

К ВОПРОСУ ОБЪЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА НА ОСНОВЕ ИНДИКАТОРНОГО МЕТОДА

А. А. Васильев¹

¹ К. т. н., доцент, профессор кафедры «Архитектура и строительство» УО «БелГУТ», Гомель, Беларусь, alex.vas.62@mail.ru

Реферат

Основным видом коррозии бетона в любых воздушных средах, способствующим развитию коррозии стальной арматуры различной степени интенсивности и определяющим, в целом, техническое состояние железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), является карбонизация бетона, которая вызывая структурные изменения цементного камня, приводит к изменению его физико-химических характеристик, уменьшая защитные свойства по отношению к стальной арматуре, что в определенных условиях вызывает образование и развитие коррозионных процессов различной степени интенсивности в стальной арматуре, снижая несущую способность ЖБЭ (ЖБК).

Влияние карбонизации на физико-химические характеристики бетона и зависимость интенсивности карбонизации от различных факторов исследовалось и исследуется многочисленными авторами. Все они основаны на использовании фенолфталеинового теста (ФФТ). Полученные результаты исследования воздействия карбонизации на физико-механические и химические свойства бетона, а также влияние технологических и климатических факторов на карбонизацию значительно отличаются, а зачастую и противоречат друг другу. Кроме того, многолетние авторские исследования карбонизации бетона, как лабораторных образцов, так и образцов бетона из реально эксплуатируемых длительные сроки в различных атмосферных условиях железобетонных элементов, показали результаты в части распределения эффективного коэффициента диффузии, а также реакции и механизма карбонизации, значительно отличающиеся от общепринятых. Кроме того, использование ФФТ не позволяет оценивать и прогнозировать карбонизацию до и после границы резкого перехода цвета бетона и ее влияние на состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре.

Таким образом, показано, что существующий метод оценки и прогнозирования карбонизации бетона и ее влияния на изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, основанный на ФФТ и рекомендуемый европейскими и белорусскими нормами, является частным случаем и не может быть рекомендован для использования при оценке и прогнозирования технического состояния реально эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона.

Ключевые слова: бетон, карбонизация, оценка существующих конструкций, долговечность.

ON THE ISSUE OF OBJECTIVITY OF MODERN ASSESSMENT AND PREDICTION OF CONCRETE CARBONIZATION BASED ON THE INDICATOR METHOD

A. A. Vasil'ev

Abstract

On results long-term laboratory and model researches of carbonating of concrete and her influence on the change of protective properties of concrete it is shown in relation to a gagers, that the existent method of estimation and prognostication of carbonating of concrete, based on the use of phenolphthalein test, does not allow objectively to estimate and forecast carbonating of concrete, her affecting change of the state of protective properties in relation to a gagers and, as a result is the technical state of the concrete and reinforce-concrete elements and constructions, exploited in different atmospheric environments.

Keywords: concrete, carbanization, evaluation of existing structures, durability.

Введение

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. Таким образом, основную долю строительных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в настоящее время, составляют железобетонные элементы (ЖБЭ) и конструкции (ЖБК) различных типов.

Большинство ЖБЭ (ЖБК) эксплуатируются в различных воздушных средах, их долговечность во многом определяется концентрацией и степенью агрессивности содержащихся в них компонентов. Поврежденность в них определяют в основном физические и химические процессы (размораживание бетона, выщелачивание, карбонизация, сульфатная коррозия и др.), обуславливаемые агрессивностью эксплуатационной среды, а также коррозия стальной арматуры, являющаяся, в первую очередь, следствием снижения защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре под воздействием различных агрессивных факторов.

Основным видом коррозии бетона в любых воздушных средах, способствующим развитию коррозии стальной арматуры различной степени интенсивности и определяющим, в целом, техническое со-

стояние ЖБЭ и ЖБК, является карбонизация бетона. Вызывая структурные изменения цементного камня, она приводит к изменению его физико-химических характеристик, уменьшая защитные свойства по отношению к стальной арматуре, что в определенных условиях вызывает образование и развитие коррозионных процессов различной степени интенсивности в стальной арматуре, снижая несущую способность ЖБЭ (ЖБК).

