

В.Р. ФАЛИКМАН, д-р материаловедения (vfalikman@yandex.ru),
П.Н. СИРОТИН, инженер (pn.sirotin@yandex.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона
им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6)

Современные методы оценки реакционной способности заполнителей

Рассматриваются существующие ограничения действующей редакции ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» при оценке реакционной способности горных пород и щебня, имеющих принципиальное значение с точки зрения обеспечения долговечности зданий и сооружений из бетона и железобетона. Показаны подходы к оценке реакционной способности заполнителей для бетонов, устанавливаемые в нормативно-технических документах ведущих международных и национальных организаций по стандартизации. Проанализирована принципиальная возможность выработки алгоритма комплексной оценки реакционной способности заполнителей для бетонов и выбора стратегии снижения риска развития внутренней коррозии бетона в зависимости от условий эксплуатации, предполагаемого срока службы и уровня ответственности сооружений.

Ключевые слова: реакционная способность заполнителей для бетонов, внутренняя коррозия бетонов, методы испытаний заполнителей, подбор составов бетонов, долговечность бетонов.

Для цитирования: Фаликман В.Р., Сиротин П.Н. Современные методы оценки реакционной способности заполнителей // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 15–24.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-15-24>

V.R. FALIKMAN, Doctor of materials science (vfalikman@yandex.ru),
P.N. SIROTIN, Engineer (pn.sirotin@yandex.ru)

Research, design and technological institute of concrete and reinforced concrete — NIIZhB named after A.A. Gvozdev, Scientific Research Center «Construction»
(6, 2nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Present Methods for AAR Estimating

The paper considers the existing restrictions of the current edition of GOST 8269.0–97 «Crushed stone and gravel from dense rocks and industrial waste for construction work. Methods of physical and mechanical tests» in the evaluation of the reactivity of rocks and crushed stone of fundamental importance in terms of durability of buildings and structures made of concrete and reinforced concrete. The approaches to an estimation of reactivity of aggregates for concrete, established in normative-technical documents of the leading international and national standardization organizations, are shown. There has been analyzed the principle possibility of producing the algorithm of the complex estimation of the aggregates reactivity for concrete and choosing the strategy of reduction of the internal concrete corrosion risk depending on operating conditions, presumed service life and responsibility level of the structures.

Keywords: AAR in concrete, “internal deterioration” of concrete, testing methods for aggregates, concrete mix design, durability of structural concrete.

For citation: Falikman V.R., Sirotin P.N. Present methods for AAR estimating. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 15–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-00-00>

Суммарный ущерб от коррозии в масштабах промышленно развитых стран составляет, как правило, несколько процентов от валового внутреннего продукта и представляет собой серьезную экономическую проблему. Еще более важной является проблема безопасности, поскольку утеря вследствие коррозионного воздействия функциональной способности конструкций в жилых зданиях, объектах критически важной инфраструктуры чревата не только материальным ущербом, но и представляет собой угрозу жизни и здоровью людей. С учетом этого одной из основных задач в технологии бетонов является обеспечение требуемой долговечности

бетонных и железобетонных конструкций и срока их эксплуатации в конкретных условиях. При этом, помимо коррозионного повреждения бетона вследствие воздействия внешних факторов, существует особый вид коррозионных процессов, вызываемый взаимодействием компонентов бетона без обменных реакций с внешней средой — так называемая внутренняя коррозия [1, 2]. К этому типу коррозии относят процессы позднего или вторичного образования этtringита в затвердевшем бетоне, образование таумасита и ряд других процессов, однако наиболее распространенным процессом внутренней коррозии бетона является взаимодействие реакционно-

способных заполнителей со щелочами, содержащимися в бетоне.

Указанный вид коррозии впервые наблюдался и был идентифицирован в Северной Америке в 30-х гг. прошлого века. В 1940 г. он был детально описан в США Т. Стэнтоном [3] по результатам исследования причин повреждения дорожных покрытий в Калифорнии, получив название «щелочная реакция заполнителей» (AAR). Аналогичные процессы коррозии бетона затем были охарактеризованы и описаны в 1947 г. Боугом [4] и в 1952 г. Кюлем [5].

AAR обычно проявляется в виде расширения бетона и образования трещин, что сопровождается снижением прочности, упругости, коррозионной стойкости бетона и может значительно снизить срок службы сооружения. При этом различают два вида трещин: трещины, образовавшиеся в результате неравномерного расширения бетона, и трещины, возникшие в местах ослабления конструкции, когда расширение отдельных ее частей или элементов приводит к высоким напряжениям при сжатии, растяжении, срезе или кручении.

Трещины, являющиеся непосредственным результатом расширения бетона, образуют типичный для бетона неправильный узор. Эти трещины шире всего у поверхности конструкции, достигая 38 мм в тех местах, где внутреннее расширение очень велико, но проникают они в бетон лишь на небольшую глубину, обычно только на несколько сантиметров, теряясь в лабиринте разветвленных микротрещин. Они могут стать местом вытеснения на поверхность щелочных силикагелей и образования выцветов соединений, выщелоченных из бетона.

Трещины, по которым происходит нарушение конструкции, свидетельствуют о наличии высоких внутренних напряжений в бетоне. Поэтому их развитие следует рассматривать как важный показатель надежности сооружения. Кроме того, такие трещины могут сильно ухудшить работу машин и оборудования, установленных на бетонных фундаментах.

