

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.00

EDN qsyqqn

DOI 10.62980/2076-0655-2026-456-465

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЩЕЛОЧНО-КРЕМНЕЗЕМНОЙ КОРРОЗИИ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Бахарев М.В.¹, Кондращенко В.И.¹

¹ ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ))

АННОТАЦИЯ

В работе предложена методика оценки прочностных характеристик предварительно напряженных железобетонных конструкций, подверженных деградации вследствие щелочно-кремнеземной коррозии. Методология базируется на принципах информационного моделирования, что позволяет интегрировать данные о процессе деградации в целостную цифровую модель объекта. Основу методики составляет макро модель, устанавливающая прямую корреляцию между процессами набухания реактивного крупного заполнителя и результирующим напряженно-деформированным состоянием конструктивной системы.

Ключевым инструментом модели являются введенные коэффициенты модификации для прочностных характеристик и модуля упругости бетона. Данные коэффициенты позволяют анизотропно редуцировать механические свойства материала в зависимости от величины деформаций набухания, учитывая разнонаправленный характер повреждений. В рамках исследования оценена корреляция между снижением значений коэффициентов модификации и характером внешнего силового воздействия (долговременное сжатие или растяжение). На основе полученных зависимостей сформулированы практические рекомендации по структурированию и параметризации информационной модели, направленные на повышение адекватности оценки несущей способности и долговечности поврежденных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: щелочно-кремнеземная коррозия, макро моделирование, анизотропная деградация, бетон, напряженно-деформированное состояние

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бахарев М.В.1, Кондращенко В.И. Моделирование щелочно-кремнеземной коррозии преднапряженных железобетонных конструкций // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 456-465. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-456-465>, EDN qsyqqn.

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN qsyqqn

DOI 10.62980/2076-0655-2026-456-465

MODELING OF ALKALI-SILICA CORROSION OF PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES

Bakharev M.V.¹, Kondrashchenko V.I.¹

¹ Russian University of Transport (RUT(MIIT))

ABSTRACT

This paper proposes a method for assessing the strength characteristics of prestressed reinforced concrete structures. The structures were subject to degradation due to alkali-silica corrosion. The methodology is based on the principles of information modeling. This allows for the integration of degradation process data into a comprehensive digital model of the facility. The methodology is based on a macromodel. It establishes a direct correlation between the swelling processes of reactive coarse aggregate and the resulting stress-strain state of the structural system.

The key tool of the model is the modification coefficients introduced for the strength characteristics and elastic modulus of concrete. These coefficients allow for anisotropic reduction of the material's mechanical properties depending on the magnitude of swelling deformations. In this case, the multidirectional nature of the damage is taken into account. This study assessed the correlation between the reduction in modification coefficient values and the nature of the external force applied. The external force applied was either long-term compression or tension. Based on the obtained dependencies, practical recommendations for structuring and parameterizing the information model were formulated. The recommendations are aimed at improving the adequacy of assessing the load-bearing capacity and durability of damaged structures.

KEY WORDS: alkali-silica corrosion, macromodeling, anisotropic degradation, concrete, stress-strain state.

FOR CITATION: Bakharev M.V., Kondrashchenko V.I. Modeling of alkali-silica corrosion of prestressed concrete structures// Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 4568 – 465. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-456-465>, EDN qsyqqn.

ВВЕДЕНИЕ

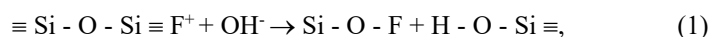
На бетонные и железобетонные конструкции и сооружения, такие как шпалы, дамбы, мосты и др. значительное влияние оказывает внешняя агрессивная среда. В частности, деструктивный эффект могут вызывать щелочи порового раствора в бетоне при взаимодействии с химически активным кремнеземом заполнителя и образованием в последующем силикатного геля. Данный тип химической коррозии называется щелочно-кремнеземная коррозия (ЩКК), по которой уже выполнено большое количество теоретических и экспериментальных исследований. Проблема состоит в том, что химические и физические процессы, лежащие в основе ЩКК довольно сложны, зависят от большого числа разнообразных факторов, механизм которых для каждого случая до сих пор еще полностью не раскрыт [1-4].

Возникновение в зоне контакта реакционноспособного заполнителя с цементной матрицей напряженного-деформированного состояния (НДС) связано с образованием увеличенного объема новообразований при диффузии молекул воды внутрь силикатного геля. В результате возникновения избыточного давления бетон растрескивается и теряет свои прочностные и эксплуатационные свойства.

Так как, изучение большого количества параметров в натурном эксперименте трудно реализуемо и даже достоверно невозможно, предлагается выполнить изучение состояния преднапряженных железобетонных конструкций при ЩКК с помощью информационной модели. За ее основу взята математическая макромодель, связывающая процесс набухания силикатного геля и НДС конструкции [5].

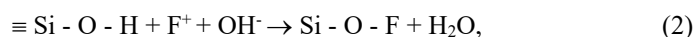
Щелочно-силикатная реакция

Процесс ЩКК является многоступенчатым и проходит в несколько этапов. Вначале поверхностный слой кремнезема SiO_2 сорбирует анионы OH^- . Этот контакт на первом этапе приводит к активной реакции, в результате которой происходит деполимеризация молекул кремния с образованием слабой кремневой кислоты:

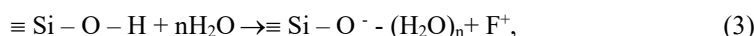


где F – катион щелочного металла, в роли которого зачастую выступает натрий Na.

В дальнейшем кислота продолжает взаимодействовать с другими гидроксильными ионами:



Образовавшийся кремневый силикат (1,2) проявляет аморфные признаки и свойства гигроскопичности. На втором этапе происходит поглощение силикатом свободной воды в растворе и деструктивное расширение щелочно-силикатного геля (рис.1):



где n – число гидратации.