Задачей исследований явился анализ результатов исследования различных факторов, а также влияния карбонизации на долговечность бетона и железобетона.

Результаты исследований и их обсуждение

Влияние карбонизации на физико-химические характеристики бетона и зависимость интенсивности карбонизации от различных факторов исследовалось и исследуется многочисленными авторами. При изучении карбонизации были использованы разнообразные методы исследования: оптические, порометрические, сорбционные, индикаторные, электрохимические, физико-химические, аналитические и др. Значительная доля исследований была проведена в лабораторных условиях, и только отдельные исследования выполнены на ЖБЭ, эксплуатировавшихся длительные сроки в реальных условиях. Исследовалось воздействие карбонизации на пористость и

проницаемость, прочность, усадку, состояние защитных свойств бетона, и, наоборот, влияние технологических и климатических факторов на карбонизацию.

Полученные различными учеными результаты значительно отличаются. Так, у свежееизготовленного бетона показатели pH достигают значений 12,6–13,8, что обеспечивает защиту стальной арматуры бетоном защитного слоя, однако на сегодняшний день нет единого мнения о том, при какой величине показателя pH наступает коррозия стали. В различных источниках ее значение колеблется от 8,5 до 10,5. Есть общее мнение на то, что при карбонизации бетона его пористость и проницаемость уменьшаются, в то же время результаты исследований влияния карбонизации на прочность бетона значительно отличаются, но все они показывают, что карбонизация приводит к изменению прочности бетона (в большую либо меньшую сторону). Получены различные теоретические представления о механизме карбонизационной усадки, которые в целом не согласуются друг с другом.

Выявлена связь эффективного коэффициента диффузии углекислого газа в бетоне (D') с его водопоглощением, водоцементным отношением, составом бетона, однако определенные даже для одинаковых по составу бетонов показатели D' отличаются до нескольких порядков. Показано существенное влияние состава бетона на карбонизацию, но нет единого мнения – соответственно, методик, позволяющих учесть состав бетона при прогнозировании скорости карбонизации. Также нет единой точки зрения на изменение скорости карбонизации при различных условиях окружающей среды. Аналогично нет общего мнения о механизме карбонизации. Морфологические исследования карбонизированного цементного камня и его отдельных компонентов не привели к получению данных, которые позволили бы объяснить физические свойства или механизм карбонизации. Многообразие точек зрения ученых на механизм карбонизации, как следствие, не позволяет получить его единой трактовки. Это обусловлено упрощенным методическим подходом к изучению кинетики карбонизации, так как свойства самого бетона зависят от многих факторов и условий эксплуатационной среды.

Все исследования карбонизации бетона базируются на основном уравнении карбонизации, которое выведено авторами работы [2], опираясь на теоретические основы диффузионной кинетики и экспериментальные результаты, в которых нейтрализация бетона углекислым газом рассматривается с позиций гетерогенных химических реакций. В общем виде оно записывается следующим образом:

$$x = A\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

$$A = \sqrt{\frac{2D'C}{m_0}}, \quad (2)$$

где D' – эффективный коэффициент диффузии CO_2 , $\text{см}^2/\text{с}$; C – концентрация CO_2 в атмосфере в относительных единицах по объему; m_0 – реакционная емкость бетона, см^3 .

Многочисленными учеными постоянно производятся исследования различных параметров, влияющих на коэффициент «А» (в части состава бетона, технологических параметров, условий эксплуатации и др. для улучшения соответствия расчетных результатов реальным. Это показывает, что, несмотря на единую методику оценки толщины карбонизированного слоя фенолфталеиновым тестом (ФТ), на сегодняшний день не существует зависимости, позволяющей реально, с достаточной точностью оценивать и прогнозировать развитие карбонизации во времени по сечению бетонов любых классов по прочности (составов), эксплуатирующихся в различных воздушных средах.

