УДК 666.972
DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-822-3-31-36

У.А. НОВИКОВА[1], инженер (uliana.a.novikova@gmail.com),
К.Б. СТРОКИН[1], д-р экон. наук, советник РААСН (strokin07@rambler.ru);
И.А. КРАСИЛЬНИКОВА[2], канд. техн. наук (irinanebukina@rambler.ru)

[1] Сахалинский государственный университет (693008, г. Южно-Сахалинск, Коммунистический пр., 33)
[2] Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

Коррозионная стойкость торкрет-бетона в условиях воздействия растворов солей

Представлены результаты исследований коррозионной стойкости торкрет-бетона, нанесенного в качестве защитного покрытия на строительные конструкции. Разработана рецептура пяти составов торкрет-бетона, состоящего из основного и дополнительного вяжущих, заполнителей и ускорителей твердения. Исследованы размер и характер пор изготовленных образцов, развитие деструкции по изменению массы и прочности. Установлены физико-химические особенности коррозионного разрушения некоторых торкрет-бетонных составов в растворах сульфата натрия и хлорида натрия, определены коэффициенты диффузии хлорид-ионов и сульфат-ионов. Определены числовые значения параметров, лимитирующих массоперенос гидроксида кальция при коррозии торкрет-бетонов: коэффициенты массопроводности и массоотдачи.

Ключевые слова: торкрет-бетон, коррозия, массоперенос, жидкая агрессивная среда, концентрация гидроксида кальция, хлорид-ионы, сульфат-ионы, диффузия.

Для цитирования: Новикова У.А., Строкин К.Б., Красильникова И.А. Коррозионная стойкость торкрет-бетона в условиях воздействия растворов солей // *Строительные материалы.* 2024. № 3. С. 31–36. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-822-3-31-36

U.A. NOVIKOVA[1], Engineer (uliana.a.novikova@gmail.com), K.B. STROKIN[1], Doctor of Sciences (Economics), Advisor to the RAASN (strokin07@rambler.ru);
I.A. KRASILNIKOVA[2], Candidate of Sciences (Engineering) (irinanebukina@rambler.ru)
[1] Sakhalin State University (33, Kommunisticheskiy Avenue, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russian Federation)
[2] Vladimir State University (87, Gorky Street, Vladimir, 600000, Russian Federation)

Corrosion Resistance of Shotcrete under the Influence of Salt Solutions

The article describes the relevance of new scientific research on the corrosion resistance of shotcrete applied as a protective coating on building structures. A formulation has been developed for five compositions of shotcrete, consisting of a basic and additional binder, fillers and hardening accelerators. The size and nature of the pores of the manufactured samples, the development of destruction by changes in mass and strength are investigated. The physicochemical features of the corrosive destruction of some shotcrete compositions in solutions of sodium sulfate and sodium chloride have been established, and the diffusion coefficients of chloride ions and sulfate ions have been determined. The numerical values of the parameters limiting the mass transfer of calcium hydroxide during corrosion of shotcrete are determined: the coefficients of mass conductivity and mass transfer.

Keywords: shotcrete, corrosion, mass transfer, liquid aggressive medium, concentration, calcium hydroxide, chloride ions, sulfate ions, diffusion.

For citation: Novikova U.A., Strokin K.B., Krasilnikova I.A. Corrosion resistance of shotcrete under the influence of salt solutions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2024. No. 3, pp. 31–36. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-822-3-31-36

Одним из прогрессивных способов выполнения бетонных работ является метод торкретирования. Торкретирование целесообразно в тех случаях, когда необходимо бетонировать строительные конструкции сложной конфигурации и незначительной толщины, при возведении которых возникают трудности, связанные с уплотнением бетонных смесей вибраторами, и требуются значительные затраты на изготовление опалубки, а также в тех случаях, когда к бетону предъявляются повышенные требования по коррозионной стойкости, водонепроницаемости и морозостойкости [1]. Особенно эффективно применение торкрет-бетона при сооружении пространственных конструкций покрытий зданий (куполов, оболочек), резервуаров различного типа и назначения, элементов наружных трехслойных конструкций производственных зданий с эффективным утеплителем, в качестве облицовки небольших водопропускных сооружений, поверхностей каналов и т. д. Применение торкретирования для ремонта и усиления поврежденных конструкций многих промышленных и гражданских сооружений является наиболее эффективным и нередко единственно возможным способом [2].