Для протекания ЩКК необходимо выполнение трех обязательных условий: наличие химически активного кремнезема в заполнителе, высокий уровень щелочности порового раствора, а также высокая влажность. Без соблюдения какого-либо из этих факторов ЩКК-реакция не протекает.

INTRODUCTION

The external aggressive environment has a significant impact on concrete and reinforced concrete structures and buildings, such as sleepers, dams, bridges, etc. In particular, the destructive effect can be caused by alkalis in the pore solution in concrete when interacting with chemically active silica filler and subsequently forming a silicate gel. This type of chemical corrosion is called alkali-silica corrosion (ASC). A large number of theoretical and experimental studies have been carried out in this area. The chemical and physical processes underlying the ASC are quite complex and depend on a large number of different factors. The mechanism of alkali-silica corrosion for each case has not yet been fully elucidated [1-4].

The occurrence of a stress-strain state (SSS) in the contact zone of the reactive filler with the cement matrix is associated with the formation of an increased volume of new formations during the diffusion of water molecules into the silicate gel. As a result of excess pressure, concrete cracks and loses its strength and performance properties.

It is proposed to study the state of prestressed reinforced concrete structures during alkali-silica corrosion using an information model. This is due to the fact that studying a large number of parameters in a natural experiment is difficult to implement and even reliably impossible. The information model is based on a mathematical macromodel that links the process of swelling of silicate gel and the stress-strain state of the structure [5].

Alkali-silicate reaction

The process of ASC is multi-stage and takes place in several stages. Initially, the surface layer of silica SiO_2 absorbs OH^- anions. This initial contact leads to an active reaction, resulting in the depolymerization of silicon molecules, forming weak silicic acid:

where F is an alkali metal cation, often sodium Na.

The acid then continues to interact with other hydroxyl ions:

The resulting siliceous silicate (1,2) exhibits amorphous characteristics and hygroscopic properties. In the second stage, the silicate absorbs free water in the solution and destructively expands the alkali-silicate gel (Fig. 1):

where n is the hydration number.

For alkali-silica corrosion to occur, three essential conditions must be met: the presence of reactive silica in the aggregate, a high alkalinity level in the pore solution, and high humidity. Without any of these conditions, the alkali-silicate reaction does not occur.

РИСУНОК 1

УПРОЩЕННАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ЩЕЛОЧНО-КРЕМНЕЗЕМНОЙ КОРРОЗИИ [6]

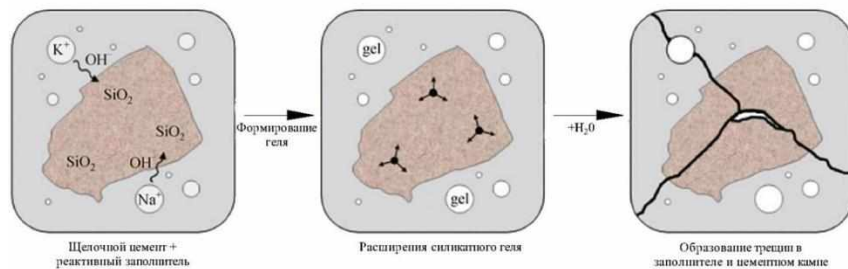


Figure 1

A simplified diagram of the alkali-silica corrosion process [6]

Основным фактором деструкции цементного камня являются внутренние напряжения, вызывающие трещинообразование и последующее развитие сети трещин под воздействием расширяющегося геля. Впервые Хансен [7] предложил теорию осмотического давления, которая предполагает, что продукты ЩКК реакционноспособного заполнителя ведут себя как полупроницаемая мембрана, через которую, в отличие от малых по размеру молекул воды, не могут диффундировать в окружающую среду молекулы полимера.

Кинетика набухания геля

В соответствии с исследованиями Танаки [8], полупроницаемая мембрана является подвижной и определяет границу образованного геля. При проникновении сквозь нее воды, гель набухает. Однако, согласно теории Флори-Хаггинса, при достаточном давлении внешней среды НДС на поверхности мембраны (σ_{sur}) уравнивается:

$$\sigma_{sur} = \sigma_{ext} - \sigma_{osm}, \tag{4}$$

где σ_{ext} – напряжение, создаваемое внешней средой; σ_{osm} – то же, создаваемое осмотическим воздействием расширяющегося геля.

Для определения величины осмотического давления получена математическая модель в уравнениях, описывающая упругие напряжения в полимерном геле в зоне контакта с цементной матрицей [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_{osm} &= E \cdot \left[\frac{V_1(t)}{V_0(t)} - 1 \right]^{\frac{1}{3}}; \\ V_n(t) &= \frac{4\pi}{3} \cdot [(R_0 + s)^3 - R_0^3]; \\ V_0(t) &= \frac{4\pi}{3} \cdot [R_0^3 - R_1^3], \end{aligned} \tag{5}$$

где, V_1 – объем геля в набухом состоянии; V_0 – то же, в исходном состоянии; R_0 – радиус заполнителя в исходном состоянии; R_1 – подвижная граница геля в набухом состоянии; s – упругая деформация сферы при набухании в бетоне; E – объемный модуль деформации.

Подстановкой V_0 и V_1 в (5) находим формулу для определения осмотического давления:

$$\sigma_{osm} = E \cdot \left[\frac{(R_0 + s)^3 - R_0^3}{R_0^3 - R_1^3} - 1 \right]^{\frac{1}{3}}, \tag{6}$$

Образование трещин происходит если суммарное напряжение в поверхностном слое силикатного геля

The main factor in the destruction of cement stone is internal stress, which causes crack formation and subsequent development of a network of cracks under the influence of the expanding gel. Hansen [7] was the first to propose a theory of osmotic pressure, which assumes that the ASC products of a reactive filler behave as a semi-impermeable membrane through which, unlike small water molecules, polymer molecules cannot diffuse into the surrounding environment.

