

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОРРОЗИИ БЕТОННОЙ ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ

INVESTIGATION OF THE CORROSION PROCESS OF CONCRETE PAVEMENT TILES

УДК 620.193

И.А. Тимонов*, В.Ю. Сергеев, А.В. Гречаников
 Витебский государственный технологический
 университет

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2023-2-59-68>

I. Tsimanov*, V. Sergeyev, A. Hrachanikau
 Vitebsk State Technological
 University

РЕФЕРАТ

**КОРРОЗИЯ, БЕТОН, СКОРОСТЬ КОРРОЗИИ,
 ГЛУБИНА РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА**

Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии является важнейшей и актуальной проблемой, решение которой направлено на увеличение срока службы конструкций и сооружений различного назначения. Целью данной статьи является оценка коррозии бетонной тротуарной плитки в результате воздействия на нее агрессивной водной среды. В качестве агрессивного компонента был выбран раствор щелочи (NaOH) (коррозия первого вида), который периодически сменялся (через 2, 7 и 14 суток). Результаты исследования процесса коррозии I вида тротуарной плитки позволили определить основные кинетические зависимости процессов коррозии и скорость коррозии. На основании полученных зависимостей установлено, что диффузионно-кинетическая область коррозии для бетонной тротуарной плитки наступает через 7 суток. По истечении 14 суток наступает диффузионная область коррозии. Рассчитана глубина разрушения бетона тротуарной плитки на момент окончания испытаний (0,017 см) и прогнозируемая глубина разрушения на срок эксплуатации изделия (0,18 см). В результате экспериментальных исследований установлено, что оценку качества изделия можно проводить не только по физико-механическим свойствам, но и по долговечности и антикоррозионным свойствам. Целесообразность применения различных защитных мероприятий, варьирования компонентов состава смеси при изготовлении плитки и их эффективность можно оценивать путём сопо-

ABSTRACT

**CORROSION, CONCRETE, CORROSION RATE,
 CONCRETE BREAKDOWN DEPTH**

Protection of concrete and reinforced concrete structures against corrosion is an important and urgent problem, the solution of which is aimed at increasing the service life of structures and structures of various purposes. The purpose of this article is to study corrosion of concrete paving tiles as a result of the effect on it of an aggressive aquatic environment. The solution of alkali (NaOH) (Type I corrosion) was selected as the aggressive component and was replaced periodically (after 2, 7 and 14 days). The results of the investigation of the corrosion process Type I of paving tiles allowed to determine the main kinetic dependencies of corrosion processes and corrosion rate. Based on the obtained dependencies, it is determined that the diffusion kinetic corrosion area for concrete paving tiles occurs after 7 days. After 14 days, there will be a diffusion corrosion area. The fracture depth of the pavement concrete at the time of the end of the test (0.017 cm) and the predicted fracture depth for the life of the product (0.18 cm) have been calculated. As a result of experimental studies, it has been determined that the quality assessment of the product can be carried out not only on physical and mechanical properties, but also on durability and anti-corrosion properties. The appropriateness of different protection measures, the variation of components of the mixture composition in the manufacture of tiles and their effectiveness can be assessed by comparing the corrosion rate and the fracture depth of protected and unprotected concrete.

* E-mail: timonov1@mail.ru (I. Tsimanov)

ставления величин скорости коррозии и глубины разрушения защищенного и незащищенного бетона.

Бетон и железобетон во всем мире признаны одними из самых экономичных, экологически чистых, надежных и долговечных строительных материалов. В индустриально развитых странах на одного жителя затрачивается в год до 2 м³ бетона и железобетона [1]. Никакие другие конструкционные материалы так широко не используются во всех отраслях.

