

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-36-41>

УДК 69.059.7 (075.8)

## Сцепление бетона восстановления с коррозионно-деструктурированной железобетонной конструкцией

Доктора техн. наук, профессора В. В. Молодин<sup>1)</sup>, С. Н. Леонович<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Новосибирск, Российская Федерация),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Сцепление бетонов является решающим фактором при восстановлении работоспособности железобетонных конструкций. Во время эксплуатации железобетона в агрессивной среде агрессивные агенты через поры и капилляры проникают к арматуре, которая начинает корродировать. Образующиеся продукты коррозии обладают большим объемом, чем сам металл, и создают давление на защитный слой бетона изнутри. В конечном счете, он отслаивается, незащищенная арматура еще интенсивнее разрушается, и вскоре конструкция теряет несущую способность. Стандартное восстановление включает в себя очистку поврежденной поверхности, дополнительное армирование и обетонирование конструкции. Однако часто спустя некоторое время наблюдается отслоение ремонтного бетона. Это происходит потому, что поврежденный коррозией слой не обеспечивает качественного сцепления «старого» бетона с «новым». Причина – в разрушении структуры поверхностного слоя бетона агрессивными воздействиями. В большинстве случаев агрессивным агентом выступает углекислый газ. Исследование влияния углекислого газа на цементный камень показало разрушение кристаллического каркаса материала и снижение его когезионной прочности. Микрофотографии поврежденного и неповрежденного коррозией цементного камня, сделанные с увеличением в 7000 раз, убедительно демонстрируют результаты разрушительной работы углекислоты. Это существенно влияет на сцепление. Применение форсированного разогрева ремонтной смеси при ее укладке в контакт с поверхностью восстанавливаемой конструкции ведет к появлению температурных градиентов, усиливающих термодиффузию. И чем больше температурный градиент, тем интенсивнее и глубже проникновение продуктов растворения цемента из ремонтного бетона в тело бетона восстанавливаемой конструкции. А это, в свою очередь, способствует пропитыванию поврежденного цементного камня жидкой фазой из ремонтной бетонной смеси. Кристаллизуясь, продукты растворения цемента формируют в поврежденном цементном камне новую кристаллическую структуру, которая усиливает его когезионную прочность и связывает ремонтный бетон с неповрежденной структурой бетона восстанавливаемой конструкции, гарантируя качество сцепления.

**Ключевые слова:** железобетонные конструкции, восстановление, углекислый газ, карбонизация бетона, сцепление бетонов, бетонная смесь, форсированный разогрев

**Для цитирования:** Молодин, В. В. Сцепление бетона восстановления с коррозионно-деструктурированной железобетонной конструкцией / В. В. Молодин, С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 1. С. 36–41. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-36-41>

## Bonding of Recovery Concrete with Corrosion-Destroyed Reinforced Concrete Structure

V. V. Molodin<sup>1)</sup>, S. N. Leonovich<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Novosibirsk, Russian Federation),

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The adhesion of concrete is a decisive factor in restoring the performance of reinforced concrete structures. During the operation of reinforced concrete in an aggressive environment, aggressive agents penetrate through the pores

---

### Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 368-61-56  
leonovichsn@tut.by

### Address for correspondence

Leonovich Sergey N.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 368-61-56  
leonovichsn@tut.by