Kinetics of gel swelling

According to Tanaka's research [8], the semipermeable membrane is mobile and defines the boundary of the formed gel. When water penetrates through it, the gel swells. However, according to the Flory-Huggins theory, under sufficient pressure of the external environment, the stress-strain state on the membrane surface (σ_{sur}) is balanced:

where σ_{ext} is the stress created by the external environment; σ_{osm} is the same, created by the osmotic effect of the expanding gel.

To determine the value of osmotic pressure, a mathematical model in equations was obtained that describes the elastic stresses in the polymer gel in the contact zone with the cement matrix [3]:

where V_1 is the volume of the gel in the swollen state; V_0 is the same, in the initial state; R_0 is the radius of the filler in the initial state; R_1 is the mobile boundary of the gel in the swollen state; s is the elastic deformation of the sphere during swelling in concrete; E is the bulk modulus.

By substituting V_0 and V_1 into (5) we find the formula for determining the osmotic pressure:

Cracks form if the total stress in the surface layer of silicate gel exceeds or is equal to the tensile strength of concrete:

превышает или равен прочности бетона на растяжение: $\sigma_{sur} \geq R_{bt}$. Следовательно, в сжатых зонах, особенно на начальных этапах, процесс растрескивания бетона под действием осмотических сил может купироваться. В растянутой же зоне железобетонной конструкции скорость образования и развития трещин, вызванных ЩКК-реакцией, наоборот усиливается до момента полного превращения кремнеземного полимера в силикат натрия [9]. Ввиду сложности и много стадийности протекания процессов ЩКК для всестороннего исследования поведения железобетонных конструкций при различном НДС необходимо построение информационной модели.

Формирование модели

В рассматриваемой модели анизотропия прочностных свойств бетона определяется потенциалом реакционной способности заполнителя и НДС конструкции. Применяются поправочные коэффициенты модификации для каждого направления для прочности бетона на сжатие k_{bi} , прочность на растяжение k_{bti} и модуль упругости k_{Ei} . Коэффициенты модификации определяются на основе прочностных свойств бетона без повреждений от ЩКК. Для существующих конструкций эти значения могут быть определены на основе испытаний материала кернов, извлеченных из неповрежденной части сооружения. Если это невозможно, оценка производится на основе лабораторных испытаний образца бетона, выдержанного в течение 28 суток или с учетом возраста конструкции.

Эксперименты Ферчи и Веккио [10] позволили создать базу данных по свойствам бетона, поврежденного щелочно-кремнеземной реакцией (ЩКК). В научных работах чаще всего описываются испытания стандартных бетонных образцов, которые не подвергались нагрузке во время реакции. В таких образцах трещины от ЩКК располагаются беспорядочно, создавая так называемую хаотическую «карту трещин».

Результаты были сгруппированы [10] по трем критериям:

- условиям нагружения образца во время реакции,
- величине деформации расширения от ЩКК
- направлению измерения прочности относительно приложенной ранее нагрузки.

Важно, что в рассмотренном исследовании реакционный бетон сравнивался с контрольными образцами, изготовленными из инертного заполнителя.

Коэффициенты модификации (k_{bi} , k_{bti} , k_{Ei}), определяющие изменение прочностных и деформационных характеристик бетона, были вычислены [6] по уравнениям (6 - 8). Их суть – в нормированном отношении механических свойств реакционного бетона к свойствам неактивного (контрольного) образца, с поправкой на начальное расхождение этих свойств в возрасте 28 суток (R_{bi28} , R_{bti28} и E_{i28}). Благодаря коэффициентам модификации, зная первичную степень повреждения контрольных образцов, возможно спрогнозировать дальнейшее ухудшения свойств бетона под действием коррозии. Сами коэффициенты модификации определяются следующим образом:

$$k_{bi} = \frac{R_{bir}/R_{biN}}{R_{bi28r}/R_{bi28N}}; \quad (7)$$

$$k_{bti} = \frac{R_{btir}/R_{btiN}}{R_{bti28r}/R_{bti28N}}; \quad (8)$$

$\sigma_{sur} \geq R_{bt}$. Consequently, in compressed zones, especially in the initial stages, the process of concrete cracking under the influence of osmotic forces can be stopped. In the stretched zone of a reinforced concrete structure, the rate of formation and development of cracks caused by the Alkali-silicate reaction, on the contrary, increases until the moment of complete transformation of the silica polymer into sodium silicate [9]. Due to the complexity and multi-stage nature of the alkali-silica corrosion processes, it is necessary to construct an information model for a comprehensive study of the behavior of reinforced concrete structures under various stress-strain states.

Formation of the model

In the model under consideration, the anisotropy of the strength properties of concrete is determined by the reactivity potential of the filler and the stress-strain state of the structure. Modification correction factors are applied for each direction for the concrete compressive strength k_{bi} , tensile strength k_{bti} and modulus of elasticity k_{Ei} . Modification coefficients are determined based on the strength properties of concrete without damage from the alkali-silica corrosion concrete. For existing structures, these values can be determined based on testing of core material extracted from the undamaged portion of the structure. If this is not possible, the assessment is made on the basis of laboratory tests of a concrete sample aged for 28 days or taking into account the age of the structure.

The experiments of Ferche and Vecchio [10] made it possible to create a database on the properties of concrete damaged by alkali-silica reaction (ASC). Scientific papers most often describe tests of standard concrete specimens that were not subjected to stress during the reaction. In such specimens, cracks from the ASC are randomly distributed, creating a so-called chaotic "crack map."

The results were grouped [10] according to three criteria:

- loading conditions of the specimen during the reaction,
- the magnitude of the expansion deformation from the ASC,
- the direction of strength measurement relative to the previously applied load.

It is important that in the study under consideration, reactive concrete was compared with control samples made from inert aggregate.