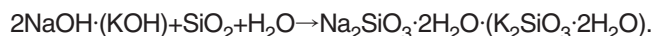
В Великобритании, США, Японии, Канаде, Дании, Ирландии, Новой Зеландии, ЮАР и других странах отмечены массовые случаи разрушения вследствие AAR [6]. Международная федерация по конструкционному бетону fib проанализировала около 100 случаев повреждения конструкций из бетона, связанных с AAR, через 6–10 и 20–30 лет после начала эксплуатации, в том числе в гидротехнических сооружениях, дорожных и аэродромных покрытиях, мостах, тоннелях, шпалах, фундаментах и других конструкциях. Так, результаты обследования Федеральным ведомством по гидротехническим сооружениям в г. Карлсруэ (Германия) шлюзов, плотин, мостов, находившихся в эксплуатации в течение

30–50 лет, имевших типичные повреждения, показали, что в 77% случаев повреждение бетона было связано с наличием в бетоне гравия, в том числе в 17% случаев в заполнителе были обнаружены реакционноспособные породы: риолиты, граувакки, сланцы, в 9% – риолиты, граниты, метаморфические породы, в 6% – граувакки [7].

В работе [8] сообщается о 38 случаях повреждения аэродромных покрытий от AAR, вызванного воздействием щелочесодержащих противогололедных реагентов в аэропортах, принадлежащих США, и о 22 случаях повреждений водопроводных сооружений.

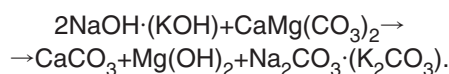
Как правило, при классификации видов реакционноспособного заполнителя выделяют два механизма химического взаимодействия со щелочами, содержащимися в бетоне, – реакцию щелочей с кремнеземом и реакцию щелочей с карбонатом магния в составе доломитов и доломитизированных известняков [6, 9].

В общем виде реакция щелочей с аморфным кремнеземом может быть выражена:



Образующийся в ходе реакции гель силиката натрия и калия увеличивается в объеме и вызывает характерное растрескивание бетона – как правило, с хорошо идентифицируемым при микроскопии трещин высохшим белесоватым гелем, наличием реакционной каймы по границам зерен заполнителя и частичной или полной потерей механического сцепления между зерном и цементным камнем [10, 11]. Гель четко идентифицируется с применением уранилацетата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [6].

Взаимодействие щелочей с карбонатами в составе доломитов (кальцитизация доломитов, раздоломичивание) в общем виде выражается следующей реакцией:



Потенциальный деструктивный процесс в этом случае обусловлен не образованием расширяющегося силикагеля, а увеличением в объеме крупных частиц заполнителя при реакции гидроксида щелочного металла с небольшими кристаллами доломита в глинистой матрице (т. е. распаду доломита на кальцит и брусит с образованием карбоната натрия или калия).

Для объяснения потенциальной реакционной способности отдельных горных пород, таких как филлиты, аргиллиты и некоторые граувакки, рядом авторов [9] высказано предположение о специфическом механизме взаимодействия, поскольку в этом случае реакция щелочей происходит не с аморфным кремнеземом, а с содержащимися в этих горных породах

силикатами слоистой структуры – филлосиликатами. Тем не менее на данный момент большинством специалистов не рассматривается выделение этой реакции как отдельного вида AAR [6].

В России и бывшем СССР хорошо известны случаи повреждения за счет AAR фундаментных конструкций жилых домов, шпал на железной дороге, железобетонных конструкций ряда общественных и промышленных зданий и сооружений, конструкций портовых сооружений. Впервые в СССР исследования AAR проводили В.М. Москвин и Г.С. Рояк [12]. В последующем в работах В.М. Москвина, С.М. Рояка и Г.С. Рояка, Ф.М. Иванова, А.М. Викторова, Г.В. Любарской, Н.К. Розенталя, Г.В. Чехний, З.Б. Энтина, Б.Э. Юдовича, М.Л. Нисневича., М.И. Лопатникова, Н.С. Левковой, Т.А. Затворницкой, Т.М. Петровой, В.Г. Хозина и др. исследовались отдельные заполнители и процессы взаимодействия щелочей цемента и добавок с реакционноспособными заполнителями, был определен перечень реакционноспособных пород Советского Союза и дана ориентировочная оценка сырьевой базы [13].

Большой объем экспериментальных работ был выполнен в период с 1963 по 1969 г. в лаборатории каменных материалов НИС Гидропроекта и одновременно в Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта и Среднеазиатском отделении Гидропроекта в Ташкенте. В 80-х гг. детальную оценку ресурсов заполнителей и их минералогии провел институт ВНИИПИСтромсырье [14].

За последние десятилетия в Научно-исследовательском институте бетона и железобетона (НИИЖБ) исследовали не менее 50 различных заполнителей (щебня, гравия, песка) с содержанием растворимого в щелочах SiO_2 от 20 до 1100 ммоль/л (Н.К. Розенталь, Г.В. Любарская, Г.В. Чехний, А.Н. Розенталь). Там же выполнены испытания щебня из доломитизированных известняков месторождений Данковское и Зубцовское с содержанием карбонатов CaCO_3 и MgCO_3 в щебне около 40%. Морозовой и сотрудниками [15] выполнен анализ содержания реакционноспособного кремнезема в гравии различных месторождений р. Кама, использованном заводами товарного бетона и сборного железобетона г. Казани за период 2001–2005 гг.