Исследователи считают, что уточняя многочисленные параметры, можно приблизить расчетные значения глубины карбонизации к фактическим, однако было бы логичным, если бы фенолфталеиновый (либо любой другой) тест показывал не абстрактную величину карбонизации, а сечение «здорового» бетона, сохраняющего свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре, разделяя его по цвету с карбонизированным (потерявшим защитные свойства).

Поскольку карбонизацию бетона определяют ФТ, изменяющим окраску бетона, значит, он должен показывать либо границу карбонизированного слоя (остановки карбонизации), либо, при продолжении карбонизации по сечению бетона и во времени, – изменение

толщины слоя, потерявшего свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре.

Рассмотрим оба условия. Самое важное состоит в том, что ФТ не показывает границу прекращения карбонизации бетона. Насыщение бетона углекислым газом – карбонизация, продолжается вглубь по сечению бетона практически всю жизнь ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся в воздушных средах, что, начиная с 2003 г., в своих многочисленных работах показал автор [3–13 и др.], кроме того, и другие ученые, приводя результаты своих исследований, показывают, что поглощение углекислого газа по сечению бетона происходит не линейно, а по сложной зависимости. А первыми в своей работе [2] были С. Н. Алексеев и Н. К. Розенталь, приведшие зависимости распределения связанной углекислоты по сечению образцов цементно-песчаного раствора с различными В/Ц, хотя в дальнейшем это не было развито.

ФТ – химическая реакция взаимодействия фенолфталеина с едким натром и гидроксидом кальция, вызывающая обесцвечивание (окраску) раствора при определенном значении показателя щелочности поровой жидкости (pH), но никак не индикатор окончания карбонизации.

При эксплуатации ЖБЭ (ЖБК), особенно длительные сроки, при вскрытии бетона защитного достаточно часто стальная арматура находится в коррозионном состоянии различной степени интенсивности в зоне, которая после обработки бетона фенолфталеином имеет ярко выраженную окраску, что легко объяснимо, ведь общеизвестно, что ФТ показывает изменение показателя щелочности среды в области значений pH от 8,5 до 14, изменяя окраску с бесцветной, до ярко-малиновой, а состояние стальной арматуры в таком огромном диапазоне щелочности определяется от пассивного до коррозионного высокой степени интенсивности.

Ранее в работе [14] по результатам исследования образцов цементно-песчаной фракции было получено, что значение границы нейтрализованного слоя соответствует показателю pH $\approx 10,3$. То есть стальная арматура, находясь в зоне, считающейся защитной для стальной арматуры (pH = 10,3÷11,8), может и корродировать в условиях доступа кислорода и влаги из воздуха. Таким образом, ФТ – частный случай, показывающий толщину бетона, снизившего свои защитные свойства до показателя pH $\approx 10,3$, что не позволяет оценивать и прогнозировать карбонизацию до и после граничного значения pH и ее влияние на состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, и, тем более, оценивать и прогнозировать техническое состояние ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона, продолжающейся в атмосферных условиях весь срок эксплуатации ЖБЭ (ЖБК).

Если применять индикаторный тест, то уже значительно более объективные результаты можно было бы получить для оценки слоя бетона, потерявшего свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре, используя индигокармин, резкий переход окраски которого с синей к зелено-желтой происходит при pH $\approx 11,5$.

Кроме того, многолетние авторские исследования карбонизации бетона, как лабораторных образцов, так и образцов бетона из реально эксплуатируемых длительные сроки в различных атмосферных условиях ЖБЭ, показали результаты в части распределения эффективного коэффициента диффузии, а также реакции и механизма карбонизации, значительно отличающиеся от общепринятых [3–13]. Так, сегодня реакция карбонизации объясняется на основе теоретического расчета проскока молекул CO_2 вглубь бетона за границу нейтрализованного слоя до момента их полного поглощения, и глубина зоны реакции не превышает 1 мм, что не подтверждается экспериментальными результатами исследования кинетики и механизма взаимодействия углекислого газа воздуха с гидроксидом кальция, составляющей основу поровой жидкости бетона, в соответствии с которыми: процесс карбонизации относится к гетерогенной химической реакции 1-го порядка и характеризуется сложностью и многостадийностью, он состоит из диффузионного подвода к фазовой границе реагирующих веществ, химической реакции с возникновением и ростом кристаллов карбоната в тонком поверхностном слое раствора без отвода продуктов реакции; образование карбонатов в объеме поровой влаги невозможно вследствие того, что K (константа скорости) $\gg D$ (коэффициента диффузии). Образование CaCO_3 происходит в тонком слое жидкой фазы на границе воздух – раствор Ca(OH)_2 ; процесс карбонизации в поровом