The modification coefficients (k_{bi} , k_{bti} , k_{Ei}), which determine the change in the strength and deformation characteristics of concrete, were calculated [6] using equations (6 - 8). Their essence lies in the normalized ratio of the mechanical properties of reactive concrete to the properties of a non-reactive (control) sample, with an adjustment for the initial divergence of these properties at the age of 28 days (R_{bi28} , R_{bti28} and E_{i28}). Thanks to modification coefficients, knowing the initial degree of damage of control samples, it is possible to predict further deterioration of concrete properties under the influence of corrosion. The modification coefficients are determined as follows:

$$k_{Ei} = \frac{E_{ir}/E_{iN}}{E_{i28r}/E_{i28N}}, \quad (9)$$

где индекс i представляет основное направление ($i = x, y, z$),

N – относится к нереакционному бетону,

r – реакционноспособный бетон.

Бетонные конструкции, как правило, испытывают длительные нагрузки (в частности, преднапряжение). В настоящем исследовании анализируется изменение свойств бетона в зависимости от типа напряженного состояния.

Для направлений, свободных от сжатия, поправочные коэффициенты ($k_{bi,free}$, $k_{bti,free}$, $k_{Ei,free}$), приведенные в уравнениях (10)-(11), заданы как функции параметра линейного расширения, вызванного ЩКК. Данные функциональные зависимости были получены [6] на основе экспериментальных значений, опубликованных Ферчи и Веккио [10]. Для долговременного напряженного состояния при одноосном растяжении использовался подход, аналогичный случаю свободной деформации.

$$k_{bi,free} = \begin{cases} 1,00 - 205,5 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & \varepsilon_{\text{ЩКК}} \leq 1,8 \cdot 10^{-3}; \\ 0,63 - 1,75 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 1,8 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} \leq 13,2 \cdot 10^{-3}; \\ 0,75 - 10,9 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 13,2 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} \leq 27,0 \cdot 10^{-3}; \\ 0,45 & \varepsilon_{\text{ЩКК}} > 27,0 \cdot 10^{-3}. \end{cases} \quad (10)$$

$$k_{bti,free} = \begin{cases} 1,00 - 475,9 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & \varepsilon_{\text{ЩКК}} \leq 0,6 \cdot 10^{-3} \\ 0,77 - 86,8 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 0,6 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} < 2,5 \cdot 10^{-3} \\ 0,70 - 60,0 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 2,5 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} < 5,0 \cdot 10^{-3} \\ 0,40 & \varepsilon_{\text{ЩКК}} \geq 5,0 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad (11)$$

$$k_{Ei,free} = \begin{cases} 1,00 - 344,4 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & \varepsilon_{\text{ЩКК}} \leq 1,8 \cdot 10^{-3} \\ 0,42 - 21,9 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 1,8 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} < 13,2 \cdot 10^{-3} \\ 0,19 - 4,35 \cdot \varepsilon_{\text{ЩКК}} & 13,2 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{\text{ЩКК}} < 27,0 \cdot 10^{-3} \\ 0,07 & \varepsilon_{\text{ЩКК}} \geq 27,0 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad (12)$$

В случае наличия сжимающих напряжений в конструкции, при определении снижения механических свойств бетона необходимо учитывать как коэффициент модификации свободных деформаций ($k_{bi,free}$, $k_{bti,free}$, $k_{Ei,free}$), так и элементарную деформацию (e_{bi}) в направлении сжимающих усилий. Она позволяет скорректировать значение разупрочнения бетона с учетом обжатого состояния конструкции.

Для расчета элементарной относительной деформации e_i используется символ e , а не общепринятый ε . Это сделано для того, чтобы подчеркнуть, что в расчете используется модуль упругости неповрежденного бетона, что соответствует линейной упругой модели.

Элементарная относительная деформация для сжатых направлений рассчитывается как:

$$e_{bi} = R_{bi}/E, \quad (13)$$

где R_b – долговременное напряжение при сжатии в главном направлении i ($i = x, y, z$);

E – модуль упругости бетона при текущем возрасте конструкции.

where the index i represents the principal direction ($i = x, y, z$),

N refers to non-reactive concrete,

r refers to reactive concrete.

Concrete structures are typically subjected to long-term loads (particularly prestressing). This study analyzes how concrete properties change depending on the type of stress state.

For directions free from compression, the correction factors ($k_{bi,free}$, $k_{bti,free}$, $k_{Ei,free}$) given in equations (10)-(11) are given as functions of the linear expansion parameter caused by the ASC. These functional dependencies were obtained [6] based on experimental values published by Ferche and Vecchio [10]. For the long-term stress state under uniaxial tension, an approach similar to the free deformation case was used.

In the case of the presence of compressive stresses in the structure, when determining the reduction in the mechanical properties of concrete, it is necessary to take into account both the free deformation modification coefficient ($k_{bi,free}$, $k_{bti,free}$, $k_{Ei,free}$) and the elementary deformation (e_{bi}) in the direction of compressive forces. It allows you to adjust the value of concrete softening taking into account the compressed state of the structure.

To calculate the elementary relative strain e_i , the symbol e is used, rather than the commonly used ε . This is done to emphasize that the calculation uses the elastic modulus of intact concrete, which corresponds to the linear elastic model.

The elementary relative deformation for compressed directions is calculated as:

where R_b is the long-term compressive stress in the principal direction i ($i = x, y, z$);

E is the modulus of elasticity of concrete at the current age of the structure.

Также, следует учесть, что при напряжениях до 0,3 МПа коэффициенты модификации (k_i) остаются постоянными, как и в случае без нагрузки. При превышении этого порога коэффициенты начинают расти, что демонстрирует положительную роль сжатия в замедлении разрушения от ЩКК. Этот эффект учтен через элементарную деформацию при заданном напряжении сжатия в 0,3 МПа. Наибольшее влияние напряжение оказывает на прочность при растяжении, затем на модуль упругости, и в меньшей степени – на прочность при сжатии.