Такое широкое применение обусловлено объективными факторами, главными из которых являются: уникальность физико-механических свойств материала, удовлетворяющих требованиям самых разнообразных зданий и сооружений гражданского, промышленного, гидротехнического, транспортного, энергетического и других видов строительства; удовлетворение архитектурных требований при проектировании зданий и сооружений различного функционального назначения; практически неисчерпаемые запасы природного, в том числе и местного, сырья для их производства с возможностью замены его техногенными отходами различных отраслей промышленности; сравнительно низкая энергоемкость исходных материалов и технологических процессов изготовления бетона и железобетона и конструкций из них [2].

Таким образом, основную долю строительных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в настоящее время, составляют железобетонные элементы и конструкции различных типов. Большинство таких изделий эксплуатируются в различных воздушных и влажных средах, их долговечность во многом определяется концентрацией и степенью агрессивности содержащихся в них компонентов [1].

Поврежденность в них определяют в основном физические и химические процессы (размораживание бетона, выщелачивание, карбонизация, сульфатная коррозия и др.), обусловливаемые агрессивностью эксплуатационной среды, а также коррозия стальной арматуры, являющаяся, в первую очередь, следствием снижения защитных свойств бетона по отноше-

нию к стальной арматуре под воздействием различных агрессивных факторов [1]. В настоящее время установлено, что разрушающему воздействию атмосферных и производственных сред подвергается порядка 75 % всех строительных конструкций различного назначения, что приводит к значительным экономическим потерям.

Коррозия бетона – это процесс разрушения конструкций в результате воздействия на их структуру различных внешних агрессивных сред, или вследствие внутренних химических и физико-химических процессов. Бетонные конструкции постоянно контактируют с окружающей средой – подвергаются влиянию сточных и грунтовых вод, дождя и снега, солнечной радиации, промерзают при низких температурах и нагреваются при высоких. Из-за этого в цементном камне происходят реакции, которые разрушают структуру камня. Экономические потери в результате снижения долговечности и прочности эксплуатируемых сооружений очень велики. Заблаговременно выявляя факторы коррозии бетона и железобетона, изучая закономерности процессов, можно существенно сократить финансовые риски и повысить надежность и долговечность объектов гражданского и промышленного строительства.

Большой вклад в исследования по изучению механизма коррозии внёс профессор В.М. Москвин. Первые результаты исследований опубликованы в 1952 г. в монографии «Коррозия бетона» и в дальнейшем развиты в лаборатории по долговечности и коррозии бетона и железобетона при Научно-исследовательском институте железобетона. В этих исследованиях было показано, что коррозия бетона представляет собой комплекс сложных гетерогенных физико-химических процессов. Исходя из этого, коррозию бетона можно представить как результат последовательно или параллельно протекающих более простых процессов и выделить из этих процессов те, которые в наибольшей степени, определяют скорость развития коррозионного процесса в

целом. Такой подход позволяет спрогнозировать сроки службы бетона и железобетона в конкретных агрессивных условиях эксплуатации [2].

Исследование Москвиным В.М. разнообразных процессов коррозии, развивающихся в бетоне при действии на него грунтовых и промышленных вод, позволило классифицировать основные виды коррозии. На основе полученных экспериментальных данных и накопленного опыта эксплуатации конструкций процессы, протекающие при коррозии бетона, были разделены на три основных вида [3].

Коррозия первого вида объединяет процессы, связанные с выщелачиванием растворимых частей бетона под действием воды-среды (воды с малой бикарбонатной щелочностью). Такой процесс называется выщелачиванием извести. Он представляет опасность поскольку известь является составляющей всех цементов. Коррозия этого вида очень опасна в тонкостенных конструкциях и в конструкциях, работающих под напором воды, когда составные части цементного камня могут растворяться и вымываться водой. Наиболее легко растворимым продуктом гидратации цемента является гидрат окиси кальция, выщелачивание которого ведет к гидролизу цементного клинкера.