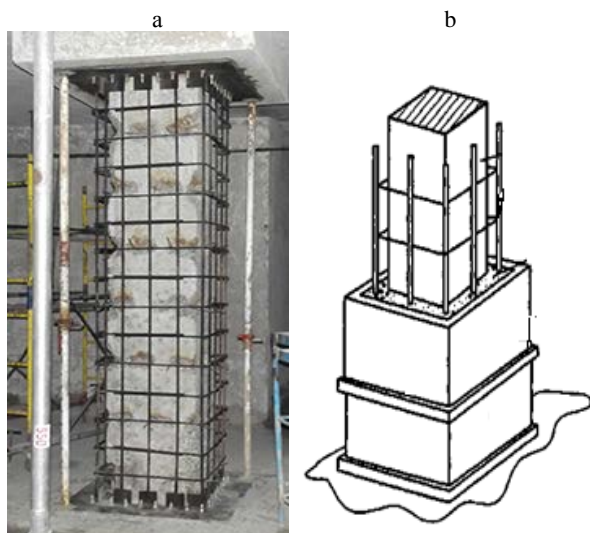
and capillaries to the reinforcement which begins to corrode. The resulting corrosion products have a large volume than the metal itself, and create pressure on the protective layer concrete from the inside. Ultimately, it exfoliates, the unprotected reinforcement is destroyed even more intensively, and soon the structure loses its bearing capacity. Standard restoration includes cleaning the damaged surface, additional reinforcement and concrete coating of the structure. However, after sometime, peeling of the repair concrete is often observed. This is because a layer damaged by corrosion does not provide high-quality adhesion of the "old" concrete to the "new" one. The reason is the destruction of the structure of the surface concrete layer by aggressive influences. In most cases, carbon dioxide is an aggressive agent. The study of the effect of carbon dioxide on cement stone has shown the destruction of the crystalline framework of the material and a decrease in its cohesive strength. Micrographs of cement stone damaged and undamaged by corrosion, taken with magnification 7000 times, convincingly demonstrate the results of the destructive work of carbon dioxide. This has a significant effect on grip. The use of forced heating of the repair mixture when it is placed in contact with the restored structure leads to the appearance of temperature gradients that enhance thermal diffusion. And the greater the temperature gradient, the more intense and deeper the penetration of the cement dissolution products from the repair concrete into the concrete body of the structure being restored. And this, in turn, contributes to the impregnation of the damaged cement stone with the liquid phase from the repair concrete mixture. Crystallizing, the cement dissolution products form a new crystalline structure in the damaged cement stone, which enhances its cohesive strength and binds the repair concrete to the intact concrete structure of the restored structure, ensuring the quality of adhesion.

**Keywords:** reinforced concrete structures, restoration, carbon dioxide, concrete carbonation, concrete adhesion, concrete mixture, forced heating

**For citation:** Molodin V. V., Leonovich S. N. (2022) Bonding of Recovery Concrete with Corrosion-Destroyed Reinforced Concrete Structure. *Science and Technique*. 21 (1), 36–41. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-36-41> (in Russian)

## Введение

При восстановлении работоспособности железобетонных конструкций, длительное время эксплуатировавшихся в агрессивной среде, чаще всего применяется технология монолитной обоймы. Поверхность разрушенной конструкции тщательно очищается, в основном с использованием пескоструйной технологии, а затем обетонируется с дополнительным армированием (рис. 1).



*Рис. 1.* Восстановление железобетонной колонны с использованием технологии монолитной обоймы: а – дополнительное армирование; б – укладка ремонтной бетонной смеси в опалубку

*Fig. 1.* Restoration of reinforced concrete column using monolithic cage technology: а – additional reinforcement; б – laying repair concrete mixture into formwork

Однако в практике восстановления конструкций, разрушившихся вследствие эксплуа-

тации в агрессивной среде, чаще при одностороннем обетонировании, наблюдается отслоение ремонтного слоя от восстанавливаемой конструкции. Это ведет к развитию коррозии несущей конструкции, но теперь уже скрытой ремонтным слоем. В основном такое происходит из-за некачественного или нарушенного сцепления «старого» и «нового» бетонов в зоне их контакта. Причина этого – разрушение структуры поверхностного слоя бетона агрессивными воздействиями. Для большинства случаев агрессивным агентом выступает углекислый газ.