Для сжатого бетона снижение его механических характеристик описывается функцией $k_i(R_{bi})$, приведенной в уравнении (13) [6]:

$$k_i = k_{i,free} + \frac{1}{1,05 \cdot \left(-\frac{\varepsilon_{ЩКК}}{e_i(R_{bi})}\right)^{0,09}} - \frac{1}{1,05 \cdot \left(-\frac{\varepsilon_{ЩКК}}{e_i(0)}\right)^{0,09}}, \quad (14)$$

где: $i = x, y, z$ – главные направления (сжатие принимается отрицательным);

R_{bi} – напряжение сжатия в направлении i ;

$k_{i,free}$ – коэффициент модификации для свободного расширения, рассчитанный по уравнениям (10-12);

$\varepsilon_{ЩКК}$ – величина относительной деформации при воздействии ЩКК;

e_{bi} – элементарная деформация в направлении i , соответствующая напряжению сжатия R_{bi} ;

$e_{bi}(0)$ – элементарная относительная деформация в направлении i , соответствующая пороговому напряжению сжатия 0,3 МПа.

На рис. 2 показана зависимость коэффициентов k от уровня сжимающего напряжения R для двух величин расширения ($0,5 \cdot 10^{-3}$ и $2,0 \cdot 10^{-3}$).

РИСУНОК 2

График зависимости коэффициентов модификации k от напряжения сжатия для $E = 25 \cdot 10^9$ Па [6]

Figure 2

Graph of the dependence of modification coefficients k on compressive stress for $E = 25 \cdot 10^9$ Pa [6]

It should also be taken into account that at stresses up to 0.3 MPa, the modification coefficients (k_i) remain constant, as in the case without load. When this threshold is exceeded, the coefficients begin to increase, which demonstrates the positive role of compression in slowing down the destruction from alkali-silica corrosion. This effect is taken into account through elementary deformation at a given compressive stress of 0.3 MPa. Stress has the greatest influence on tensile strength, then on elastic modulus, and to a lesser extent on compressive strength.

For compressed concrete, the reduction in its mechanical characteristics is described by the function $k_i(R_{bi})$, given in equation (13) [6]:

where: $i = x, y, z$ are the principal directions (compression is assumed to be negative);

R_{bi} is the compressive stress in the i -th direction;

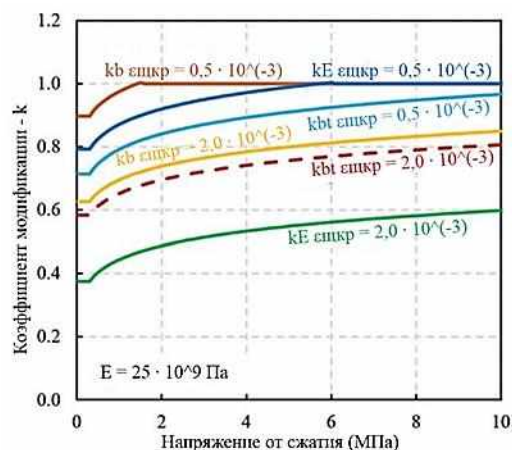
$k_{i,free}$ is the modification coefficient for free expansion, calculated using equations (10-12);

ε_{ASC} is the relative strain under the action of the SCK;

e_{bi} is the elementary strain in the i -th direction, corresponding to the compressive stress R_{bi} ;

$e_{bi}(0)$ is the elementary relative strain in the i -th direction, corresponding to the threshold compressive stress of 0.3 MPa.

Figure 2 shows the dependence of the coefficients k on the level of compressive stress R for two values of expansion ($0,5 \cdot 10^{-3}$ and $2,0 \cdot 10^{-3}$).



В рамках исследования [6] не учитывалось воздействие постоянных растягивающих напряжений, являющееся критически значимым фактором для динамики поправочных коэффициентов для предварительно напряженных конструкций. Работа [11] демонстрирует, что растягивающая нагрузка интенсифицирует деградацию прочностных и деформационных характеристик (прочности и модуля упругости) бетона, подверженного щелочно-кремнеземной реакции (ЩКР). Следует отметить, что физико-химический механизм данного явления на текущий момент исследован лишь на теоретическом уровне и требует верификации в ходе дальнейших экспериментов. В качестве гипотезы рассматривается синергетический эффект, сочетающий

The study [6] did not take into account the effect of constant tensile stresses, which is a critical factor for the dynamics of correction factors for prestressed structures. The work [11] demonstrates that tensile loading intensifies the degradation of strength and deformation characteristics (strength and modulus of elasticity) of concrete subjected to alkali-silica reaction (ASR). It should be noted that the physicochemical mechanism of this phenomenon has currently been studied only at a theoretical level and requires verification in the course of further experiments. A synergistic effect is considered as a hypothesis, combining a mechanical component—a superposition of external tensile and internal stresses from the expansion of reaction products—and a potential chemical

механическую составляющую — суперпозицию внешних растягивающих и внутренних напряжений от расширения продуктов реакции, — и потенциальную химическую составляющую. Вместе с тем, основываясь на аналогиях с пористыми средами [12-13], допустимо предположение, что развитая сеть микротрещин в цементной матрице может выступать в роли буфера, поглощая продукты реакции и тем самым нивелируя возникновение разрушающего внутреннего напряжения.

В первом приближении предположим, что железобетонная конструкция имеет высокий модуль упругости ($> 20 \cdot 10^9$ Па) и ширина раскрытия трещин, благодаря армирующим элементам, не превышает нормативных значений. Тогда определяем элементарную деформацию как:

$$e_{bti} = R_{bti}/E, \quad (15)$$

где R_{bt} — долговременное напряжение при растяжении в главном направлении i ($i = x, y, z$);

E — модуль упругости бетона при текущем возрасте конструкции.

Коэффициент модификации k для растянутой зоны описывается по аналогии с функцией для сжатия (14), однако пороговое значения растягивающий напряжений, как для сжатия $R = 0,3$ МПа, не учитывается:

$$k_{it} = k_{i,free} + \frac{1}{1,05 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{ЩКК}}{e_{bti}(R_{bti})} \right)^{0,09}}, \quad (16)$$

где: $i = x, y, z$ — главные направления (сжатие принимается отрицательным);

R_{bti} — постоянное напряжение сжатия в направлении i ;

$k_{i,free}$ — коэффициент модификации для свободного расширения, рассчитанный по уравнениям (10-12);

$\varepsilon_{ЩКК}$ — величина относительной деформации при ЩКК;

e_{bti} — элементарная относительная деформация в направлении i , соответствующая напряжению растяжения R_{bti} .