Второй вид – процессы, связанные с обменными реакциями между компонентами цементного камня бетона и агрессивной средой с образованием на поверхности корродирующего бетона продуктов коррозии, не обладающих вяжущими свойствами (воды, содержащие кислоты, соли магния и др.). Наиболее часто встречается под действием углекислых вод. Углекислота H_2CO_3 присутствует, как правило, во всех водах. В поверхностных слоях бетона, соприкасающихся с такими водами, идет разрушение структурных элементов гидратированного цементного камня, а иногда и негидратированных зерен цементного клинкера. Образующиеся компоненты не обладают достаточной плотностью, чтобы воспрепятствовать дальнейшему проникновению агрессивной среды. Они смываются, растворяются, и обнажаются более глубокие слои бетона. Процесс называется кислотной коррозией.

Третий вид – процессы, связанные с образованием и накоплением в бетоне кристаллизующихся в порах бетона солей (воды, содержа-

щие сульфаты и др.). Такие соли создают в порах и капиллярах бетона внутреннее напряжение, вызывающее разрушение материала. К наиболее распространенным в природных водах сернокислым солям, которые называются сульфатными, относятся сернокислый кальций (гипс), сернокислый натрий и сернокислый магний. В пористых структурах бетона процессы образования солей отмечаются во всем объеме материала. Таким образом, под действием сульфатов бетон разрушается тем интенсивнее, чем больше его пористость и проницаемость. Это сульфатная коррозия.

Степень воздействия жидких агрессивных сред на бетон определяется видом и концентрацией агрессивных веществ, температурой, условиями контакта с конструкцией и зависит от структуры и состава цементного камня и бетона. Наиболее распространены и представляют опасность для бетона промышленные жидкие агрессивные среды и природные воды, содержащие органические и неорганические кислоты, сульфаты и магниезольные соли.

Коррозионные процессы ускоряются при увеличении содержания агрессивных веществ, повышении температуры среды, при действии среды под напором и в условиях, когда происходит отвод продуктов реакции с поверхности конструкции.

При действии на бетон промышленных и грунтовых вод часто имеет место одновременное протекание процессов различных видов коррозии.

Вопросам коррозии бетона и железобетона посвящено много работ. Например, в работе [4] рассмотрены исследования долговечности железобетонных конструкций с трещинами, эксплуатирующихся в различных агрессивных условиях, в работе [5] исследовано коррозионное воздействие агрессивных сред на железобетонные конструкции перевалочного комплекса нефтепродуктов. В работе [6] изучен процесс коррозии железобетонных конструкций шельфовых сооружений. В работах [7, 8] представлены результаты исследования процессов коррозионной деструкции железобетонных изделий в агрессивных средах с хлорид-ионами, а также жидкостная коррозия бетонов в среде с различной степенью агрессивности.

Цель настоящей работы – определение влияния раствора щелочи (коррозия первого вида) на цементный камень бетонной тротуарной плитки с добавками неорганических отходов теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), изготовленной на ОАО «Обольский керамический завод».

Для проведения исследований коррозии на ОАО «Обольский керамический завод» были изготовлены образцы тротуарной плитки. По физико-механическим свойствам изготовленная тротуарная плитка соответствует требованиям СТБ 1071-2007 «Плиты бетонные и железобетонные для тротуаров дорог» [9]. Согласно технологическому регламенту ОАО «Обольский керамический завод», расход цемента на изготовление изделия составлял 430 кг/м^3 , содержание CaO в цементе – 60 %, процент вложения неорганических отходов ТЭЦ составил – 5 %. Исследования физико-механических свойств плитки, а также структурных процессов, происходящих при изготовлении плитки, авторами рассмотрены в работах [10, 11]. В производственной лаборатории ОАО «Обольский керамический завод» долговечность изделия прогнозировалась по параметрам морозостойкости и водопоглощения, что не полностью учитывает агрессивность влажной среды.

Изготовление и подготовка образцов, используемая аппаратура и растворы, методика испытаний и обработка результатов осуществлялись согласно «Руководству по определению скорости коррозии цементного камня, раствора и бетона в жидких агрессивных средах» [12].