пространстве рассматривается по аналогии с действием гидравлического насоса, в котором изменение температуры и влажности в поровом пространстве способствует смене уровня поровой жидкости, служащей поршнем гидравлического насоса в газовой среде поры. Чем чаще происходят перепады температуры и меняется влажность, тем выше скорость карбонизации (особенно в поверхностных слоях бетона) из-за более эффективной работы гидравлических насосов, обеспечивающих подсос воздуха в поры. Соответственно, максимальная скорость карбонизации будет наблюдаться в поверхностных слоях бетона, что подтверждается при анализе распределения карбонатной составляющей по сечению бетона, контактирующего с воздухом. С одной стороны, на такой глубине максимально облегчен диффузионный подвод CO_2 в зону химической реакции, с другой – там наблюдается быстрая смена влаги в капиллярно-поровой структуре бетона в зоне, где происходит химическое взаимодействие CO_2 с $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Общепринятый механизм определяет течение карбонизации линейно вглубь бетона с прохождением самой реакции в тонком слое (до 1 мм), что совершенно не соответствует протеканию карбонизации в реально эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК. Авторские исследования показывают, что течение карбонизации по сечению бетона во времени изменяется по сложной экспоненциальной зависимости, при этом максимальные значения карбонатной составляющей и минимальные значения показателя pH отмечаются в поверхностном слое бетона, соответственно, в глубине, карбонизация минимальна, а щелочность – максимальна.

Скорость карбонизации определяется эффективным коэффициентом диффузии CO_2 , искусственно введенным для увязки параметров карбонизации с величиной прокарибонизированного слоя, в соответствии с которым процесс карбонизации характеризуется 1-м законом Фика, что абсолютно не подтверждается результатами исследования образцов бетона (лабораторных и отобранных из реально эксплуатируемых элементов), в соответствии с которыми полученные по результатам исследованной реально эксплуатируемых ЖБЭ значения D' на несколько порядков ниже значений, полученных в лабораторных условиях различными авторами, и в значительно большей степени соответствуют химическим представлениям о размерности коэффициента диффузии; рассчитанные по существующей методике значения D' по сечению, как лабораторных образцов бетона, так и образцов бетона реально эксплуатируемых элементов и конструкций являются переменной величиной для изделий из бетона одного состава и эксплуатируемых в одинаковых условиях, что не подтверждает справедливость использования 1-го закона Фика для характеристики поведения бетона в процессе эксплуатации конструкций в воздушной среде.

Кроме того, по результатам исследования кинетики испарения воды, адсорбции и десорбции паров влаги, водонасыщения и испарения влаги по сечению образцов бетона различных классов по прочности, адсорбции и десорбции паров влаги по сечению образцов бетона различных классов по прочности автором выявлено: скорость переноса влаги, адсорбции и десорбции паров воды в порах бетона снижается от поверхности вглубь бетона. Она максимальна в поверхностных слоях бетона (до 25 мм), что практически соответствует толщине защитного слоя бетона ЖБЭ и отличается в зависимости от состава бетона (класса бетона по прочности); характер распределения влаги в порах бетона по сечению конструкций совпадает с характером изменения содержания карбонатов по сечению бетона длительно эксплуатируемых конструкций; возвратно-поступательное движение поровой влаги определяется цикличностью дождевых осадков, изменения влажности воздуха, воздействия солнечной радиации и, в свою очередь, определяет скорость карбонизации.