Описание модели

Для построения расчетной модели предполагается использование объемных конечных элементов с 4-8 узлами. В качестве базового допущения принимается условие идеального сцепления на границе раздела «бетон–арматура». Однако, в итерационных расчетах необходимо учитывать ослабления контакта между бетоном и армирующими элементами до 30-70 % [14]. Также условностью является применение нормативных значений предела текучести и модуль упругости стали, так как под воздействием сопутствующей ЩКК коррозии [15], полезная площадь сечения может уменьшиться.

Влияние щелочно-кремнеземной коррозии (ЩКК) учитывается введением понижающих коэффициентов к основным прочностным и деформационным характеристикам бетона. Величина этих коэффициентов является функцией от экспериментально полученных деформаций контрольных образцов и вида напряженного состояния. Значения модуля Пуассона принимается нормативным.

В расчете необходимо учитывать три различных случая:

1. Задание бетону физико-механических свойств, соответствующих нормативным показателям СП 63.13330.2018;

component. At the same time, based on analogies with porous media [12-13], it is permissible to assume that a developed network of microcracks in the cement matrix can act as a buffer, absorbing reaction products and thereby leveling the occurrence of destructive internal stress.

As a first approximation, let's assume that the reinforced concrete structure has a high modulus of elasticity ($> 20 \cdot 10^9$ Pa) and that the crack width, thanks to the reinforcing elements, does not exceed the standard values. Then we define the elementary deformation as:

where R_{bt} is the long-term tensile stress in the principal direction i ($i = x, y, z$);

E is the modulus of elasticity of concrete at the current age of the structure.

The modification coefficient k for the stretched zone is described by analogy with the function for compression (14), however, the threshold value of tensile stress, as for compression $R = 0.3$ MPa, is not taken into account:

where: $i = x, y, z$ are the principal directions (compression is assumed to be negative);

R_{bti} is the constant compressive stress in the i -th direction;

$k_{i,free}$ is the modification coefficient for free expansion, calculated using equations (10-12);

ε_{ASC} is the relative strain during ASC;

e_{bti} is the elementary relative strain in the i -th direction, corresponding to the tensile stress R_{bti} .

Model description

To construct the calculation model, it is assumed that volumetric finite elements with 4-8 nodes will be used. The basic assumption is the condition of ideal adhesion at the concrete-reinforcement interface. However, iterative calculations must take into account weakening of the contact between concrete and reinforcing elements by up to 30-70% [14]. The use of standard values for the yield strength and elastic modulus of steel is also arbitrary. This is due to the fact that, under the influence of concomitant alkali-silica corrosion [15], the effective cross-sectional area may decrease.

The influence of alkali-silica corrosion (ASC) is taken into account by introducing reduction factors to the main strength and deformation characteristics of concrete. The magnitude of these coefficients is a function of the experimentally obtained deformations of the control specimens and the type of stress state. The value of Poisson's modulus is accepted as standard.

Three different cases must be taken into account in the calculation:

1. Assigning physical and mechanical properties to concrete that correspond to the standard indicators of SP 63.13330.2018;

2. Применение в модели экспериментальных значений прочности на растяжение, сжатия и модуля упругости бетона в возрасте 28 суток без воздействия ЩКК;

3. Использование понижающих коэффициентов модификации k_i для R_{bt} , R_b , E с учетом экспериментальных значений относительных деформаций по всем направлениям.

Для количественной оценки влияния деформации, вызванной ЩКК, возможно применять как анизотропную модель, так и изотропную. Чарльзвуд [16] в своей анизотропной модели рассматривает как для расширения, так и свойства материалов независимо для каждого направления, в то же время Саума и Перотти [17] учитывают на модуль упругости давления силикатного геля. Как показало сравнение [6], анизотропное задание параметров модели точнее соответствуют экспериментальным значениям (деформации и прочность в зависимости от направления).

Наибольшее влияние на расчетные характеристики внецентренно-растянутого элемента оказывает: размытое/дискретное задание армирования, прочность сцепления между бетоном и арматурой, коррозия стали, величина и направление деформаций, вызванных ЩСР, корректность граничных условий, геометрическая и физическая нелинейность материалов.

Выводы

1. Для диагностики и прогнозирования состояния конструкций, подверженных щелочно-кремнеземной коррозии, целесообразно применять подходы информационного моделирования. В основе предлагаемой методики лежит макромодель, устанавливающая прямую связь между процессами набухания (инициированными коррозией поверхности заполнителя) и результирующим напряженно-деформированным состоянием конструкции как целостной системы. Основным инструментом для учета деградации бетона в модели являются коэффициенты модификации k_i для прочности на сжатие, растяжение и модуля упругости. Эти коэффициенты, полученные на основе обширной экспериментальной базы данных [10], позволяют анизотропно снижать механические характеристики бетона в зависимости от величины деформаций, вызванных ЩКК ($\epsilon_{ЩКК}$), величины и характера длительных эксплуатационных нагрузок (сжатие/растяжение).

2. Ключевым инструментом для описания деградации бетона в модели являются коэффициенты модификации (k_i), применяемые к характеристикам прочности при сжатии (R_b), растяжении (R_{bt}) и модулю упругости (E). Указанные коэффициенты, верифицированные на основе обширного массива экспериментальных данных [10], позволяют анизотропно редуцировать механические свойства бетона в зависимости от двух ключевых факторов:

- величины деформаций свободного набухания ($\epsilon_{ЩКК}$)
- параметров длительного эксплуатационного нагружения.