Испытание образцов проводилось следующим образом. Образцы тротуарной плитки, изготовленные в виде кубиков с размером грани 6 см , находились в растворе щелочи (NaOH) $0,1 \text{ Н}$ концентрации в течение 23 суток от начала испытаний. Исследование процесса коррозии проводилось в стационарных условиях. Образцы находились в стеклянных емкостях с плотно прилегающими крышками. Раствор щелочи (NaOH) периодически сменялся (через 2, 7 и 14 суток). Объем раствора, участвовавшего во взаимодействии с образцами в стеклянной емкости, составлял 1000 мл . Емкости с исследуемыми образцами заливались рабочим раствором, и по изменению концентрации по иону OH^- которых в процессе испытания рассчитывалась скорость

коррозии.

Согласно работе [12], под скоростью коррозии понимается количество вещества, которое вступило во взаимодействие или перешло в агрессивный раствор в единицу времени с единицы поверхности исследуемого образца, $\text{мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$.

В работе для расчёта скорости коррозии бетона сначала определяли количество агрессивного компонента, который химически взаимодействовал с бетоном плитки за период времени τ , $\text{мг}/\text{см}^2$ (формула (1)).

$$P_{\text{OH}^-} = (C_1 - C_2) \times Q / 1000 \times S, \quad (1)$$

где C_1 – концентрация исходного раствора по иону OH^- щелочи, $\text{мг}/\text{л}$; C_2 – концентрация раствора после взаимодействия с бетоном плитки, $\text{мг}/\text{л}$; Q – объем раствора, участвовавшего во взаимодействии с бетоном плитки, мл ; S – площадь незащищенной поверхности образца, см^2 .

Концентрация раствора щелочи определялась методом прямого титрования стандартным раствором кислоты в присутствии индикатора метилового оранжевого.

Затем проводился расчет скорости коррозии V по формуле (2)

$$V = P_{\text{OH}^-} / \tau, \quad (2)$$

где τ – период испытаний, сут .

Результаты проведенных исследований и расчётов представлены в таблице 1.

В результате проведенных исследований установлено, что скорость коррозии бетона – величина переменная во времени (рисунок 1).

Анализ рисунка 1 показывает, что диффузионно-кинетическая область коррозии для бетонной тротуарной плитки наступает через 7 суток. В этой области изменение скорости коррозии незначительно. Кроме того, для этой области характерна прямолинейная зависимость глубины разрушения бетона от корня квадратного из времени, что иллюстрирует рисунок 2.

Таблица 1 – Результаты исследований коррозии бетонной тротуарной плитки

Наименование определений	Начало испытаний	Окончание испытаний
Объем раствора, <i>мл</i>	1000	1000
Поверхность взаимодействия, <i>см²</i>	216	216
Концентрация исходного раствора по иону <i>ОН⁻</i> , <i>С₁</i> , <i>мг/л</i>	3600	3867
Концентрация раствора после взаимодействия с бетоном по иону <i>ОН⁻</i> , <i>С₂</i> , <i>мг/л</i>	3227	3560