Оценка карбонизации и прогнозирование ее развития важны, прежде всего, с точки зрения изменения во времени защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, и, соответственно, влияния карбонизации на изменение технического состояния ЖБЭ и ЖБК. Известно, что состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре определяется величиной показателя pH (показателя водной вытяжки цементного камня), значение которого, в свою очередь, обуславливается степенью карбонизации бетона. Поскольку в зоне нанесения индикатора ФТТ показывает изменение показателя pH в пределах 8,3 до 14, в зоне резкого перепада цвета цементно-песчаной фракции значение показателя pH

составляет $\approx 10,3$, общепринято, что при $\text{pH} = 9,0$ бетон полностью теряет свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре, а, в соответствии с термодинамическими расчетами В. И. Бабушкина [15] коррозия стальной арматуры возможна при $\text{pH} < 11,8$, значение $\text{pH} = 10,3$ не является граничным и никак не позволяет корректно судить о степени потери защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре. Кроме того, отсутствуют критерии оценки потери защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, что не позволяет судить о техническом состоянии ЖБЭ и ЖБК и тем более прогнозировать его изменение.

Оценка степени карбонизации бетона осуществляется нормативными документами (в Европе – EN 13295, EN 14630, в Республике Беларусь – СТБ 1481) на основе использования фенолфталеинового теста (ФТТ). Помимо приведенного выше анализа корректности применения индикаторного теста, при использовании данных документов для оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации возникают дополнительные серьезные вопросы: степень карбонизации бетона характеризуется содержанием химически связанного цементным камнем диоксида углерода (CO_2) в виде карбоната кальция, т. е. его количеством, что не только нелогично, но и просто непонятно, поскольку степень любого параметра должна определять отношение величин, но никак не количество; поскольку заявлено определение степени карбонизации, то, соответственно, не только целесообразно, но и необходимо определять карбонатную составляющую (показатель КС, %), т. е. количество образовавшегося карбоната кальция (CaCO_3), поскольку именно его образование вызывает структурные изменения бетона, приводя к его деградации; в результате анализа (СТБ 1481) определяется степень карбонизации бетона с точностью до 0,2 %. Полученная абсолютная величина, (%), ни с чем не сравнивается. Отсутствуют критерии оценки состояния бетона и, как следствие, неясен смысл проведения анализа.

Таким образом, становится ясно, что существующий метод оценки и прогнозирования карбонизации бетона, основанный на ФТТ и рекомендуемый европейскими и белорусскими нормами, является частным случаем и не может быть рекомендован для использования при оценке и прогнозировании технического состояния реально эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона.

Для возможности оценки толщины бетона, потерявшего свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре, необходимо исследовать развитие карбонизации по сечению бетонов во времени различных классов по прочности (составов) в разных эксплуатационных условиях, ее влияние на изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, установить зависимость коррозионного состояния стальной арматуры от физико-химических показателей защитного слоя бетона, граничные значения физико-химических показателей бетона, определяющих изменения коррозионного состояния бетона и стальной арматуры. Только такой подход позволит разработать объективный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях с учетом процессов карбонизации бетона.

Необходима разработка национального нормативного документа по определению карбонизации и оценке технического состояния ЖБЭ и ЖБК с учетом процессов карбонизации бетона. При его разработке может быть использован комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ (ЖБК), основанный на многолетних авторских исследованиях карбонизации бетона и ее влияния на изменение технического состояния ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах [16], включающий в себя методики оценки и прогнозирования карбонизации бетона и состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре защитного слоя бетона, состояния стальной арматуры и технического состояния ЖБЭ (ЖБК) в целом.

Заключение

Выполненные исследования позволили обосновать необходимость: 1) исследования изменения карбонизации во времени по сечению бетона и ее влияния на состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре не индикаторными методами, а методами pH- и карбометрии (определения показателей pH и КС), поскольку показатель pH является основной количественной характеристикой

перерождения цементного камня в карбонаты под воздействием внешней среды и является универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, а показатель КС (карбонатная составляющая) характеризует количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона в массовых процентах и его влияние на изменение показателя pH; 2) создания на основе результатов реальных исследований параметров карбонизации и ее влияния на изменение технического состояния ЖБЭ и ЖБК нормативного документа Республики Беларусь для качественного повышения объективности оценки долговечности ЖБЭ (ЖБК) при проектировании либо детальном обследовании зданий и сооружений.