3. Результаты анализа демонстрируют существенную зависимость влияния ЩКР от внешнего напряженного состояния. Установлено, что сжимающие напряжения, превышающие пороговое значение в 0,3 МПа, оказывают ингибирующее воздействие на процесс деградации, что выражается в росте коэффициентов модификации k_i с увеличением уровня сжатия. Напротив, растягивающие напряжения, согласно гипотезе, должны интенсифицировать развитие деформаций ЩКК, однако данный тезис требует дальнейшего эмпирического подтверждения.

2. Application of experimental values of tensile strength, compressive strength and elastic modulus of concrete at the age of 28 days without exposure to ASC in the model;

3. Using the reduction factors of modification k_i for R_{bt} , R_b , E taking into account the experimental values of relative deformations in all directions. To quantitatively assess the influence of deformation caused by alkali-silica corrosion, it is possible to use both anisotropic and isotropic models. Charlowood [16] in his anisotropic model considers both the expansion and the properties of materials independently for each direction, while Saouma and Perotti [17] take into account the modulus of elasticity of the pressure of silicate gel. As the comparison [6] showed, the anisotropic assignment of model parameters more accurately corresponds to the experimental values (deformations and strength depending on the direction).

The greatest influence on the design characteristics of an eccentrically tensioned element is exerted by: the diffuse/discrete assignment of reinforcement, the strength of the bond between concrete and reinforcement, steel corrosion, the magnitude and direction of deformations caused by the alkali-silicate reaction, the correctness of the boundary conditions, and the geometric and physical nonlinearity of materials.

Conclusions

1. To diagnose and predict the condition of structures subject to alkali-silica corrosion, it is advisable to use information modeling approaches. The proposed method is based on a macromodel that establishes a direct connection between swelling processes (initiated by corrosion of the filler surface) and the resulting stress-strain state of the structure as an integral system. The main tool for taking into account the degradation of concrete in the model are the modification factors k_i for compressive strength, tensile strength and elastic modulus. These coefficients, obtained on the basis of an extensive experimental database [10], make it possible to anisotropically reduce the mechanical characteristics of concrete depending on the magnitude of deformations caused by the ASC (ϵ_{ASC}), the magnitude and nature of long-term operational loads (compression/tension).

2. The key tool for describing concrete degradation in the model is the modification factors (k_i) applied to the compressive strength (R_b), tensile strength (R_{bt}) and elastic modulus (E) characteristics. The specified coefficients, verified on the basis of a large array of experimental data [10], allow for anisotropic reduction of the mechanical properties of concrete depending on two key factors:

- the magnitude of free swelling deformations (ϵ_{ASC})
- the parameters of long-term operational loading.

3. The results of the analysis demonstrate a significant dependence of the influence of the alkali-silicate reaction on the external stress state. It has been established that compressive stresses exceeding the threshold value of 0.3 MPa have an inhibitory effect on the degradation process, which is expressed in an increase in the modification coefficients k_i with an increase in the compression level. On the contrary, tensile stresses, according to the hypothesis, should intensify the development of deformations of the joint, but this thesis requires further empirical confirmation.

4. Разработанная методика, базирующаяся на применении системы модифицирующих коэффициентов, интегрированных в среду информационной модели, представляет собой эффективный инструмент для оценки остаточного ресурса и долгосрочного прогнозирования поведения бетонных и железобетонных конструкций, подверженных щелочно-кремнеземной коррозии.

Литература:

1. Bazant Zdenec R., Alexandrer Steffens. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete // Cement and Concrete Research - 2000. - 30.3 - Pp. 419-438. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00270-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00270-7)
2. Mohammad S. Pourbehi, Gideon van Zijl, Breda Strasheim. Modelling of Alkali Silica Reaction in concrete structures for rehabilitation intervention // MATEC Web of Conferences 199 – 2018. – P. 11. <http://dx.doi.org/10.1051/matec-conf/201819903007>.
3. V. Troyan, N. Sova. / Improving the resistance of concrete for sleepers to the formation of delayed and secondary ettringite, the alkali-silica reaction, and electric corrosion // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2019. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185613>
4. Richard A. Deschenes Jr., Eric R. Giannini, Thanos Drimalas, Benoit Fournier, W. Micah Hale. Effects of Moisture, Temperature, and Freezing and Thawing on Alkali-Silica Reaction // ACI Materials Journal 115(4) – 2018 - Pp. 575-584. <https://doi.org/10.14359/51702192>
5. Гусев Б. В., Файвусович А. С. Физико-химико-математическая модель кинетики щелочно-кремнеземистой реакции в бетоне // Инновации и инвестиции. Строительство. - 2017. - № 8. - С. 141-149.
6. Anca C. Ferche, Frank J. Vecchio Modeling of Alkali-Silica Reaction-Affected Shear-Critical Reinforced Concrete Structures // ACI Materials Journal, V. 119, 2022. Pp. 75-88. <https://doi.org/10.14359/51734331>.
7. Hansen W C. Studies relating to the mechanism by which the alkali-aggregate reaction produces expansion in concrete // Journal of the American Concrete Institute – 1944. - Pp. 213–227.
8. Tanaka F., Li. Kinetics of swelling and shrinking of gels // Journal of Chemical Physics - 1990. Pp. 467-470. <https://doi.org/10.1063/1.458148>.
9. Cyrille F. Dunant, Karen L. Scrivener. Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete // Cement and Concrete Research – 2012 - № 42. - Pp. 567-576. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.004>
10. Ferche, A. C., Vecchio, F. J., Mechanical Properties of Alkali-Silica Reaction Affected Concrete // ACI Materials Journal – 2022. - V. 119, No. 1. - Pp. 251-262. <https://doi.org/10.14359/51734198>
11. Myklebust E. O. Assessment of an existing bridge suffering from Alkali-Silica reaction // Norwegian University of Science and Technology - 2018. P. 184.
12. Гусев Б. В., Файвусович А. С. Математическая модель процесса сульфатной коррозии бетона с учетом физико-химических превращений // Инновации и инвестиции – 2018. - № 11. – С. 240-255.
13. Collins, R. J., Vareham, P. D., Alkali-Silica Reaction: Suppression of Expansion Using Porous Aggregate // Cement and Concrete Research - 1987. - V. 17, No. 1 - Pp. 89-96. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90063-9)
14. Rami H. Haddad, Karim S. Numayr. Effect of alkali-silica reaction and freezing and thawing action on concrete-steel bond //

4. The developed methodology, based on the use of a system of modifying coefficients integrated into the information model environment, is an effective tool for assessing the residual life and long-term forecasting of the behavior of concrete and reinforced concrete structures subject to alkali-silica corrosion.