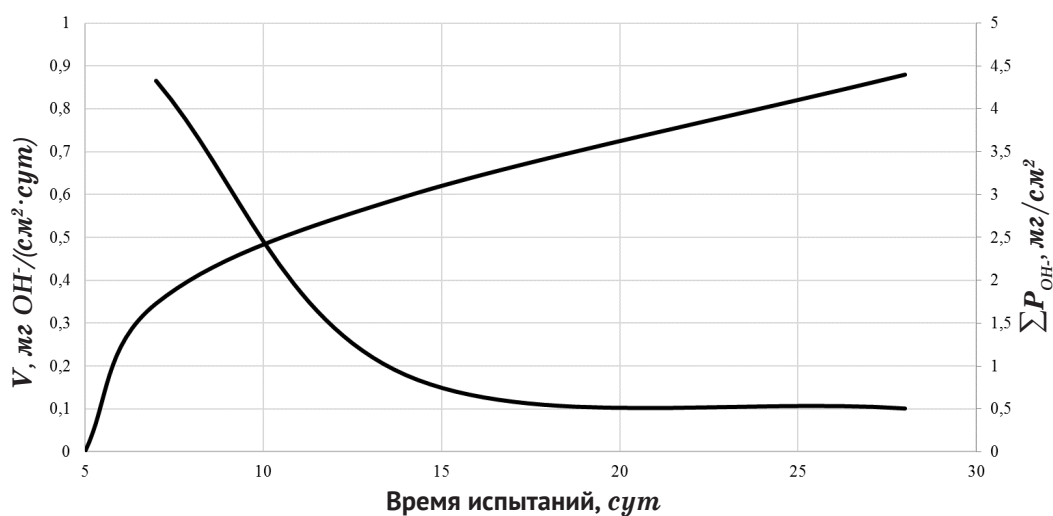


Рисунок 1 – Основные кинетические зависимости процессов коррозии бетонной тротуарной плитки

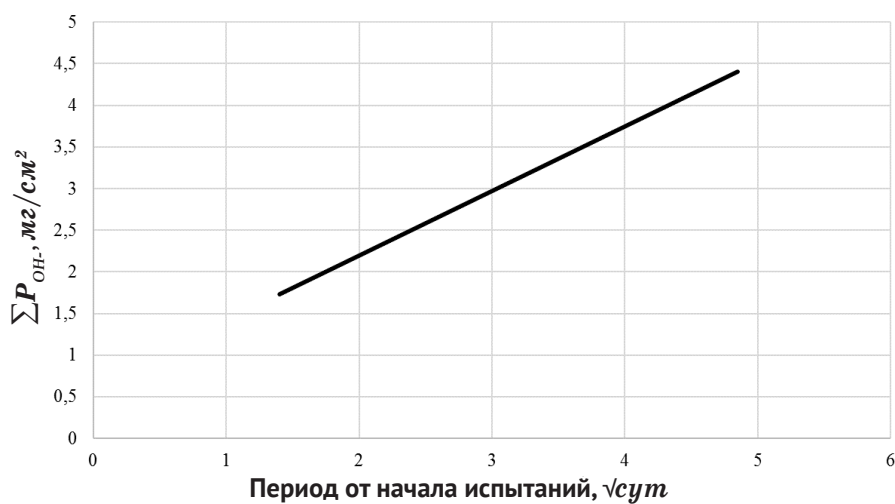


Рисунок 2 – Кинетическая зависимость процесса коррозии бетонной тротуарной плитки в диффузионно-кинетической и диффузионной областях

По истечении 14 суток наступает диффузионная область коррозии. Для этой области характерно то, что величину скорости процесса коррозии основное влияние диффузия реагирующих веществ к реакционной поверхности образца.

Что касается длительности коррозии бетона в диффузионно-кинетической области (время выхода процесса на прямую), то она зависит от структуры и толщины слоя продуктов коррозии, концентрации агрессивной составляющей в воде-среде, условий эксплуатации конструкций и других факторов. По разным данным она может составлять от 5 до 60 суток (рисунок 2).

Полученные в результате экспериментальных исследований данные по скорости коррозии бетона в тротуарной плитке использовались для дальнейшего расчета глубины разрушения бетона.

Глубину разрушения Γ_p , см, бетона тротуарной плитки к моменту окончания срока испытания рассчитывали по формуле (3):

$$\Gamma_p = \sum P_{OH^-} / \Pi \times \beta, \quad (3)$$

где $\sum P_{OH^-}$ – количество агрессивного компонента, вошедшего в химическое взаимодействие с цементным камнем или бетоном, отнесенное к единице площади реагирующей поверхности образца, г/см²; Π – количество цемента в 1 см³ исследуемого образца, рассчитывается по фактическому составу образцов, г/см³; β – содержание СаО в цементе, %, определяемое по результатам химического анализа цемента.