С учетом значительного срока протекания процесса внутренней коррозии в бетоне в естественных условиях и соответственно отсроченного проявления внешних симптомов развития деструктивных процессов особое значение приобретают методы идентификации реакционноспособного заполнителя и методы оценки риска развития коррозии при использовании потенциально реакционноспособных заполнителей.

В соответствии с требованиями действующего в Российской Федерации ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» щебень и гравий для строительных работ должны быть стойкими к воздействию окружающей среды; при этом щебень и гравий, предназначенные для применения в качестве заполнителей для бетонов, должны также обладать стойкостью к химическому воздействию щелочей цемента. ГОСТ 8267–93 определяет реакционную способность горной породы как характеристику наличия минералов, содержащих растворимый в щелочах кремнезем, и в качестве критерия, позволяющего без ограничений применять щебень и гравий в бетонах, устанавливает содержание не более 50 ммоль/л аморфных разновидностей диоксида кремния, растворимых в щелочах (Приложение А). Однако по результатам проведенных отечественными специалистами многочисленных исследований можно констатировать, что содержание растворимого диоксида кремния в заполнителе 50 ммоль/л не может являться критерием опасности повреждения бетона от AAR. При использовании этого критерия некоторые заполнители могут быть неоправданно оценены как реакционноспособные. В то же время при содержании растворимого диоксида кремния ниже указанного значения некоторые заполнители вызывают существенные деформации бетона, приводящие к его растрескиванию.

Определение реакционной способности в ГОСТ 8267–93 предполагается как линейная последовательность испытаний горной породы либо щебня и гравия следующими методами:

- минералого-петрографическим – на стадии разведки месторождения и для оценки горных пород и щебня для использования их в качестве сырья для производства заполнителей бетонов;

- химическими – в случае обнаружения наличия потенциально реакционноспособных пород и минералов пород и минералов для оценки количественного содержания в них растворимого в щелочах кремнезема;

- ускоренным с измерением деформаций бетонов – для определения возможности проявления щелочной коррозии бетонов в случае, когда количественное содержание растворимого в щелочах кремнезема превышает установленные нормативные значения;

- непосредственным испытанием образцов бетонов – для определения возможности проявления щелочной коррозии бетона в случае, когда относительные деформации расширения образцов бетона, определенные ускоренным методом, превышают установленные значения.