## Карбонизация бетона и цементного камня

Углекислый газ, или диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), – обязательный и необходимый компонент воздуха, средняя концентрация которого в атмосфере на сегодняшний день достигла 417,1 ppm (миллионных долей по объему), или 0,042 % [1]. Причины этого – естественные источники (перегнивание органических материалов, выделение  $\text{CO}_2$  океанами, природные пожары, извержения вулканов) и антропогенная эмиссия (сжигание ископаемого топлива, вырубка лесов под землепользование и промышленные выбросы). При этом выбросы углекислого газа за счет деятельности человека увеличиваются по нарастающей [2]. Лидерами выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу в 2020 г. стали Китай (11535,2 млн т), США (5107,0 млн т), Индия (2597,36 млн т) и Россия (1792,02 млн т) [3]. В России 45,9 % диоксида углерода выделяется металлургическими заводами, 24,7 % – предприятиями по производству продукции из минерального сырья, 7,2 % – химической промышленностью [4]. Это ведет к тому, что конструкции зданий

и сооружений в данных отраслях промышленности, а также в некоторых других (например, пищевой) эксплуатируются в условиях активной углекислотной агрессии.

Несущие и ограждающие конструкции, которые используются для строительства промышленных зданий, как правило, изготавливаются из железобетона, основой которого является цементный камень – результат гидратации цемента. Исследованиями П. А. Ребиндера [5], О. П. Мчедлова-Петросяна [6] и других ученых установлено, что цементный камень формируется из массы, представляющей собой частицы неразложившихся зерен цементного клинкера, окруженных гелем двухкальциевого гидросиликата, непрерывно кристаллизующийся гель  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и растущие игольчатые кристаллы гидроксида кальция и трехкальциевого гидроалюмината. Сформировавшаяся из этой массы структура цементного камня – это в основном плотный гидросиликатный гель с включенными в него пластинчатыми фазами (гидроалюминаты, гидросульфалюминаты, гидроксид кальция) [6]. Причем кристаллы трехкальциевого гидроалюмината и кристаллы гидроксида кальция образуют переплетающуюся игольчатую структуру наподобие войлока, сцементированную гелем гидросиликата кальция (рис. 2). Благодаря такой структуре прочность затвердевшего цемента и бетона очень высока [7].

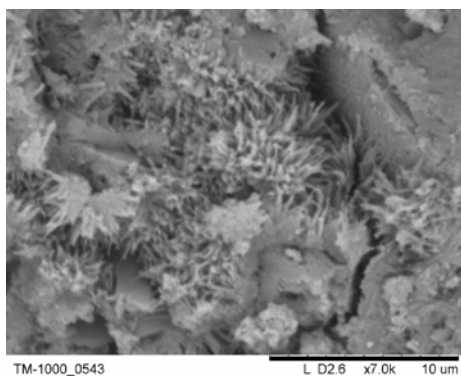


Рис. 2. Микрофотография структуры цементного камня, не разрушенной углекислотой (увеличение в 7000 раз)

Fig. 2. Micrograph of cement stone structure, not destroyed by carbon dioxide (magnification of 7000 times)

Следует заметить, что сложившаяся структура цементного камня пронизана частой сетью пор и капилляров, сформировавшихся в том числе на месте микрообъемов технологической воды, потребовавшейся для смачивания компонентов бетона и удобства перемешивания бетонной смеси при ее приготовлении и не использованной впоследствии для гидратации цемента.

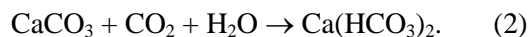
С одной стороны, система пор и капилляров влияет на прочностные характеристики материала, а с другой – обуславливает его компенсационные возможности, обеспечивает способность материала пропускать через себя под влиянием различных градиентов [8] газы, в том числе с агрессивными компонентами.

Коррозия начинается на поверхности конструкции и развивается вглубь – в поры и капилляры цементного камня. Степень воздействия газа на материал определяется видом и концентрацией кислоты, которая образуется, когда  $\text{CO}_2$ , содержащийся в воздухе, распространяется через открытые поры бетона и растворяется в воде, находящейся внутри. Безусловно, агрессивное воздействие углекислого газа зависит от технологических факторов и условий эксплуатации конструкции. Оно заключается в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образовании в нем соединений, меняющих его свойства. Взаимодействие углекислоты с гидроксидом кальция нейтрализует последний, и защитный слой бетона теряет свои свойства.

