. Problemy, svyazannye s shelochekremnezemnoy reakciey, v Yaponii i Tailande // Cement i ego primenenie. – 2016. – № 3. – S. 88-94.
7. L'yuis R.S., Bayrak E. Primenenie mikroremnezema dlya profilaktiki shelochekremnezemnoy reakcii s cel'yu obespechit' ispol'zovanie mestnyh zapolniteley v Turcii // Cement i ego primenenie. – 2016. – № 4. – S. 108-111.
8. Kurdovski V. Znachenie shelochey v cemente dlya tehnologii betona // Cement i ego primenenie. 2015. №1. S. 89-92.
9. Royak, G. S. Produkty reakcii pri razvitii shelochnoy korrozii betona i mery ee predotvrashcheniya / G. S. Royak, I. V. Granovskaya // ALITinform: Cement. Beton. Suhie smesi. – 2014. – № 1(33). – S. 58-67. – EDN RYWPPV.
10. Dobshic, L. M. Trebovaniya k kachestvu ispol'zuemyh materialov dlya izgotovleniya dolgovechnykh zhelezobetonnyh izdeliy i konstrukcij / L. M. Dobshic, A. A. Nikolaeva // ALITinform: Cement. Beton. Suhie smesi. – 2023. – № 2(71). – S. 38-45. – EDN CHYWPD.
11. Korolev, E. V. Ocenka usloviy prottekaniya shelochnoy korrozii. Issledovanie ob'emnogo raspredeleniya vody v materiale / E. V. Korolev, A. N. Grishina, S. Li // Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo. – 2024. – № 3(60). – S. 5-18. – https://doi.org/10.54734/20722958_2024_3_5. – EDN EPNHWD.
12. Vlazhnostnyye deformacii betona, podverzhenogo shelochnoy korrozii. Model' processa / E. V. Korolev, A. N. Grishina, A. V. Miheev, V. A. Gladkih // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2020. – № 4(81). – S. 134-143. – <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-134-143>. – EDN ABJKUI.

- щелочной коррозии. Экспериментальные результаты / А. Н. Гришина, Е. В. Королев, А. В. Михеев, В. А. Гладких // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 6(83). – С. 140-148. – <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-140-148>. – EDN EYXXWI.
14. Эффективные способы предотвращения коррозии гидротехнического бетона / А. Шарифов, З. Х. Гайбуллаева, Д. С. Ньматзода, З. А. Гозиев // Доклады Национальной академии наук Таджикистана. – 2022. – Т. 65, № 1-2. – С. 98-105. – EDN WDELEG.
15. Добшиц, Л. М. Влияние примесей в компонентах бетона на протекание щелочно-кремнеземной реакции в железобетонных конструкциях / Л. М. Добшиц, А. А. Николаева // Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2023. – № 1(15). – С. 38-42. – EDN WDQZDC.
16. Исследование физико-механических свойств бетона с добавлением многофункциональной добавки / А. Н. Перевощикова, И. В. Вальцифер, Н. Б. Кондрашова, Н. С. Воронина // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 170-179. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-170-179>. – EDN BFTEZA.
17. Сорвачева, Ю. А. Влияние нано-кремнезема на кинетику протекания щелочной коррозии бетона / Ю. А. Сорвачева // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 2(39). – С. 118-123. – EDN SGRTTZ.
18. Кахаров З.В., Исломов А.С. Применение микрокремнезема при производстве бетонной смеси // Вестник науки. – 2023. – № 4(61). – С. 371-377.
19. Гувалов А.А., Аббасова С.И., Кузнецова Т.В. Улучшение структуры высокопрочного бетона с применением модификаторов // Строительные материалы. 2015. № 12. С. 78-80. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-732-12-78-80>
20. Модификаторы бетона МБ-С // Официальный сайт «Мастер-Бетон-МБ». – Электронный ресурс. – Режим доступа: masterbeton-mb.ru (дата обращения: 16.11.2025).
13. Vlazhnostnyye deformatsii betona, podverzhenogo shchelochnoy korrozii. Eksperimental'nye rezul'taty / A. N. Grishina, E. V. Korolev, A. V. Miheev, V. A. Gladkih // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2020. – № 6(83). – S. 140-148. – <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-140-148>. – EDN EYXXWI.
14. Effektivnyye sposoby predotvrashcheniya korrozii gidrotekhnicheskogo betona / A. Sharifov, Z. H. Gaybullaeva, D. S. Ne'matzoda, Z. A. Goziev // Doklady Nacional'noy akademii nauk Tadjhikistana. – 2022. – T. 65, № 1-2. – S. 98-105. – EDN WDELEG.
15. Dobshic, L. M. Vliyanie primesey v komponentah betona na protokanie shchelochno-kremnezemnoy reakcii v zhelezobetonnykh konstrukciyah / L. M. Dobshic, A. A. Nikolaeva // Resursoenergoeffektivnyye tehnologii v stroitel'nom komplekse regiona. – 2023. – № 1(15). – S. 38-42. – EDN WDQZDC.
16. Issledovanie fiziko-mehaniicheskikh svoystv betona s dobavleniem mnogofunktsional'noy dobavki / A. N. Perevoschikova, I. V. Val'cifer, N. B. Kondrashova, N. S. Voronina // Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal. – 2024. – T. 16, № 2. – S. 170-179. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-170-179>. – EDN BFTEZA.
17. Sorvacheva, Yu. A. Vliyanie nano-kremnezema na kinetiku protokaniya shchelochnoy korrozii betona / Yu. A. Sorvacheva // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobscheniya. – 2014. – № 2(39). – S. 118-123. – EDN SGRTTZ.
18. Kaharov Z.V., Islomov A.S. Primeneniye mikrokremsnezema pri proizvodstve betonnoy smesi // Vestnik nauki. – 2023. – № 4(61). – S. 371-377.
19. Guvalov A.A., Abbasova S.I., Kuznecova T.V. Uluchsheniye struktury vysokoprochnogo betona s primeneniem modifikatorov // Stroitel'nye materialy. 2015. № 12. S. 78-80. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-732-12-78-80>
20. Modifikatory betona MB-S // Oficial'nyy sayt «MasterBeton-MB». – Elektronnyy resurs. – Rezhim dostupa: masterbeton-mb.ru (data obrashcheniya: 16.11.2025).

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030».
Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”.
Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”

Фирас Абд Алвахед – аспирант кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: firmas.abd.alwahed@yandex.ru (автор для связи)

Кривобородов Юрий Романович – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: ykriv@rambler.ru

Вклад авторов: Абд Алвахед Фирас – выполнение исследований, обработка результатов, написание статьи, Кривобородов Ю.Р. – научное руководство, редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Firas Abd Alwahed – postgraduate student of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering,
E-mail: firmas.abd.alwahed@yandex.ru (author for contact)

Krivoborodov Yuri Romanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: ykriv@rambler.ru

Contribution of the author: Abd Alwahed Firas – research, processing results, writing the article, Krivoborodov Yu.R. – scientific supervision, editing the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.