Список цитированных источников

1. Железобетон в XXI веке : состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России / Госстрой России; НИИЖБ. – М. : Готика, 2001. – 684 с.
2. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.
3. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
4. Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 304 с.
5. Васильев, А. А. Исследование карбонизации железобетонных конструкций с момента их изготовления / А. А. Васильев // Материалы, технологии, инструменты. – 2004. – Т. 9, № 4. – С. 30–33.
6. Васильев, А. А. Исследование кинетики и механизма карбонизации поровой влаги бетона в реальных условиях / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2007. – № 6. – С. 39–44.
7. Васильев, А. А. Исследование коэффициента диффузии углекислого газа воздуха в карбонизированном бетоне / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – Гомель : БелГУТ, 2008. – № 2(17). – С. 73–75.
8. Васильев, А. А. Оценка существующей модели карбонизации бетона / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2009. – № 1(22). – С. 54–58.
9. Васильев, А. А. Исследование характера изменения щелочности поровой жидкости по сечению бетона / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2012. – № 1(40). – С. 10–13.
10. Васильев, А. А. Физический анализ бетона (РН-метрия) – основа оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре / А. А. Васильев, Л. В. Пликус // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – Гомель : БелГУТ, 2014. – № 1(28). – С. 73–76.
11. Васильев, А. А. Оценка использования эффективного коэффициента диффузии углекислого газа воздуха для определения карбонизации бетона / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – Гомель : БелГУТ, 2014. – № 2(29). – С. 91–93.
12. Васильев, А. А. К вопросу оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода / А. А. Васильев // European Scientific Conference : сб. статей V Междунар. науч.-практ. конф. : в 3 ч. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2019. – Ч. 1 – С. 199–203.
13. Васильев, А. А. К вопросу необходимости учета карбонизации бетона в нормативных документах Республики Беларусь по оценке технического состояния железобетонных элементов и конструкций / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа : Наука и транспорт. – Гомель : БелГУТ, 2017. – № 1(34). – С. 87–88.
14. Кудрявцев, И. А. Исследование равномерности глубины залегания карбонизированного слоя по глубине в балке пролетного строения / И. А. Кудрявцев, В. П. Богданов // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений, подготовки инженерных кадров для строительной отрасли : материалы VII Междунар. науч.-практ. семинара. – Минск : Стринко, 2001. – С. 227–229.
15. Бабушкин, В. И. Термодинамика силикатов / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мchedlov-Петросян; под ред. О. П. Мchedlova-Petrosyana. – 4-е изд. – М. : Стройиздат, 1986. – 408 с.
16. Васильев, А. А. Совершенствование оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях / А. А. Васильев // Проблемы современного бетона и железобетона : сборник научных трудов. – Минск, 2017. – Выпуск 9 – С. 148–167.