Целесообразен поиск решения проблемы прогнозирования долговечности бетонных и железобетонных конструкций в агрессивных средах, поскольку своевременная их защита позволит значительно сократить экономический ущерб от последствий коррозионных разрушений, повысить надежность конструкций, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности, снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций [3]. Необходимо фокусировать исследования на расширении комплекса прочностных и антикоррозионных свойств железобетона в соответствии с множеством вариантов его применения. В связи с вышеизложенным представленная работа является актуальной [4, 5].

В зарубежной и отечественной литературе в основном описана технология торкрет-бетона с указа-

Таблица 1
Table 1

Состав смесей для нанесения торкрет-бетонного покрытия на 1 м^3
Composition of mixtures for applying shotcrete coating per 1 m^3

Исходные материалы	Расход для изготовления торкрет-бетонной смеси по образцам различных серий, кг				
	А	Б	В	Г	Д
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	450	450	450	410	410
Зола	0	0	0	45	0
Микрокремнезем	0	0	0	0	45
Крупный заполнитель – щебень	910	910	910	910	910
Мелкий заполнитель – песок	900	900	900	900	900
Ускоритель твердения ($NaAlO_2$+ $2CaO{\cdot}SiO_2$)	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
Вода	157,5	202,5	247,5	184,5	184,5
В/Ц	0,35	0,45	0,55	0,45	0,45

Таблица 2
Table 2

Относительное изменение массы и прочности образцов при сжатии
Relative change in the mass and strength of the samples during compression

Серия образцов	Изменение массы, %, в 5%-м растворе		Изменение прочности при сжатии, %, в 5%-м растворе	
	Na_2SO_4	NaCl	Na_2SO_4	NaCl
А	1,052	0,739	-5,576	-2,864
Б	1,579	1,225	-7,205	-4,362
В	2,156	1,801	-9,928	-7,205
Г	0,617	0,425	-1,852	-0,719
Д	-0,719	-0,223	-15,443	-10,727

нием областей его применения, требования к материалам для изготовления торкрет-бетона, указаны основные свойства: прочность, водонепроницаемость. Сведения о коррозионных характеристиках торкрет-бетона практически отсутствуют [1–6].

Для назначения торкрет-бетона в качестве защиты железобетонных конструкций от агрессивных воздействий среды необходимы данные о его сульфатостойкости и проницаемости для хлоридов как наиболее агрессивных сред. Недостаточная изученность коррозионных свойств торкрет-бетона ограничивает области его применения не только для бетонирования новых конструкций, но и для ремонтных работ [7, 8].

На основании аналитического обзора научно-технической, нормативной и методической литературы по применению торкрет-бетонов разработана программа исследований, в основу которой положен подбор составов и изготовление торкрет-бетона с заданными физико-механическими свойствами. По результатам определения прочности при сжатии выбраны оптимальные составы и изготовлены образцы торкрет-бетона для изучения коррозионных свойств [9–11].

В представленной работе приведены результаты исследования кинетики изменения физических, механических и химических свойств торкрет-бетонов при воздействии жидких агрессивных сред. На основе полученных экспериментальных данных определены числовые значения параметров, лимитирующих массоперенос при коррозии торкрет-бетонов: коэффициенты диффузии гидроксида кальция и солей, коэффициенты массоотдачи.

Исследования проводились на образцах, изготовленных из портландцемента с нормированным составом заполнителей и добавок, с различным водоцементным отношением (табл. 1). Торкретирование выполнялось мокрым способом послойно [12]. Слои наносились горизонтальными полосами шириной около 1 м, сразу по всей ширине покрываемой поверхности опалубки с перекрытием соседних. В течение 7 сут после изготовления полученные торкрет-бетонные плиты периодически увлажняли. Затем выбуривали керны различной формы и размера, в зависимости от вида испытания. После 28 сут первоначального отверждения образцы торкрет-бетона погружали в агрессивные солевые 5%-е водные растворы сульфата натрия и хлорида натрия.