Количество ионов агрессивной среды $\sum P_{OH^-}$ при расчете глубины разрушения бетона плитки определяли суммированием P_{OH^-} за каждый период испытания (2, 7 и 14 суток):

$$\sum P_{OH^-} = P_{1OH^-} + P_{2OH^-} + P_{3OH^-}, \quad (4)$$

$$\Gamma_p = 0,0044 / 0,43 \times 0,6 = 0,017 \text{ см.} \quad (5)$$

По результатам экспериментальных исследований может быть рассчитана глубина разрушения цементного камня, раствора или бетона не только к моменту окончания срока испытания, но и в более поздние сроки (например, на расчетный, по физико-механическим свойствам, срок эксплуатации конструкции).

В диффузионной области коррозии, как было указано выше, характерна зависимость глубины разрушения бетона от корня квадратного из времени (зависимость $\sum P_{OH^-} = f(\sqrt{t})$). Эту зависимость можно представить следующим видом:

$$\sum P_{OH^-} = a + K \times \sqrt{t}, \quad (6)$$

где a – постоянная, учитывающая влияние процессов, протекающих в диффузионно-кинетической области; K – экспериментальная величина, определяемая как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс на графике кинетическая зависимости процесса коррозии бетона в диффузионно-кинетической и диффузионной областях (рисунок 2), г/(см² · сут).

Для учета погрешности в расчетах вместо параметра a вводится множитель $(1-a)$, в котором поправочный коэффициент a , определяется по формуле (7):

$$a = \sum P_{1OH^-} / \sum P_{2OH^-}, \quad (7)$$

где $\sum P_{1OH^-}$ – количество цементного камня в пересчете на OH^- , вошедшее во взаимодействие с агрессивной средой в диффузионно-кинетической области (до установления прямолинейной зависимости); $\sum P_{2OH^-}$ – количество цементного камня в пересчете на OH^- , вошедшее во взаимодействие с агрессивной средой с начала эксперимента к расчетному сроку глубины разрушения.

Величина этого коэффициента a учитывается в дальнейших расчетах только при значении более 0,1. Исходя из этого условия, глубину разрушения бетона рассчитывают по формулам (8) либо (9):

$$\Gamma_p = (1 - \alpha) \times K \times \sqrt{\tau} / (\alpha \times \beta), \text{ (при } \alpha > 0,1 \text{) , (8)}$$

$$\Gamma_p = K \times \sqrt{\tau} / (\alpha \times \beta), \text{ (при } \alpha < 0,1 \text{) , (9)}$$

где τ – время, для которого прогнозируется глубина разрушения, *сут.*

Используя данные, полученные в результате исследования процесса коррозии, проведен расчёт глубины разрушения бетона плитки на общий срок времени эксплуатации плитки (10 лет).

Используя зависимость, представленную на рисунке 2, получаем коэффициент $K = 0,785 \cdot 10^{-3} \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$. Учитывая время эксплуатации плитки 10 лет или 3650 суток, получаем значение параметра $\alpha = 1,73/47 = 0,039$.

Так как значение коэффициента $\alpha < 0,1$, то расчет глубины разрушения бетона плитки производили по формуле (10):

$$\Gamma_p = 0,785 \times 10^{-3} \times \sqrt{3650} / (0,43 \times 0,6) = 0,18 \text{ см. (10)}$$

Рассчитанные значения глубины разрушения бетона тротуарной плитки на момент окончания испытаний (0,017 см) и прогнозируемая глубина разрушения на срок эксплуатации изделия (0,18 см) показывают хорошие антикоррозион-

ные свойства плитки. Это связано с её высокой плотностью, прочностью и водонепроницаемостью, а также применением активных добавок в процессе изготовления.