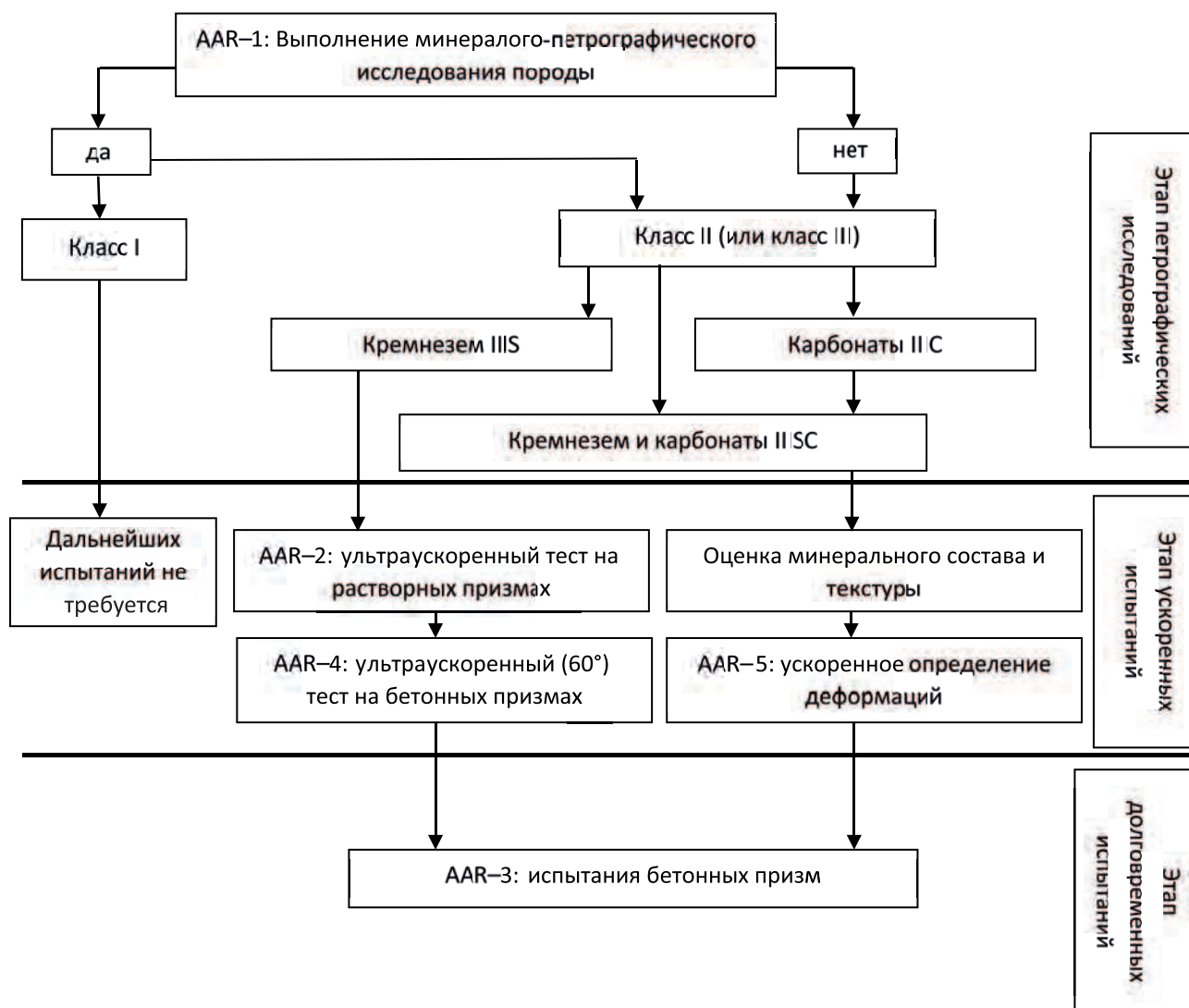


Рис. 1. Принципиальный алгоритм оценки реакционной способности по методам RILEM AAR
Fig. 1. Principal algorithm for evaluating reactivity according to RILEM AAR methods

Для оценки реакционной способности в ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» используются методы, близкие разрабатываемым RILEM для оценки реакционной способности кремнеземистых пород. При этом необходимо учитывать, что в методе ускоренного определения деформаций на растворных призмах по ГОСТ 8269.0–97 есть существенные отличия от процедуры по RILEM AAR–2. Согласно ГОСТ 8269.0–97 проводить измерения по определению изменения длины растворных призм следует не сразу после извлечения призм из раствора NaOH, а после остывания до температуры $20 \pm 5^\circ\text{C}$, но не менее чем через 4 ч. Это различие в определенной степени усложняет оценку результатов испытаний в силу того, что охлаждение образцов перед измерением снижает значения приращения деформаций, а одним из критериев при-

знания заполнителя нереакционноспособным является условие, что последний (одиннадцатый) результат испытания отличается от трех предшествующих результатов измерений не более чем на 15%.

Важно также отметить, что действующая редакция стандарта не устанавливает критериев и методов определения риска развития коррозии бетона при использовании реакционноспособных карбонатных заполнителей.

Необходимо подчеркнуть, что существующие в действующих национальных и международных стандартах [16] правила подхода к оценке реакционной способности заполнителя и методам ее определения в значительной степени основаны на работах технических комитетов RILEM TC 106–AAR, TC 258–AAA, TC 219–ACS, в том числе и нового комитета – ARM (RILEM Technical Committee 300–ARM: Alkali-aggregate reaction mitigation. <https://www.rilem.net/groupe/300-arm-alkali-aggregate-reaction-mitigation-424>).