Исследованиями процессов коррозии бетонов [8] установлено, что под воздействием агрессивного вещества минералы цементного камня перерождаются в конгломерат нерастворимых соединений. Углекислота вступает в реакцию с гидроксидом кальция, в результате чего образуется карбонат кальция



Продукты реакции выделяются в твердой фазе в виде рыхлых осадков или плотных пленок на поверхности пор и капилляров [1]. Эти новообразования создают «завалы» в капиллярах, герметично запечатывая их, и нарастающее сопротивление диффузии в поверхностном слое бетона. Карбонат кальция осаждается в виде нерастворимых кристаллов, примерно на 12 % превышая объем исходного гидроксида кальция [9]. Это еще больше уплотняет карбонатный слой. Одновременно углекислота вступает в реакцию с карбонатом кальция. В результате образуется растворимый бикарбонат кальция



Конечно, со временем бикарбонат кальция частично вымывается из бетона и увеличивает объем пор, но это не оказывает существенного влияния на диффузионную проходимость для жидкостей и газов.

Разрушенная воздействием кислоты игольчатая структура материала лишает цементный камень упрочняющей основы, и он теряет коге-

зионную прочность, сохраняя при этом изначальную форму. На снимке, сделанном с помощью электронного сканирующего микроскопа ТМ-1000 в Институте химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН, комковатые образования и пленки лишь местами сшиты волокнистыми субмикрорекристаллами (рис. 3) и материал практически потерял монолитность.

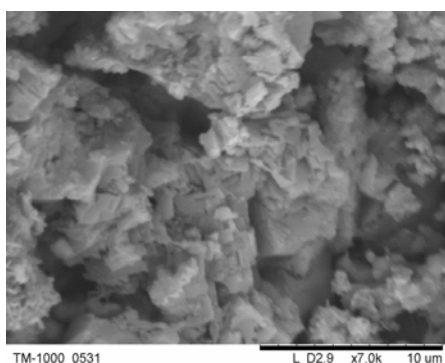


Рис. 3. Микрофотография структуры цементного камня, разрушенной углекислотой (увеличение в 7000 раз)

Fig. 3. Micrograph of cement stone structure, destroyed by carbon dioxide (magnification of 7000 times)

### Механизм сцепления «старого» и «нового» бетонов

Сцепление «старого» и «нового» бетонов при восстановлении конструкций обеспечивается, с одной стороны, адгезией – способностью материала прилипать за счет межмолекулярного взаимодействия, с другой – диффузией, т. е. взаимопроникновением одного материала в другой. При контакте зрелого бетона с бетонной смесью включаются оба механизма. Происходит прилипание вязкой бетонной смеси к поверхности зрелого бетона, и одновременно жидкая фаза смеси, представляющая собой воду с находящимися в ней продуктами растворения цемента, мигрирует из свежеложенной бетонной смеси в зрелый бетон по порам и капиллярам за счет выравнивания концентраций вещества и разницы температур. Глубина проникновения зависит от величины химических и физических градиентов, толкающих жидкость внутрь материала.

При укладке бетонной смеси в непосредственном контакте со зрелым бетоном в нормальных условиях в работу включаются адгезия, бародиффузия, термодиффузия и диффузия за счет градиента концентрации. Порядок градиентов, формирующих диффузию, невелик и примерно одинаков. Вклад в сцепление бетонов

адгезии и суммарной диффузии также примерно одинаков, и в сумме они обеспечивают технически необходимую прочность сцепления.

Адгезия склеивает по поверхности. Мигрирующая в зрелый бетон влага несет в себе растворенные продукты гидратации клинкерных зерен – растворимые щелочи и соли, а также гидроксид кальция [6]. В дальнейшем проникшие в зрелый бетон продукты гидратации в виде гидросиликатов и гидроксидов превращаются в гель и далее – в кристаллические сростки. Возникающие новообразования вместе с адгезией связывают зрелый и твердеющий бетоны и обеспечивают их качественное сцепление. Стоит заметить, что чем интенсивнее диффузионный перенос, тем надежнее сцепление.