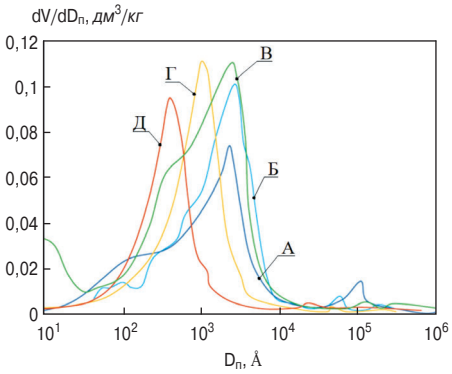

Рис. 1. Распределение пор по размерам различных торкрет-бетонных смесей: $D_п$ – диаметр пор, Å; $dV/dD_п$ – изменение объема пор, дм^3/кг$_{бетона}$

Fig. 1. Pore size distribution of various shotcrete mixtures: $D_п$ – pore diameter, Å; $dV/dD_п$ – change in pore volume, dm^3/kg$_{concrete}$

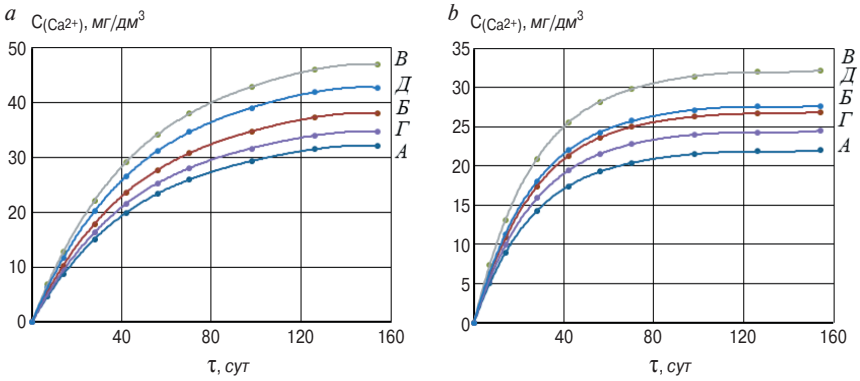

Рис. 2. Изменение концентраций катионов Ca^{2+} при погружении образцов в раствор хлорида (*a*) и сульфата (*b*) натрия для различных образцов

Fig. 2. Changes in the concentrations of Ca^{2+} cations when samples are immersed in a solution of sodium chloride (*a*) and sulfate (*b*) for various samples

Таблица 3
Table 3

Экспериментально рассчитанные характеристики массопереноса гидроксида кальция из торкрет-бетона
Experimentally calculated characteristics of calcium hydroxide mass transfer from shotcrete

Параметр массопереноса	Значения в образцах серий				
	А	Б	В	Г	Д
На 30-е сут					
Коэффициент массоотдачи, м/с	$7{,}03\cdot10^{-7}$	$4{,}13\cdot10^{-7}$	$2{,}89\cdot10^{-7}$	$2{,}17\cdot10^{-7}$	$1{,}74\cdot10^{-7}$
Коэффициент массопроводности, $м^2/с$	$3{,}5\cdot10^{-12}$	$4{,}63\cdot10$	$5{,}89\cdot10^{-12}$	$3{,}65\cdot10^{-12}$	$5{,}3\cdot10^{-12}$
На 160-е сут					
Коэффициент массоотдачи, м/с	$7{,}15\cdot10^{-7}$	$3{,}98\cdot10^{-7}$	$2{,}91\cdot10^{-7}$	$2{,}19\cdot10^{-7}$	$1{,}75\cdot10^{-7}$
Коэффициент массопроводности, $м^2/с$	$3{,}06\cdot10^{-9}$	$4{,}1\cdot10^{-9}$	$4{,}95\cdot10^{-9}$	$3{,}82\cdot10^{-9}$	$4{,}7\cdot10^{-9}$

Таблица 4
Table 4

Изменение концентрации ионов хлора в растворе для системы NaCl – торкрет-бетон
Change in the concentration of chlorine ions in the solution for the system NaCl – shotcrete-concrete

Серия образцов	Продолжительность взаимодействия, сут									
	0	7	14	28	42	56	70	98	126	154
А	31,4	15	6,5	4,2	3,8	3,5	3,2	2,8	2,7	2,6
Б	31,4	12,5	5,4	3,5	3,2	3	2,7	2,4	2,3	2,2
В	31,4	11,4	5	3,2	2,9	2,7	2,5	2,2	2,1	2
Г	31,4	20,9	9,1	5,9	5,4	5,1	4,6	4,1	3,9	3,7
Д	31,4	10,1	4,4	2,9	2,6	2,4	2,2	1,9	1,9	1,8

Для изучения свойств, структуры и состава исследуемых в работе материалов (твердой и жидкой фазы) до и после воздействия агрессивной солевой среды проведены экспериментальные исследования с применением методов химического и физико-химического анализа: методики определения плотности, водопоглощения, пористости и прочности цементного камня; анализа распределения пор по размеру; рентгенографического анализа; дифференциально-термического анализа; количественного анализа катионов кальция; электрометрического метода для измерения водородного показателя pH среды; прямого титрования [13–17].