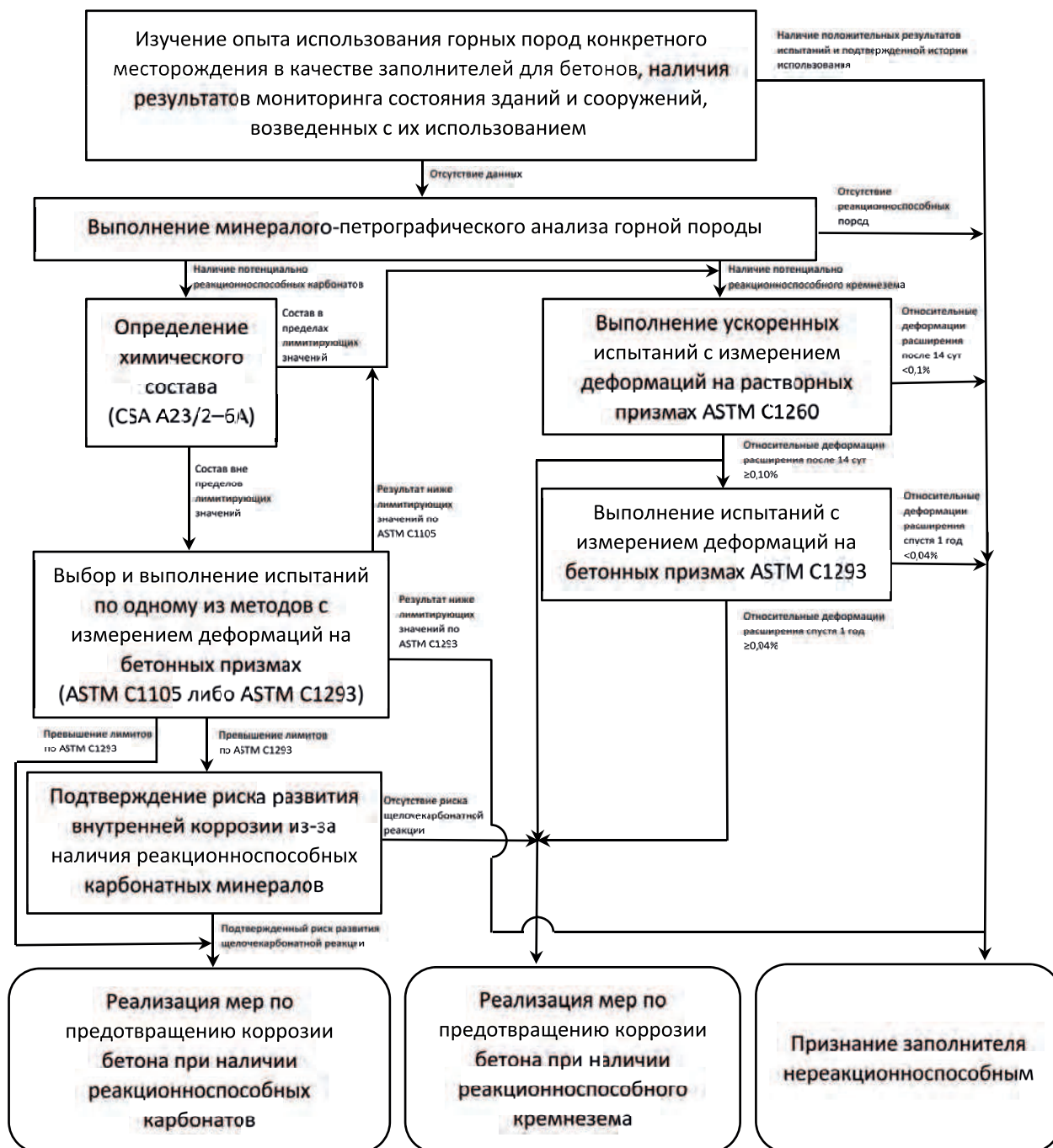


Рис. 2. Принципиальный алгоритм процедур ASTM по оценке реакционной способности заполнителя для бетонов (сплошными линиями показан рекомендованный путь выполнения шагов)

Fig. 2. The principle algorithm of ASTM procedures for assessing the reactivity of aggregates for concretes (solid lines show the recommended way of performing steps)

Принципиальный алгоритм предлагаемой RILEM процедуры оценки реакционной способности заполнителей и выбор методов испытаний в зависимости от минералого-петрографической характеристики породы представлены на рис. 1.

Весьма интересно сравнить подход к формулировке требований и методы испытаний в российской нормативной документации с зарубежными стандартами. Так, Американским обществом испытаний ма-

териалов ASTM развивается система комплексной оценки реакционной способности заполнителя и риска развития внутренней коррозии в бетоне, в целом схожая с предлагаемой RILEM (рис. 2).

Стандарты ASTM предусматривают испытания реакционноспособного заполнителя как с содержанием активного кремнезема, так и с содержанием карбонатных пород, способных реагировать со щелочами цемента. Не имеет прямого аналога

стандарт ASTM C586–19 (Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks as Concrete Aggregates (Rock-Cylinder Method), устанавливающий метод определения реакционной способности карбонатных пород по изменению длины кернов из горной породы, погруженных в раствор NaOH. Стандарт ASTM C1105–08a (Standard Test Method for Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Rock Reaction устанавливает метод испытания карбонатных пород в составах бетона путем оценки изменения длины бетонных призм в срок до 12 мес. Стандарты ASTM C1260–21 (Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM C1293–20a (Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction и ASTM C1567–21 (Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method) являются адаптированными вариантами методов RILEM AAR–2 и AAR–3.

Важным для изучения представляется подход к нормированию методов оценки реакционной способности щебня, устанавливаемый Группой CSA (ранее – Канадская ассоциация стандартов; CSA), организацией по стандартизации, которая разрабатывает стандарты в 57 областях. В силу распространенности на территории Канады реакционноспособных карбонатных пород, в стандартах CSA присутствует развитый химический метод оценки реакционной способности – CSA A23.2–26A (Determination of Potential Alkali-Carbonate Reactivity of Quarried Carbonate Rocks by Chemical Composition). Этот стандарт рекомендуется для использования и ASTM. Кроме того, канадскими стандартами устанавливаются расширенные методы оценки влияния реакционной способности заполнителя на деформации бетонов (CSA A23.2–27A Standard Practice to Identify Degree of Alkali Aggregate Reactivity of Aggregates and to Identify Measures to Avoid Deleterious Expansion in Concrete), а также методы оценки эффективности минеральных добавок и ингибиторов щелочной коррозии заполнителя для предотвращения риска развития внутренней коррозии бетонов (CSA A23.2–28A Standard Practice for Laboratory Testing to Demonstrate the Effectiveness of Supplementary Cementing Materials and Lithium-Based Admixtures to Prevent Alkali-Silica Reaction in Concrete).

Довольно интересно отметить, что к настоящему времени Европейский комитет по стандартизации CEN не ввел в действие общий стандарт, прямо формулирующий методы испытаний для оценки реакционной способности заполнителя. Действующая редакция EN 12620:2002+A1:2008 (Aggregates for

Concrete) содержит ограниченный понятийный аппарат для нормирования требований в отношении внутренней коррозии бетона из-за наличия реакционно-способного заполнителя, не учитывая, например, щелочно-карбонатный вид коррозии. При необходимости оценки риска развития коррозии из-за наличия реакционноспособного кремнезема стандарт предписывает руководствоваться в этом отношении местными нормативными документами.