### Возможности термодиффузии при восстановлении конструкций, поврежденных коррозией

Как установлено ранее [10], поверхностный слой железобетонных конструкций, длительное время эксплуатировавшихся в условиях углекислотной агрессии, имеет существенно сниженную когезионную прочность. Толщина этого слоя за 30 лет эксплуатации может достигать 25 мм [11].

Характерная для бетонов адгезия обеспечивает прилипание бетонной смеси к поверхности цементного камня с разрушенной кристаллической структурой, отвечающей за когезию. Диффузия при малых градиентах концентрации, давления и температуры дает слабое проникновение новообразований из бетонной смеси вглубь зрелого бетона с разрушенной силовой структурой. Она не обеспечивает достижения вновь формирующимися кристаллическими сростками глубинных, не тронутых разрушительной коррозией массивов цементного камня. Этому способствует и частичное «закупоривание» входов в капиллярную систему цементного камня обломками его компонентов, разрушенными углекислотой [8].

Очевидно, что «новый» бетон при укладке в контакте со «старым», имеющим разрушенную коррозией поверхность, благодаря адгезии и диффузии «цепляется» только за разрушенные структуры цементного камня. В последующем при возможных деформациях и других силовых воздействиях на восстановленную конструкцию происходит нарушение ее целостности. Разрушение идет по ослабленным коррозией зонам между нетронутым разрушитель-

ным воздействием кислоты массивом цементного камня и прошитым кристаллическими сростками пострадавшим приповерхностным слоем. Это и является основной причиной отслоения ремонтного слоя у восстановленных железобетонных конструкций.

Известно, что с повышением градиента температур стремительно нарастает термодиффузия (эффект Соре). Молекулы компоненты с большей массой стремятся перейти из области высоких в область более низких температур [9].

При нагреве уложенной бетонной смеси восстановления «природный насос», формируя разницу парциального давления, толкает жидкую компоненту из бетонной смеси по капиллярной системе корродированного бетона в его глубинные зоны. При этом чем больше температурный перепад, тем глубже проникновение новообразований.

Рентгеноструктурный анализ пораженных коррозией образцов бетона, находившихся в контакте с форсированно разогретой бетонной смесью, выполненный с помощью прибора D8 ADVANCE (Bruker), оснащенного программой Search, показал при температурном градиенте 80–100 °C/см наличие гидроксида кальция – промежуточной фазы гидратации цемента на глубине 15–45 мм в зависимости от подготовки поверхности [12].

Следовательно, жидкая фаза из разогретой ремонтной смеси под влиянием температурного фактора через систему капилляров, частично загроможденных завалами из комковатых образований и пленок – продуктов разрушения цементного камня, может преодолеть поврежденную приповерхностную зону и достичь неповрежденных массивов, частично проникая и в них. Из содержащихся в жидкой фазе продуктов растворения цемента в капиллярах могут сформироваться кристаллические сростки, которые укрепят разрушенный коррозией слой и соединят новообразованиями ремонтный бетон с неповрежденным массивом восстанавливаемого бетона.

Снимки структуры разрушенного углекислотой цементного камня, подвергнувшегося термопропитке посредством форсированного разогрева ремонтной бетонной смеси, уложенной в непосредственном контакте с охлажденным образцом, имеющим карбонизированную поверхность, показывают появление среди комковатых образований и пленок (продуктов разрушения цементного камня) новых кристаллических структур (рис. 4).

Исследование сцепления образцов, выдержанных в среде углекислого газа и в нормальных условиях, а затем забетонированных с форсированным разогревом смеси, показало существенное превышение прочности на разрыв против образцов, забетонированных и твердевших в нормальных условиях (рис. 5).