Распределение пор по размерам различных торкрет-бетонных смесей, измеренное с помощью ртутного порозиметра AutoPore IV 9520, показано на рис. 1. Установлено, что смешанные бинарные вяжущие с добавлением золы или кремнезема имеют более мелкую структуру пор по сравнению с обычными вяжущими, изготовленными только на портландцементе с ускорителем твердения. Общий объем пор образцов различного состава распределен следующим образом: А, Б, В>Г>Д. Смеси, изготовленные с соотношением В/Ц 0,35, обладают наименьшим объемом внедренных пор, а смеси, содержащие 10% кремнезема, имеют большой объем мелких пор.

После 10 месяцев непрерывного полного погружения в 5%-е растворы сульфата натрия и хлорида натрия, все образцы торкрет-бетона остались визуально неповрежденными, кроме образцов серии Д, содержащих кремнезем. Образцы, модифицированные золой-уноса, продемонстрировали лучшую устойчивость к повреждению поверхности по сравнению с другими образцами. Способность связывания хлорид-ионов может быть значительно улучшена благодаря большему содержанию гелей гидратированного силиката кальция в вяжущих для летучей золы. Добавление золы-уноса в качестве частичной замены портландцемента оказалось действенной контрмерой для снижения степени повреждения поверхности.

Таблица 5
Table 5

Коэффициенты диффузии ($м^2/с$) сульфат- и хлорид-ионов
Diffusion coefficients (m^2/s) of sulfate and chloride ions

Серия образцов	SO_4^{2-}		Cl^-	
	на 30-е сут	на160-е сут	на 30-е сут	на160-е сут
А	$3{,}3\cdot10^{-12}$	$2{,}7\cdot10^{-12}$	$4{,}5\cdot10^{-12}$	$3{,}8\cdot10^{-12}$
Б	$4{,}2\cdot10^{-12}$	$3{,}5\cdot10^{-12}$	$7{,}1\cdot10^{-12}$	$5{,}7\cdot10^{-12}$
В	$5{,}8\cdot10^{-12}$	$4{,}6\cdot10^{-12}$	$11{,}6\cdot10^{-12}$	$8{,}9\cdot10^{-12}$
Г	$1{,}2\cdot10^{-12}$	$1{,}1\cdot10^{-12}$	$1{,}3\cdot10^{-12}$	$1{,}2\cdot10^{-12}$
Д	$10{,}5\cdot10^{-12}$	$7{,}8\cdot10^{-12}$	$18{,}7\cdot10^{-12}$	$13{,}4\cdot10^{-12}$

В целом все образцы торкрет-бетона, погруженные в растворы солей, теряли прочность, что указывает на развитие деструкции (табл. 2). Максимальная потеря прочности наблюдалась у образцов, содержащих 10% кремнезема в качестве частичной замены портландцемента. Полученный результат явился прогнозируемым, потому что образование таумасита наряду с эттрингитом и гипсом серьезно ухудшило коррозионную стойкость [18]. Очевидно, что частичная замена портландцемента золой-уноса продемонстрировала превосходную производительность при сульфатном или хлоридном воздействии по сравне-

нию с другими смесями. Таким образом, использование диоксида кремния в качестве частичной замены портландцемента не подходит для торкрет-бетона в средах, содержащих сульфаты.

Экспериментальные исследования массопереноса при коррозии образцов из торкрет-бетона в 5%-х растворах сульфата натрия и хлорида натрия проведены на образцах цилиндрической формы диаметром 70 мм, толщиной 30 мм.