References

1. Zhelezobeton v XXI veke : sostoyanie i perspektivy razvitiya betona i zhelezobetona v Rossii / Gosstroj Rossii; NIIZHB. – M. : Gotika, 2001. – 684 s.
2. Alekseev, S. N. Korroziionnaya stojkost' zhelezobetonnih konstrukcij v agressivnoj promyshlennoj srede / S. N. Alekseev, N. K. Rozental'. – M. : Strojizdat, 1976. – 205 s.
3. Vasil'ev, A. A. Karbonizaciya i ocenka povrezhdenosti zhelezobetonnih konstrukcij : [monografiya] / A. A. Vasil'ev ; M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Belorus. gos. un-t transp. – Gome'l' : BelGUT, 2012. – 263 s.
4. Vasil'ev, A. A. Karbonizaciya betona (ocenka i prognozirovaniye) : [monografiya] / A. A. Vasil'ev ; M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Belorus. gos. un-t transp. – Gome'l' : BelGUT, 2013. – 304 s.
5. Vasil'ev, A. A. Issledovanie karbonizacii zhelezobetonnih konstrukcij s momenta ih izgotovlenii / A. A. Vasil'ev // Materialy, tekhnologii, instrumenty. – 2004. – T. 9, № 4. – S. 30–33.
6. Vasil'ev, A. A. Issledovanie kinetiki i mekhanizma karbonizacii porovoj vlagi betona v real'nyh usloviyah / A. A. Vasil'ev // Stroitel'naya nauka i tekhnika. – 2007. – № 6. – S. 39–44.
7. Vasil'ev, A. A. Issledovanie koefficienta diffuzii uglekislogo gaza vozduha v karbonizirovannom betone / A. A. Vasil'ev // Vestnik BelGUTa: Nauka i transport. – Gome'l' : BelGUT, 2008. – № 2(17). – S. 73–75.
8. Vasil'ev, A. A. Ocenka sushchestvuyushchej modeli karbonizacii betona / A. A. Vasil'ev // Stroitel'naya nauka i tekhnika. – 2009. – № 1(22). – S. 54–58.
9. Vasil'ev, A. A. Issledovanie haraktera izmeneniya shche-lochnosti porovoj zhidkosti po secheniyu betona / A. A. Vasil'ev // Stroitel'naya nauka i tekhnika. – 2012. – № 1 (40). – S. 10–13.
10. Vasil'ev, A. A. Fizicheskij analiz betona (RN-metriya) – osnova ocenki sostoyaniya zashchitnyh svojstv betona po otnosheniyu k stal'noj armature / A. A. Vasil'ev, L. V. Pliukus // Vestnik BelGUTa: Nauka i transport. – Gome'l' : BelGUT, 2014. – № 1(28). – S. 73–76.
11. Vasil'ev, A. A. Ocenka ispol'zovaniya effektivnogo koefficienta diffuzii uglekislogo gaza vozduha dlya opredeleniya karbonizacii betona / A. A. Vasil'ev // Vestnik BelGUTa: Nauka i transport. – Gome'l' : BelGUT, 2014. – № 2(29). – S. 91–93.
12. Vasil'ev, A. A. K voprosu ocenki i prognozirovaniya karbonizacii betona na osnove indikatornogo metoda / A. A. Vasil'ev // European Scientific Conference: sb. statej V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. : v 3 ch. – Penza : MCNS «Nauka i prosveshchenie», 2019. – Ch.1 – S. 199–203.
13. Vasil'ev, A. A. K voprosu neobhodimosti ucheta karbonizacii betona v normativnyh dokumentah Respubliki Belarus' po ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnih elementov i konstrukcij / A. A. Vasil'ev // Vestnik BelGUTa : Nauka i transport. – Gome'l' : BelGUT, 2017. – № 1(34). – S. 87–88.
14. Kudryavcev, I. A. Issledovanie ravnomernosti glubiny zaleganiya karbonizirovannogo sloya po glubine v balke proletnogo stroeniya / I. A. Kudryavcev, V. P. Bogdanov // Problemy tekhnologii proizvodstva stroitel'nyh materialov, izdelij i konstrukcij, stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij, podgotovki inzhenernyh kadrov dlya stroitel'noj otrasli : materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. seminar. – Minsk : Strinko, 2001. – S. 227–229.
15. Babushkin, V. I. Termodinamika silikatov / V. I. Babushkin, G. M. Matveev, O. P. Mchedlov-Petrosyan; pod red. O. P. Mchedlova-Petrosyana. – 4-e izd. – M. : Strojizdat, 1986. – 408 s.
16. Vasil'ev, A. A. Sovershenstvovanie ocenki i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnih elementov i konstrukcij, ekspluatiruyushchihsya v razlichnyh atmosferynyh usloviyah / A. A. Vasil'ev // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona : sbornik nauchnyh trudov. – Minsk, 2017. – Vypusk 9 – S. 148–167.

Материал поступил в редакцию 31.01.2020