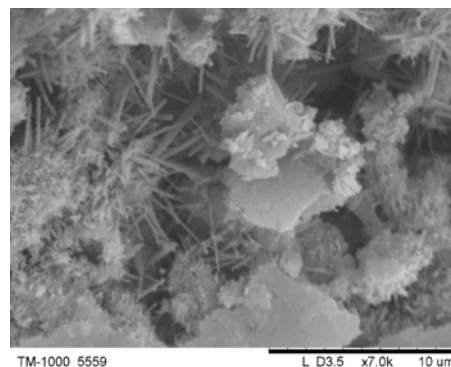


Рис. 4. Микрофотография структуры цементного камня, разрушенного углекислотой и впоследствии подвергнувшегося термопропитке жидкой фазой из ремонтной смеси при ее форсированном разогреве (увеличение в 7000 раз)

Fig. 4. Micrograph of cement stone structure destroyed by carbon dioxide and subsequently subjected to thermal impregnation with liquid phase from repair mixture during its forced heating (magnification of 7000 times)

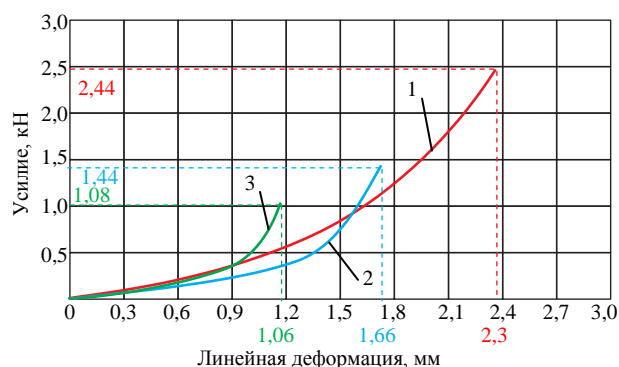


Рис. 5. Зависимость линейных деформаций от усилия растяжения для образцов: 1 – подвергнувшихся термообработке и твердевших без воздействия углекислого газа; 2 – подвергнувшихся термообработке и твердевших в среде углекислого газа; 3 – не подвергнувшихся термообработке и твердевших без воздействия углекислого газа

Fig. 5. Dependence of linear deformations on tensile force for samples: 1 – subjected to heat treatment and hardened without exposure to carbon dioxide; 2 – subjected to heat treatment and hardened in carbon dioxide; 3 – not subjected to heat treatment and hardened without exposure to carbon dioxide

## ВЫВОДЫ

1. Исследования структуры цементного камня в поверхностном слое бетонных конструкций, подвергнувшихся длительное время воздей-

ствию углекислого газа, показали, что игольчатая структура кристаллов трехкальциевого гидроалюмината и гидроксида кальция в большей или меньшей степени оказывается разрушенной, а когезионная прочность материала существенно уменьшается.

2. Поврежденный коррозией слой не обеспечивает качественного сцепления «старого» бетона с «новым», что служит причиной отслоения бетона восстановления от бетона восстанавливаемой конструкции.