Еще одним чрезвычайно важным для анализа комплексом документов, по мнению авторов, являются стандарты и руководства, устанавливающие дифференцированную оценку заполнителей в зависимости от результатов определения их реакционной способности, а также формулирующие меры по предотвращению риска появления внутренней коррозии бетона при использовании потенциально реакционно-способных заполнителей.

В настоящее время введены в действие два подобных стандарта – стандарт Американской ассоциации государственных служащих автомобильных дорог и транспортных средств (AASHTO R 80–17. Standard practice for determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete construction и стандарт ASTM C1778–20 (Standard guide for reducing the risk of deleterious alkali-aggregate reaction in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020). Стандарты основаны на рекомендациях (RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures: state-of-the-art report of the RILEM technical committee 219–ACS. Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7252-5>), разработанных техническим комитетом RILEM TC 219–ACS, и различаются степенью адаптации под отраслевые нужды (дорожное и гражданское строительство соответственно).

Все три документа построены исходя из единых принципов:

- введение классификации заполнителей по реакционной способности в зависимости от результатов определения приращения относительных деформаций на растворных образцах в течение 14 сут или на бетонных образцах в течение 1 г.;
- введение классификации уровней риска развития внутренней коррозии в зависимости от класса заполнителя по реакционной способности и условий эксплуатации (с учетом прежде всего влажностного состояния и наличия агрессивного воздействия щелочей);
- введение классификации сооружений в зависимости от уровня ответственности, ориентировочного срока службы и доступности конструкций для инспекции и ремонта;

Таблица 1
Table 1

Классификация заполнителей по реакционной способности
Classification of aggregates by reactivity

Класс реакционной способности заполнителя	Описание реакционной способности заполнителя	Относительные деформации ε при испытаниях в течение 1 года по ASTM C1293, %	Относительные деформации ε при испытаниях в течение 14 сут по ASTM C1260, %
R0	нереакционноспособный	$\varepsilon < 0,04$	$\varepsilon < 0,10$
R1	средней	$0,04 \leq \varepsilon < 0,12$	$0,10 \leq \varepsilon < 0,30$
R2	высокой	$0,12 \leq \varepsilon < 0,24$	$0,30 \leq \varepsilon < 0,45$
R3	особо высокой	$\varepsilon \geq 0,24$	$\varepsilon \geq 0,45$

Таблица 2
Table 2

Классификация уровней риска развития внутренней коррозии бетона при использовании реакционноспособного заполнителя
Classification of risk levels for the development of internal corrosion of concrete when using reactive aggregates

Характеристика конструкции и условия эксплуатации	Класс реакционной способности заполнителя			
	R0	R1	R2	R3
Бетон для немассивных ¹ конструкций в сухих ² условиях	Уровень 1	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
Бетон для массивных ¹ конструкций в сухих ² условиях	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4
Все бетоны для конструкций во влажных условиях, ниже уровня земли либо под водой	Уровень 1	Уровень 3	Уровень 4	Уровень 5
Все бетоны, при эксплуатации подвергающиеся воздействию щелочей ³	Уровень 1	Уровень 4	Уровень 5	Уровень 6
Примечания: ¹ Массивная конструкция имеет как минимум один из размеров, превышающий 0,9 м. ² Сухие условия соответствуют средней относительной влажности менее 60%. ³ Примерами конструкций, подвергающихся при эксплуатации интенсивному воздействию щелочей, могут служить морские сооружения и дорожные покрытия, обрабатываемые противогололедными реагентами (такими, как ацетат калия, формиат натрия и т. д.).				

– формулировка требований к суммарному содержанию щелочей в составе бетона в зависимости от необходимого уровня превентивных мер по минимизации рисков развития внутренней коррозии бетона;

– формулировка рекомендаций по использованию минеральных добавок для минимизации рисков развития внутренней коррозии бетона, при необходимости – с одновременным ограничением суммарного содержания щелочей в составе бетона.

Далее приведена краткая основная информация по вводимой классификации и требованиям к реализации необходимого уровня превентивных защитных мер на примере ASTM C1778–20.

В табл. 1–3 приведена классификация заполнителей по степени их реакционной способности, классификация уровней риска в зависимости от используемого заполнителя и классификация сооружений по степени ответственности.

В табл. 4 в зависимости от уровня риска (табл. 2) и класса ответственности сооружений (табл. 3) выделена классификация шести уровней необходимых

превентивных мер для минимизации риска развития внутренней коррозии, а в табл. 5 для каждого уровня приведены максимальные предписывающие значения по суммарному содержанию щелочей в составе бетона.

В табл. 6 приведены рекомендации по использованию минеральных добавок в качестве замены части цемента для обеспечения требуемого уровня превентивных мер (за исключением минимального уровня защиты V).

В табл. 7 приведены указания по корректировке расходов минеральных добавок в зависимости от содержания щелочей в цементе ($\%Na_2O_{eq}$).

В табл. 8 формулируются рекомендации по обеспечению максимальных уровней превентивных мер защиты при одновременном использовании активных минеральных добавок и ограничении содержания щелочей в бетоне.