Известно, что за стабильность существования высокоосновных соединений бетона (алита, белита, трехкальциевого алюмината, четырехкальциевого алюмоферрита) отвечает свободный гидроксид кальция, содержащийся в порах бетона. Именно свободный гидроксид кальция определяет массоперенос в системе цементный бетон—жидкая среда, изменения содержания которого в теле бетона приводят к коррозии первого вида [19, 20], а в конечном итоге к негативным необратимым последствиям для долговечности конструкций.

Кинетика процесса изучалась методом объемного титрования. Данным методом проводился контроль содержания катионов кальция в растворах, результаты которого представлены на рис. 2. Полученные данные позволили определить по общепринятым методикам [21—23] коэффициенты массопереноса гидроксида кальция для рассматриваемой системы (табл. 3).

Одновременно с катионами кальция отслеживалось изменение концентраций хлоридов, сульфатов в реакционной среде (табл. 4, 5). Кроме того, учитывалось, что скорость коррозии образцов определяется диффузией сульфатов и хлоридов. Метод определения диффузионной проницаемости торкрет-бетона для хлоридов основан на аналогии между диффузионным потоком вещества и электрическим током в теле бетона. Результаты определения диффузионной проницаемости для хлоридов водонасыщенных образцов торкрет-бетона приведены табл. 6. Диффузионная проницаемость торкрет-бетона для хлоридов и сульфатов со временем по мере гидратации цемента и уплотнения бетона снижается.

На основании выполненных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Торкрет-бетоны, модифицированные золой-уноса, имеют лучшую коррозионную стойкость по сравнению с другими образцами. Высокое содержание оксида алюминия и низкое содержание трехкальциевого алюмината в образцах с золой-уноса не способствовало образованию эттрингита.

2. В целом все образцы торкрет-бетона, погруженные в растворы солей, теряют прочность при сжатии, что указывает на деструкцию и повреждения. Максимальная потеря прочности наблюдалась у образцов, содержащих 10% кремнезема в качестве частичной замены портландцемента.

3. Использование диоксида кремния в качестве частичной замены портландцемента не подходит для торкрет-бетона в средах, содержащих сульфаты. Кроме того, образцы в растворах хлоридов показали меньшую потерю прочности, чем образцы в растворах сульфатов. Эти результаты согласуются с результатами массового и визуального контроля, а также с результатами аналогичных исследований, выполненных другими учеными.

4. Полученные результаты коррозионных испытаний позволяют рассматривать торкрет-бетон в качестве эффективной защиты бетонных и железобетонных конструкций от коррозии.

Список литературы

1. Лесовик В.С., Федюк Р.С., Панарин И.И. Торкрет-бетоны и инъекционные растворы для комплексного ремонта подземных сооружений // *Academia. Architecture and construction*. 2023. № 1. С. 101—107. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-1-101-107
2. Chongming Tian, Yueping Tong, Junyuan Zhang, Fei Ye, Guifeng Song, Yin Jiang, Meng Zhao. Experimental study on mix proportion optimization of anti-calcium dissolution shotcrete for tunnels based on response surface methodology. *Underground Space*. 2024. Vol. 15, pp. 203—220. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.07.002
3. Fedosov S.V., Bulgakov B.I., Krasilnikov I.V., Hung N.X., Lam T.V. Forecast of the durability of shore structures made of reinforced concrete. *Solid State Phenomena*. 2022. Vol. 334, pp. 217—224. DOI: 10.4028/p-8657j1
4. Renhe Yang, Tingshu He, Mengqin Guan, Xinqi Guo, Yilun Xu, Rongsheng Xu, Yongqi D. Preparation and accelerating mechanism of aluminum sulfate-based alkali-free accelerating additive for sprayed concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. 234. 117334. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117334

References

1. Lesovik V.S., Fedyuk R.S., Panarin I.I. Shotcrete-concretes and injection solutions for complex repair of underground structures. *Academia. Architecture and construction*. 2023. No. 1, pp. 101—107. (In Russian). DOI: 10.22337/2077-9038-2023-1-101-107.
2. Chongming Tian, Yueping Tong, Junyuan Zhang, Fei Ye, Guifeng Song, Yin Jiang, Meng Zhao. Experimental study on mix proportion optimization of anti-calcium dissolution shotcrete for tunnels based on response surface methodology. *Underground Space*. 2024. Vol. 15, pp. 203—220. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.07.002
3. Fedosov S.V., Bulgakov B.I., Krasilnikov I.V., Hung N.X., Lam T.V. Forecast of the durability of shore structures made of reinforced concrete. *Solid State Phenomena*. 2022. Vol. 334, pp. 217—224. DOI: 10.4028/p-8657j1
4. Renhe Yang, Tingshu He, Mengqin Guan, Xinqi Guo, Yilun Xu, Rongsheng Xu, Yongqi D. Preparation and accelerating mechanism of aluminum sulfate-based alkali-free accelerating additive for sprayed concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. 234. 117334. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117334

5. Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Баев С.М. Определение коррозионной стойкости торкрет-бетона как защитного покрытия бетонных и железобетонных конструкций // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 69–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-69-72.
6. Федосов С.В., Красильников И.В., Румянцева В.Е., Красильникова И.А. Физические особенности проблем жидкостной коррозии железобетона с позиций теории тепломассопереноса // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2023. Т. 19. № 4. С. 392–409. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-392-409
7. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости. М.: ФГУП ЦПП. 2006. 520 с.
8. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. Research of physical and chemical processes in the system «cement concrete – liquid aggressive environment». *ChemChemTech*. 2022. Vol. 65. No. 7, pp. 61–70. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6606
9. Smirnova N.N., Krasil'nikov I.V. An effect of the nature of immobilized components on the adsorption and mass transfer properties of ultrafiltration membranes based on sulfonate-containing copolyamide. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2019. Vol. 92, pp. 1570–1580. DOI: 10.1134/S1070427219110144
10. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. Математическое моделирование нестационарного массопереноса в системе «цементный бетон – жидкая среда», лимитируемого внутренней диффузией и внешней массоотдачей // *Строительные материалы*. 2022. № 1–2. С. 134–140. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-134-140
11. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. Математическое моделирование массопереноса в системе цементный бетон–жидкая среда, лимитируемого внутренней диффузией переносимого компонента при жидкостной коррозии первого вида // *Строительные материалы*. 2021. № 7. С. 4–9. DOI: https://doi.Org/10.31659/0585-430X-2021 -793-7-4-9
12. Ayumi Manawadu, Pizhong Qiao. Cohesive fracture simulation and failure modes of shotcrete-concrete interface bond in Mode II loading. *Engineering Fracture Mechanics*. 2024. Vol. 299. 109959. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.109959.
13. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Касьяненко Н.С. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов. Малые значения чисел Фурье, с внутренним источником массы // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2015. Т. 58. № 1.С. 97–99.
14. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Касьяненко Н.С. Теоретические и экспериментальные исследования процессов коррозии первого вида цементных бетонов при наличии вну-

5. Stepanova V.F., Rozental N.K., Chekhny G.V., Baev S.M. Determination of corrosion resistance of shotcrete as a protective coating of concrete and reinforced concrete structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 69–72. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-69-72
6. Fedosov S.V., Krasilnikov I.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikova I.A. Physical features of the problems of liquid corrosion of reinforced concrete from the standpoint of the theory of heat and mass transfer. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023. No. 19 (4), pp. 392–409. (In Russian). DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-392-409
7. Rosental N.K. Korrozionnaja stojkost' cementnyh betonov nizkoj i osobo nizkoj pronicaemosti [Corrosion resistance of cement concrete of low and particularly low permeability]. Moscow: FSUE CPP. 2006. 520 p.
8. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. Research of physical and chemical processes in the system "cement concrete – liquid aggressive environment". *ChemChemTech*. 2022. Vol. 65. No. 7, pp. 61–70. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6606
9. Smirnova N.N., Krasilnikov I.V. An effect of the nature of immobilized components on the adsorption and mass transfer properties of ultrafiltration membranes based on sulfonate-containing copolyamide. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2019. Vol. 92. No. 11, pp. 1570–1580. DOI: 10.1134/S1070427219110144
10. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. Mathematical modeling of unsteady mass transfer in the cement concrete-liquid medium system, limited by internal diffusion and external mass transfer. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 1–2, pp. 134–140. (In Russian). DOI: https://doi.Org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-134-140
11. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. Mathematical modeling of mass transfer in the "cement concrete-liquid medium" system, limited by the internal diffusion of the transferred component at liquid corrosion of the first type. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 7, pp. 4–9. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-4-9
12. Ayumi Manawadu, Pizhong Qiao. Cohesive fracture simulation and failure modes of shotcrete-concrete interface bond in Mode II loading. *Engineering Fracture Mechanics*. 2024. Vol. 299. 109959. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.109959
13. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Krasilnikov I.V., Kas'janenko N.S. Non-stationary mass transfer in the processes of corrosion of the second type of cement concrete. Small Fourier numbers, with internal mass source. *Izvestiya of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2015. Vol. 58. No. 1, pp. 97—99. (In Russian).
14. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Krasilnikov I.V., Kas'janenko N.S. Theoretical and experimental studies of processes of corrosion of the first kind of cement concretes in the presence of inner source of mass.