Вывод

Полученные результаты исследования процесса коррозии I вида тротуарной плитки позволили определить основные кинетические зависимости процессов коррозии и скорость коррозии. На основании полученных зависимостей установлено, что диффузионно-кинетическая область коррозии для бетонной тротуарной плитки наступает через 7 суток. По истечении 14 суток наступает диффузионная область коррозии. Рассчитана глубина разрушения бетона тротуарной плитки на момент окончания испытаний (0,017 см) и прогнозируемая глубина разрушения на срок эксплуатации изделия (0,18 см). Полученные значения глубины разрушения бетона показывают хорошие антикоррозионные свойства плитки. В результате экспериментальных исследований установлено, что оценку качества изделия можно проводить не только по физико-механическим свойствам, но и по долговечности и антикоррозионным свойствам. Целесообразность применения различных защитных мероприятий, варьирования компонентов состава смеси при изготовлении плитки и их эффективность можно оценивать путём сопоставления величин скорости коррозии и глубины разрушения защищенного и незащищенного бетона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев, А. А. (2020), К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода, *Вестник Брестского государственного технического университета*, 2020, № 1, С. 80.
2. Яковлев, В. В. (2000), *Прогнозирование коррозионной стойкости бетона и железобетона в агрессивных жидких и газовых средах* : авторе-

REFERENCES

1. Vasiliev, A. A. (2020), On the issue of objectivity of modern assessment and forecasting of concrete carbonization based on the indicator method [K voprosu ob'ektivnosti sovremennoy otsenki i prognozirovaniya karbonizatsii betona na osnove indikatornogo metod], *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Brest State Technical University*, 2020, № 1, p. 80.

- ферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия, Самара, Самарская государственная архитектурно-строительная академия, 38 с.
3. Степанова, В. Ф. (2014), *Долговечность бетона : учебное пособие для вузов*, Москва, 2014, 126 с.
 4. Мигунов, В. Н. (2013), *Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами : монография*, Пенза, ПГУАС, 2013, 332 с.
 5. Пачина, Н. А., Никитин, С. Е. (2019), Коррозионные воздействия на железобетонные конструкции перевалочного комплекса нефтепродуктов, *Alfabuild*, 2019, № 4(11), С. 23–33.
 6. Шалый, Е. Е., Леонович, С. Н., Ким, Л. В. (2017), Исследование процессов и механизма коррозии шельфовых сооружений острова Сахалин, Проблемы современного бетона и железобетона, *Сборник научных трудов*, Минск, Институт БелНИИС, 2017, Выпуск 9, С. 476–495.
 7. Федосов, С. В., Румянцева, В. Е., Коновалова, В. С. (2016), Исследование процессов коррозионной деструкции железобетонных изделий в агрессивных средах с хлорид-ионами, *Вестник гражданских инженеров*, 2016, № 5(56), С. 61–67.
 8. Федосов, С. В., Румянцева, В. Е., Коновалова, В. С., Караваев, И. В., (2017), Жидкостная коррозия бетонов в среде с различной степенью агрессивности, *Вестник гражданских инженеров*, 2017, № 4(63), С. 113–118.
 9. СТБ 1071–2007. *Плиты бетонные и железобетонные для тротуаров дорог. Технические условия*, Введ. 2008-03-01, Минск, Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2008, 15 с.
 2. Yakovlev, V. V. (2000), *Prognozirovanie korrozionnoy stoykosti betona i zhelezobetona v agressivnykh zhidkikh i gazovykh sredakh : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk po spetsial'nosti 05.23.05 – Stroitel'nye materialy i izdeliya* [Forecasting the corrosion resistance of concrete and reinforced concrete in aggressive liquid and gas environments: abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.23.05 – Construction materials and products], Samara, Samara State Academy of Architecture and Civil Engineering, 38 p.
 3. Stepanova, V. F. (2014), *Dolgovechnost' betona : uchebnoe posobie dlya vuzov* [Durability of concrete: textbook for universities], Moscow, 2014, 126 p.
 4. Migunov, V. N. (2013), *Ekspierimental'no-teoreticheskoe issledovanie korrozii i dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksiy s treshchinami : monografiya* [Experimental and theoretical study of corrosion and durability of reinforced concrete structures with cracks: monograph], Penza, PGUAS, 2013, 332 p.
 5. Pachina, N. A., Nikitin, S. E. (2019), Corrosion effects on reinforced concrete structures of an oil products transshipment complex [Korroziionnye vozdeystviya na zhelezobetonnye konstruksii perevalochnogo kompleksa nefteproduktov], *Alfabuild*, 2019, № 4(11), pp. 23–33.
 6. Shaly, E. E., Leonovich, S. N., Kim, L. V. (2017), Study of the processes and mechanism of corrosion of offshore structures on Sakhalin Island [Issledovanie protsessov i mekhanizma korrozii shel'fovykh sooruzheniy ostrova Sakhalin], Problems of modern concrete and reinforced concrete, *Collection of scientific papers*, Minsk, BelNIIS Institute, 2017, Issue 9, pp. 476–495.
 7. Fedosov, S. V., Rumyantseva, V. E., Konovalova, V. S. (2016), Study of the processes of corrosion destruction of reinforced concrete products in aggressive environments with