Развитие российской нормативной базы в области методов оценки реакционной способности заполнителей для бетонов, а также требований к обеспечению надлежащей долговечности бето-

Таблица 3
Table 3

Классификация сооружений в зависимости от угрозы последствий развития внутренней коррозии бетона при использовании реакционноспособного заполнителя
Classification of structures depending on the threat of the consequences of the development of internal corrosion of concrete when using reactive aggregate

Класс	Последствия развития внутренней коррозии бетона в сооружениях	Допустимость угрозы развития коррозии	Примеры
SC1	Последствия для безопасности, экономики или окружающей среды отсутствуют либо незначительны	Допустимо некоторое повреждение конструкций	Ненесущие конструкции внутри зданий. Конструкции в сухой среде. Временные сооружения (срок службы до 5 лет)
SC2	Возможны определенные последствия для безопасности, экономики или окружающей среды при серьезных повреждениях	Допустим средний риск	Тротуары, бордюры и водосточные желоба. Сооружения со сроком службы до 40 лет
SC3	Существенные последствия для безопасности, экономики или окружающей среды при сравнительно малых повреждениях конструкций	Допустим минимальный риск	Тротуары, конструкции фундамента, подпорные стены, водосточные трубы, сельские дороги с малой интенсивностью, сборные ЖБК. Срок службы обычно от 40 до 74 лет
SC4	Значительные последствия для безопасности, экономики или окружающей среды даже при малых повреждениях конструкций	Риск недопустим	Критические элементы инфраструктуры: мосты, электростанции, плотины, объекты использования атомной энергии, водопровод и водоочистные сооружения, туннели. Малодоступные (скрытые) конструкции. Срок службы обычно превышает 75 лет

Таблица 4
Table 4

Оценка уровня превентивных мер
Assessment of the level of preventive measures

Уровень риска ¹	Классификация сооружения ²			
	SC1	SC2	SC3	SC4
1	V	V	V	V
2	V	V	W	X
3	V	W	X	Y
4	W	X	Y	Z
5	X	Y	Z	ZZ
6	Y	Z	ZZ	*

Примечания: ¹ таблица 2; ² таблица 3; * недопустимый уровень риска, обязательно планирование компенсирующих мероприятий.

Таблица 5
Table 5

Максимальное содержание щелочей для обеспечения требуемого уровня превентивных мер
Maximum alkali content to ensure the required level of preventive measures

	Уровень превентивных мер					
	V	W	X	Y	Z	ZZ
Максимальное содержание щелочей в бетоне, кг/м ³	Не ограничено	3	2,4	1,8	Использование активных минеральных добавок	

Таблица 6
Table 6

Минимальные расходы минеральных добавок для обеспечения надлежащего уровня
превентивных мер
Minimum consumption of mineral supplements to ensure an adequate level
of preventive measures

Вид минеральной добавки ¹	Содержание щелочей в добавке, % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$	Минимальная доля замены цемента ⁴ , мас. %				
		W	X	Y	Z	ZZ
Золы-уноса ² ($\text{CaO} \leq 18\%$)	<3	15	20	25	35	см. табл. 8
	3–4	20	25	30	40	
Гранулированный доменный шлак	<1	25	35	50	65	
Микрокремнезем ³ ($\text{SiO}_2 > 85\%$)	<1	2·KGA	2,5·KGA	3·KGA	4·KGA	

Примечания: ¹ минеральные добавки могут вводиться как самостоятельно, так и в составе смешанных вяжущих; ² золы-уноса с содержанием CaO более 18% могут снижать вероятность реакции «щелочь – кремниевая кислота»; ³ минимальный расход МК (как доли в составе смешанного вяжущего) рассчитывается в зависимости от содержания щелочей в бетоне KGA, кг/м³, но вне зависимости от результата расчета он не должен составлять менее 7% мас., если введение МК является единственной превентивной мерой; ⁴ следует учитывать, что использование значительной доли минеральных добавок может служить фактором риска, если оно сопровождается увеличением проницаемости бетона (к примеру, это может приводить к интенсификации миграции щелочей в дорожном покрытии при обработке противогололедными составами).

Таблица 7
Table 7

Регулирование дозировки минеральной добавки в зависимости от уровня
содержания щелочей в портландцементе
Regulation of the dosage of the mineral additive depending
on the level of alkali content in Portland cement

Содержание щелочей в цементе (% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$)	Расход минеральной добавки
<0,7	Снижение минимального расхода на одну ступень по табл. 6
0,7–1	Использование указанного минимального расхода по табл. 6
1–1,25	Увеличение минимального расхода на одну ступень по табл. 6
>1,25	Без указаний

Примечание. Вне зависимости от содержания щелочей в цементе дозировка минеральных добавок не должна быть менее значений, указанных в табл. 6 для уровня W.

Таблица 8
Table 8

Использование минеральных добавок и ограничение содержания щелочей в бетоне
для обеспечения максимальных уровней превентивных мер
Use of mineral admixtures and limiting alkali content in concrete to ensure maximum levels
of preventive measures

Уровень превентивных мер	Минимальный расход минеральной добавки (при использовании как единственной меры)	Комбинация введения минеральных добавок и ограничения содержания щелочей	
		Максимальное содержание щелочей, кг/м ³	Минимальный расход добавок
Z	Значение для уровня Z по табл. 6	1,8	Значение для уровня Y по табл. 6
ZZ	Недопустимо	1,8	Значение для уровня Z по табл. 6

нов, вероятнее всего, будет связано с имплементацией в существующие стандарты многих положений из вышеупомянутых документов. Очевидно, что это должно подразумевать и проведение комплекса научно-исследовательских работ по соот-

несению устанавливаемых положений с нормами отечественной практики. Требования экономики и необходимости следования принципам устойчивого развития в строительстве делают эту работу необходимой [17].