References

1. Bazant Zdenec R., Alexandrer Steffens. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete // Cement and Concrete Research - 2000. - 30.3 - Pp. 419-438. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00270-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00270-7)
2. Mohammad S. Pourbehi, Gideon van Zijl, Breda Strasheim. Modelling of Alkali Silica Reaction in concrete structures for rehabilitation intervention // MATEC Web of Conferences 199 – 2018. – P. 11. <http://dx.doi.org/10.1051/matec-conf/201819903007>.
3. V. Troyan, N. Sova. / Improving the resistance of concrete for sleepers to the formation of delayed and secondary ettringite, the alkali-silica reaction, and electric corrosion // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2019. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185613>
4. Richard A. Deschenes Jr., Eric R. Giannini, Thanos Drimalas, Benoit Fournier, W. Micah Hale. Effects of Moisture, Temperature, and Freezing and Thawing on Alkali-Silica Reaction // ACI Materials Journal 115(4) – 2018 - Pp. 575-584. <https://doi.org/10.14359/51702192>
5. Gusev B. V., Faivusovich A. S. Physicochemical-mathematical model of the kinetics of alkali-siliceous reaction in concrete // Innovatsii i investitsii. Stroitel'stvo. - 2017. - No. 8. - P. 141-149.
6. Anca C. Ferche, Frank J. Vecchio Modeling of Alkali-Silica Reaction-Affected Shear-Critical Reinforced Concrete Structures // ACI Materials Journal, V. 119, 2022. Pp. 75-88. <https://doi.org/10.14359/51734331>.
7. Hansen W C. Studies relating to the mechanism by which the alkali-aggregate reaction produces expansion in concrete // Journal of the American Concrete Institute – 1944. - Pp. 213–227.
8. Tanaka F., Li. Kinetics of swelling and shrinking of gels // Journal of Chemical Physics - 1990. Pp. 467-470. <https://doi.org/10.1063/1.458148>.
9. Cyrille F. Dunant, Karen L. Scrivener. Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete // Cement and Concrete Research – 2012 - № 42. - Pp. 567-576. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.004>
10. Ferche, A. C., Vecchio, F. J., Mechanical Properties of Alkali-Silica Reaction Affected Concrete // ACI Materials Journal – 2022. - V. 119, No. 1. - Pp. 251-262. <https://doi.org/10.14359/51734198>
11. Myklebust E. O. Assessment of an existing bridge suffering from Alkali-Silica reaction // Norwegian University of Science and Technology - 2018. P. 184.
12. Gusev B. V., Faivusovich A. S. Mathematical model of the process of sulfate corrosion of concrete taking into account physical and chemical transformations // Innovatsii i investitsii – 2018. - No. 11. – P. 240-255.
13. Collins, R. J., Vareham, P. D., Alkali-Silica Reaction: Suppression of Expansion Using Porous Aggregate // Cement and Concrete Research - 1987. - V. 17, No. 1 - Pp. 89-96. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90063-9)
14. Rami H. Haddad, Karim S. Numayr. Effect of alkali-silica reaction and freezing and thawing action on concrete-steel

Construction and Building Materials 21(2) – 2007 - Pp. 428 – 435.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.012>

15. Chirag Thummar, B. Kondraivendhan, Chetan Kumar D Modhera Review on Rebar Corrosion in Alkali-Activated Concrete Subjected to Chloride-Rich Environment // IOP Conference Series Earth and Environmental Science 1326(1)– 2024. – P. 12.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012048>

16. Charlwood, R. G. Solymar, S. V., Curtis, D. D. A Review of Alkali Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams // Proceedings of the International Conference of Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, Fredericton, NB, - 1992. - Pp. 220 – 224.

17. Saouma, V., and Perotti, L., Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions // ACI Materials Journal - 2006. - V. 103, No. 3. - Pp. 194-202.

bond // Construction and Building Materials 21(2) – 2007 - Pp. 428 – 435.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.012>

15. Chirag Thummar, B. Kondraivendhan, Chetan Kumar D Modhera Review on Rebar Corrosion in Alkali-Activated Concrete Subjected to Chloride-Rich Environment // IOP Conference Series Earth and Environmental Science 1326(1)– 2024. – P. 12.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012048>

16. Charlwood, R. G. Solymar, S. V., Curtis, D. D. A Review of Alkali Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams // Proceedings of the International Conference of Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, Fredericton, NB, - 1992. - Pp. 220 – 224.

17. Saouma, V., and Perotti, L., Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions // ACI Materials Journal - 2006. - V. 103, No. 3. - Pp. 194-202.

Бахарев Максим Витальевич – ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ))»,

E-mail: bacharevmax@mail.ru (автор для связи)

Кондращенко Валерий Иванович – доктор технических наук, старший научный сотрудник; профессор кафедры строительные материалы и технологии, ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ))»,

E-mail: kondrashchenko@mail.ru

Вклад авторов: Бахарев М.В. – проведение экспериментов, обработка материала, написание статьи, Кондращенко В.И. – идея, научное руководство, редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Bakharev Maxim Vitalievich –Russian University of Transport (RUT(MIIT)),

E-mail: bacharevmax@mail.ru (contact author)

Kondrashchenko Valery Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, senior researcher; Professor of the Department of Building Materials and Technologies, Russian University of Transport (RUT (MIIT)),

E-mail: kondrashchenko@mail.ru

Contribution of the author: Bakharev M.V. – conducting experiments, processing material, writing the article, Kondrashchenko V.I. – idea, scientific supervision, editing the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.