3. Применение форсированного разогрева смеси, укладываемой в контакт с восстанавливаемой конструкцией, вызывает появление температурного градиента до 100 °С/см, что в силу возникающей разницы парциального давления формирует поток жидкой фазы из ремонтной бетонной смеси через систему капилляров поврежденного бетона вглубь восстанавливаемой конструкции. Кристаллизуясь, продукты растворения цемента формируют новую кристаллическую структуру, частично восстанавливая когезионную прочность поврежденного коррозией материала и сращивая бетон восстановления и неповрежденный бетон восстанавливаемой конструкции.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Rise of Carbon Dioxide Unabated [Electronic Resource]. Mode of access: <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2636/Rise-of-carbon-dioxide-unabated>. Date of access: 04.06.2020.
- Albaali, G. Carbon Emission Calculations & a Case Study / Ghani Albaali // LAP LAMBERT Verlag. Saarbrücken. 2015. 173 p.
- EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research [Electronic Resource]. Mode of access: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2020>. Date of access: 14.10.2021.
- Потенциал природных и техногенных источников диоксида углерода для реализации технологии смешивающегося вытеснения на территории РФ / Н. Г. Главнов [и др.] // Роснефть. Профессионально о нефти. 2017. Т. 4, № 2. С. 47–52.
- Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П. А. Ребиндер. М.: Наука, 1966. 203 с.
- Мчедлов-Петросян, О. П. Химия неорганических строительных материалов / О. П. Мчедлов-Петросян. М.: Стройиздат, 1971. 224 с.
- Мануйлов, Л. А. Физическая химия и химия кремния / Л. А. Мануйлов, Г. И. Ключковский. М.: Высш. шк., 1962. 311 с.
- Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
- Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. Москва: Наука и техника, 1965. 156 с.
- Молодин, В. В. Форсированный разогрев смеси как фактор увеличения сцепления бетонов, подвергшихся коррозии / В. В. Молодин, А. Е. Ануфриева, А. Х. Навоян // Известия вузов. Строительство. 2020. № 2. С. 56–71. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-734-2-56-71>.
- Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии на конструкционный бетон: вероятностная модель / Е. Е. Шалый [и др.] // Вестник гражданских инженеров. 2018. Т. 68, № 3. С. 123–131. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-3-123-131>.
- Навоян, А. Х. Исследование сцепления твердеющего бетона со зрелым при замоноличивании стыков и ремонте конструкций / А. Х. Навоян, В. В. Молодин // Труды НГАСУ. 2020. Т. 23, № 1. С. 49–61.  
Поступила 31.05.2021  
Подписана в печать 23.08.2021  
Опубликована онлайн 28.01.2022

#### REFERENCES

- Rise of Carbon Dioxide Unabated*. Available at: <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2636/Rise-of-carbon-dioxide-unabated> (Accessed 4 June 2020).
- Albaali G. (2015) *Carbon Emission Calculations & a Case Study*. LAP LAMBERT Verlag. Saarbrücken. 173.
- EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research. Available at: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2020> (Accessed 14 October 2021).
- Glavnov N. G., Dymochkina M. G., Litvak E. I., Vershinina M. V. (2017) Potential of Natural and Man-Made Sources of Carbon Dioxide for the Implementation of the Technology of Mixed Displacement in the Territory of the Russian Federation. *Rosneft. Professionally about Oil*, 4 (2), 47–52 (in Russian).
- Rebinder P. A. (1966) *Physicochemical Mechanics of Dispersed Structures*. Moscow, Nauka Publ. 203 (in Russian).
- Mchedlov-Petrosyan O. P. (1971) *Chemistry of Inorganic Building Materials*. Moscow, Stroyizdat Publ. 224 (in Russian).
- Manuylov L. A., Klyukovskii G. I. (1962) *Physical Chemistry and Silicon Chemistry*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 311 (in Russian).
- Moskvin V. M., Ivanov F. M., Alekseev S. I., Guzeev E. A. (1980) *Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete. Methods for their Protection*. Moscow, Stroyizdat Publ. 536 (in Russian).
- Lykov A. V. (1965) *Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies*. Moscow, Nauka i Tekhnika Publ. 156 (in Russian).
- Molodin V. V., Anufrieva A. E., Navoyan A. Kh. (2020) Forced Heating of the Mixture as a Factor in Increasing the Adhesion of Corroded Concrete. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (2), 56–71. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-734-2-56-71> (in Russian).
- Shalyi E. E., Leonovich S. N., Kim L. V., Rumyantseva V. E., Budrevich N. A. (2018) Combined Effects of Carbonization and Chloride Aggression on Structural Concrete: A Probabilistic Model. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*, 68 (3), 123–131. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-3-123-131> (in Russian).
- Navoyan A. Kh., Molodin V. V. (2020) Investigation of the Adhesion of Harde-Ning Concrete with Mature Concrete During Monolithing of Joints and Repair of Structures. *Trudy NGASU [Proceedings of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering – SIB-STRIN]*, 23 (1), 49–61 (in Russian).

Received: 31.05.2021

Accepted: 23.08.2021

Published online: 28.01.2022