треннего источника массы // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 44–47.
15. Красильников И.В. Определение параметров процесса неизотермического массопереноса при жидкостной коррозии бетонов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2022. № 1. С. 99–109. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.1.09
16. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Касьяненко Н.С. Моделирование массопереноса в процессах коррозии первого вида цементных бетонов в системе «жидкость–резервуар» при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе // *Вестник гражданских инженеров*. 2013. № 2 (37). С. 65–70. DOI: 10.1088/1757- 899X/456/1/012039
17. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В. Методы математической физики в приложениях к проблемам коррозии бетона в жидких агрессивных средах. М.: АСВ, 2021. 246 с.
18. Zhang Y., Xu M., Song J., Wang Ch., Wang X., Hamad B.A. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO_2 corrosion in ultra-high-temperature acid gas wells // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 323. 125879. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125879
19. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Monitoring of the penetration of chloride ions to the reinforcement surface through a concrete coating during liquid corrosion. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018. 463(4):042048. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042048
20. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S. Physical and mathematical modelling of the mass transfer process in heterogeneous systems under corrosion destruction of reinforced concrete structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012039
21. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Логинова С.А. Исследование влияния процессов массопереноса на надежность и долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 52–57. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-755-12-52-57
22. Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А., Новикова У.А., Строкин К.Б. Изменение несущей способности строительных конструкций предприятий текстильной и легкой промышленности // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2023. № 2 (404). С. 218–227.
23. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Федосова Н.Л. Исследование диффузионных процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2015. Т. 58. № 1. С. 99–104.

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2013. No. 6, pp. 44—47. (In Russian).
15. Krasilnikov I.V. Determination of the parameters of the nonisothermal mass transfer process during liquid corrosion of concrete. *Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanism*. 2022. No. 1, pp. 99–109. (In Russian). DOI: 10.15593/2409-5125/2022.1.09
16. Fedosov S.V., Rumyanceva V.E., Krasilnikov I.V., Kasyanenko N.S. Modeling of mass transfer in the processes of corrosion of the first type of cement concrete in the "liquid–reservoir" system in the presence of an internal source of mass in the solid phase. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2013. No. 2 (37), pp. 65–70. (In Russian).
17. Fedosov S.V., Rumyanceva V.E., Krasilnikov I.V. Metody matematicheskoj fiziki v prilozhenijah к problemam korrozii betona v zhidkih agressivnyh sredah [Methods of mathematical physics in applications to the problems of concrete corrosion in liquid aggressive media]. Moscow: ASV. 2021. 246 p.
18. Zhang Y., Xu M., Song J., Wang Ch., Wang X., Hamad B.A. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO_2 corrosion in ultra-high-temperature acid gas wells. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 323. 125879. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.125879
19. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Monitoring of the penetration of chloride ions to the reinforcement surface through a concrete coating during liquid corrosion. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463 (4). 042048. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042048
20. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S. Physical and mathematical modelling of the mass transfer process in heterogeneous systems under corrosion destruction of reinforced concrete structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012039
21. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Loginova S.A. Study of effect of mass transfer processes on reliability and durability of reinforced concrete structures operating in liquid aggressive media. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 12, pp. 52–57. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-755-12-52-57
22. Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A., Novikova U.A., Strokin K.B. Changing the bearing capacity of building structures of textile and light industry enterprises. *Izvestiya of higher educational institutions. Textile industry technology*. 2023. No. 2 (404), pp. 218–227. (In Russian).
23. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Krasilnikov I.V., Fedosova N.L. Study of diffusion processes of mass transfer during liquid corrosion of the first type of cement concrete. *Izvestiya of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2015. Vol. 58. No. 1, pp. 99–104. (In Russian).