Список литературы / References

1. Розенталь Н.К., Любарская Г.В. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя // *Бетон и железобетон*. 2012. Т. 1. №. 6. С. 50–60.
1. Rozental' N.K., Lyubarskaya G.V. Corrosion of concrete by alkali interaction with silica in aggregate. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2012. Т. 1. №. 6. pp. 50–60. (In Russian).
2. Петрова Т.М., Сорвачева Ю.А. Внутренняя коррозия бетона как фактор снижения долговечности объектов транспортного строительства // *Наука и транспорт. Транспортное строительство*. 2012. Т. 4. С. 56–60.
2. Petrova T.M., Sorvacheva Yu.A. Internal corrosion of concrete as a factor of the durability decreasing of transport construction objects. *Nauka i transport. Transportnoe stroitel'stvo*. 2012. Vol. 4, pp. 56–60. (In Russian).
3. Stanton T.E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1942. Vol. 107. Iss. 1. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005540>
4. Bogue R.H. The chemistry of Portland cement. New York: Reinhold Publishing Corporation. 1947. 572 p.
5. Kühl H. Zement-Chemie. B. 1–3. Berlin: Verlag Technik GmbH. 1951. 306 p.
6. Sims I., Poole A.B. (ed.). Alkali-aggregate reaction in concrete: A world review. CRC Press. 2017. 767 p. <https://doi.org/10.2991/978-94-6239-157-4-25>
7. Reschke T. Untersuchungen und Instandsetzung von wasserbauwerken, die infolge einer alkali-kieselsäure reaktion geschädigt sind. *Beton*. 2004. Vol. 54. No. 1, pp. 14–21.
8. Stark J., Freyburg E., Seyfarth K., Giebson C., Erfurt D. 70 Jahre AKR und keine Ende in Sicht? *International Baustofftagung IBAUSIL*. Weimar. 2009. Tagungsbericht Band 2, pp. 255–260.
9. Blight G.E., Alexander M.G. Alkali-aggregate reaction and structural damage to concrete: engineering assessment, repair and management. CRC Press. 2011. <https://doi.org/10.1201/b10773>
10. Thomas M.D.A. et al. Alkali-aggregate reactivity (AAR) facts book. United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology, 2013. №. FHWA-HIF-13-019. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/asr/pubs/hif13019.pdf>
11. Fernandes I. et al. (ed.). Petrographic atlas: characterisation of aggregates regarding potential reactivity to alkalis: RILEM TC 219–ACS recommended guidance AAR–1.2, for use with the RILEM AAR–1.1 petrographic examination method. Springer, 2016. Vol. 20. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7383-6>.
12. Москвин В.М., Рояк Г.С. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезем заполнителя. М.: Госстройиздат, 1962. 164 с.
12. Moskvina V.M., Royak G.S. Korroziya betona pri deistvii shchelochey tsementa na kremnezem zapolnitelya [Corrosion of concrete under interaction of cement alkalis and the aggregate active silica] Moscow: Gosstroyizdat. 1962. 164 p.
13. Falikman V.R., Rozentahl N.K. Russian Federation. In “Alkali-aggregate reaction in concrete: A world review” (ed. by Sims I., Poole A. B.). CRC Press. 2017, pp. 433–466.
14. Золотых Е.Б. Типизация потенциально-реакционно-способных минералов месторождений нерудных строительных материалов. *Научно-технический отчет ВНИИПИСтромсырье*. М. 1990. 90 с.
14. Zolotykh E.B. Typification of potentially reactive minerals from non-metallic building material deposits. Scientific and technical report. *VNIIPIStromsyrye*. Moscow. 1990. 90 p.
15. Морозова Н.Н., Хозин В.Г., Матейюнас А.И., Захарова Н.А., Акимова Э.П. Проблема щелочной коррозии бетонов в Республике Татарстан и пути ее решения // *Известия КГАСУ*. 2005. № 2. С. 58–63.
15. Morozova N.N., Khozin V.G., Mateyunas A.I., Zakharova N.A., Akimova E.P. Problem of alkali corrosion of concretes in the Republic of Tatarstan and the ways of its handling. *Izvestiya KGASU*. 2005. No. 2, pp. 58–63.
16. Фаликман В.Р., Сиротин П.Н. Обзор подходов к нормированию показателей качества крупного заполнителя в зарубежных стандартах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 4. С. 64–73. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.64-73
16. Falikman V.R., Sirotnin P.N. Review of approaches to standardization of coarse aggregate quality in foreign standards. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2022. No. 4, pp. 64–73. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.64-73
17. Фаликман В.Р. GLOBE – новая инициатива профильных международных организаций в области устойчивого строительства. *Бетон и железобетон*. 2020. № 2 (602). С. 3–7.
17. Falikman V.R. GLOBE as a new initiative in the field of sustainable construction by specialized international organizations. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2020. No. 2 (602), pp. 3–7. (In Russian).