10. Ковчур, А. С., Гречаников, А. В., Манак, П. И., Ковчур, С. Г. (2018), *Комплексное использование неорганических отходов водонасосных станций и теплоэлектроцентралей : монография*, Витебск, ВГТУ, 2018, 165 с.
11. Ковчур, А. С., Манак, П. И., Ковчур, С. Г., Потоцкий, В. Н., Сергеев, В. Ю. (2019), Строительные материалы общего назначения с добавкой техногенных продуктов химической водоподготовки ТЭЦ, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2019, № 1(36), С. 147.
12. *Руководство по определению скорости коррозии цементного камня, раствора и бетона в жидких агрессивных средах*, Москва, Научно-исследовательский институт бетона и железобетона, Стройиздат, 1975, 28 с.
13. Москвин, В. М., Иванов, Ф. М., Алексеев, С. Н., Гузеев, Е. А. (1980), *Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты*, Москва, Стройиздат, 1980, 536 с.
- chloride ions [Issledovanie protsessov korroziionnoy destruktzii zhelezobetonnykh izdeliy v agressivnykh sredakh s khlorid-ionami], *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, № 5(56), pp. 61–67.
8. Fedosov, S. V., Rumyantseva, V. E., Konovalova, V. S., Karavaev, I. V., (2017), Zhidkostnaya korroziya betonov v srede s razlichnoy stepen'yu agressivnosti [Liquid corrosion of concrete in environments with varying degrees of aggressiveness], *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, № 4(63), pp. 113–118.
9. STB 1071-2007. *Plates concrete and reinforced concrete for sidewalks of roads. Technical specifications*, Entered 2008-03-01, Minsk, The Ministry of Architecture of Republic of Belarus publ., 2008, 15 p.
10. Kauchur, A., Hrachanikau, A., Manak, P., Kauchur, S. (2018), *Kompleksnoe ispol'zovanie neorganicheskikh otkhodov vodonasosnykh stantsiy i teploelektrotsentraly : monografiya* [Integrated use of inorganic wastes of water pump stations and thermal power centers: monograph], Vitebsk, VSTU, 2018, 165 p.
11. Kovchur, A. S., Manak, P. I., Kovchur, S. G., Pototsky, V. N., Sergeev, V. Yu. (2019), Constructional materials of general purpose with additive of technogenic products of chemical water treatment of CHPP [Stroitel'nye materialy obshchego naznacheniya s dobavkoy tekhnogennykh produktov khimicheskoy vodopodgotovki TETs], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2019, № 1(36), P. 147.
12. *Rukovodstvo po opredeleniyu skorosti korrozii tsementnogo kamnya, rastvora i betona v zhidkikh agressivnykh sredakh* [Guidelines for determining the corrosion rate of cement stone, mortar and concrete in liquid aggressive environments], Moscow, Research Institute of concrete and reinforced concrete, Stroyizdat, 1975, 28 p.

13. Moskvina, V. M., Ivanov, F. M., Alekseev, S. N., Guzeev, E. A. (1980), *Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity* [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection], Moscow, Stroyizdat, 1980, 536 p.

Статья поступила в редакцию 06.09.2023 г.