

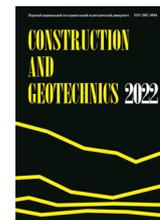


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 3, 2023

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.06

УДК 677.027

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДИКАТОРНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА

И.Н. Гоглев¹, С.А. Логинова²

¹Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Россия

²Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 09 февраля 2023

Одобрена: 23 июня 2023

Принята к публикации:
24 июля 2023

Ключевые слова:

защитный слой бетона, арматура, карбонизация, метод фенолфталеиновой пробы, индикаторы.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время одной из важнейших проблем является воздействие агрессивных сред на железобетонные конструкции, в результате чего запускается процесс их разрушения. Одной из причин выхода железобетонных конструкций из строя является процесс карбонизации бетона. На практике для своевременного устранения и предотвращения проблемы карбонизации бетона применяется индикаторный метод определения поврежденных зон. Однако традиционный метод фенолфталеиновой пробы не позволяет с высокой точностью определять пограничные зоны бетона, наиболее уязвимые к карбонизации. В статье рассматривается возможность усовершенствования метода фенолфталеиновой пробы с помощью использования дополнительных растворов кислотно-основных индикаторов ализарина и нейтрального красного. Представлены результаты экспериментов по измерению поверхностного нейтрализованного слоя бетона спиртовыми растворами кислотно-основных индикаторов ализарина и нейтрального красного на бетонных образцах различного возраста и размера. Приведены результаты сравнительного анализа традиционного и усовершенствованного методов определения карбонизации бетона. Предлагаемый авторами метод отличается большей точностью получаемых результатов. Раствор нейтрального красного расширяет границы применения метода фенолфталеиновой пробы для определения зон карбонизации бетона при $6 < \text{pH} < 10,5$. Использование ализарина в дополнение к раствору фенолфталеина является затруднительным, поскольку раствор индикатора имеет слишком тусклое окрашивание, в результате чего определение зон сильнощелочного бетона является недостаточно точным. В связи с тем, что метод фенолфталеиновой пробы имеет ограничения в применении исследователями на полевой стадии, целесообразно продолжить поиск индикаторов, которые смогут дополнить или полноценно заменить фенолфталеин для данных целей.

© ПНИПУ

© Гоглев Илья Николаевич – соискатель, e-mail: azidplumbum00@mail.ru.

Логинова Светлана Андреевна – кандидат технических наук, e-mail: sl79066171227@yandex.ru.

Ilya N. Goglev – Applicant, e-mail: azidplumbum00@mail.ru.

Svetlana A. Loginova – Ph. D. in Technical Sciences, e-mail: sl79066171227@yandex.ru.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF INDICATOR METHODS IN DETERMINING THE CARBONIZATION OF CONCRETE

I.N. Goglev¹, S.A. Loginova²

¹Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

²Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 09 February 2023

Approved: 23 June 2023

Accepted for publication:
24 July 2023

Keywords:

protective layer of concrete,
reinforcement, carbonization,
phenolphthalein test method,
indicators.

ABSTRACT

Currently, one of the most important problems is the impact of aggressive environments on reinforced concrete structures, as a result of which the process of their destruction is triggered. One of the reasons for the failure of reinforced concrete structures is the process of carbonization of concrete. In practice, in order to timely eliminate and prevent the problem of carbonization of concrete, an indicator method for determining damaged zones is used. However, the traditional phenolphthalein test method does not allow to determine with high accuracy the boundary zones of concrete that are most vulnerable to carbonization. The article discusses the possibility of improving the phenolphthalein test method by using additional solutions of acid-base indicators alizarin and neutral red. The results of experiments on measuring the surface neutralized layer of concrete with alcohol solutions of acid-base indicators alizarin and neutral red on concrete samples of various ages and sizes are presented. The results of a comparative analysis of the traditional and improved methods for determining the carbonization of concrete are presented. The method proposed by the authors is distinguished by greater accuracy of the results obtained. The solution of neutral red expands the boundaries of the application of the phenolphthalein test method for determining the carbonization zones of concrete at $6 < \text{pH} < 10.5$. The use of alizarin in addition to the phenolphthalein solution is difficult because the indicator solution is too dull in color, resulting in the definition of zones of highly alkaline concrete not being accurate enough. Due to the fact that the phenolphthalein test method has limitations in its use by examiners at the field stage, it is advisable to continue the search for indicators that can supplement or fully replace phenolphthalein for these purposes.

© PNRPU

Введение

В практике обследования железобетонных строительных конструкций, эксплуатирующихся в условиях открытого воздуха и атмосферной влажности, часто выявляют повреждения защитного бетонного слоя [1, 2]. Причина данной проблемы кроется в карбонизации бетона.

Наиболее часто описываемое явление встречается при обследовании конструкций, эксплуатируемых длительное время во влажной среде (рис. 1) [3, 4]. На рис. 1 хорошо виден поврежденный в результате карбонизации защитный слой бетона, оголенная продольная напрягаемая арматура, покрытая продуктами коррозии.

Исследования в данной области показывают, что карбонизация бетона продолжается во все время эксплуатации строительных конструкций, однако процесс карбонизации не распространяется на значительную глубину [3, 4].

Стоит отметить, что в настоящее время наиболее используемым способом выявления карбонизации и определения глубины ее фронта в полевых условиях является метод фенолфталеиновой пробы [5]. Особенностью этого метода является наличие одного рабочего интервала рН-перехода окраски раствора фенолфталеина, а также отсутствие единого мнения о значении рН бетона [6–8], при которых он начинает терять свои пассивирующие свойства по отношению к стальной арматуре.



Рис. 1. Карбонизация ребристой плиты покрытия. Срок эксплуатации конструкции более 35 лет
Fig. 1. Carbonization of the ribbed cover plate. The service life of the structure is more than 35 years

В связи с этим авторами статьи была предпринята попытка поиска способа усовершенствования метода фенолфталеиновой пробы, повышения его эргономичности или создания альтернативных методов выявления карбонизации в полевых условиях с более высокими показателями точности.

Актуальность темы исследования очевидна, поскольку процесс карбонизации влияет на долговечность железобетонных конструкций, приводит к снижению физико-механических свойств бетона [6].

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовались пять образцов кубической формы с гранью 10 см из тяжелого бетона класса прочности В30, марки по водонепроницаемости W6 и десять образцов кубической формы с гранью 3 см из мелкозернистого бетона, изготовленные на основе портландцемента марки ЦЕМ I 42,5 с водоцементным отношением, равным 0,3. Величина отклонения образцов не превышала $\pm 1,5$ мм. Возраст образцов с гранью 10 см составлял около 3–5 лет, а возраст образцов с гранью 3 см не превышал 180 сут. Разный возраст образцов был выбран с целью более точного определения работы растворов испытываемых кислотно-основных индикаторов.

Для проведения экспериментальных исследований применялись следующие приборы и оборудование: измеритель влажности диэлькометрический Testo 606-1, портативный рН-метр электрометрический Testo 206-pH1 (сертификат Госреестра СИ РФ DE.C.31.010.A № 43924/1), цифровая зеркальная фотокамера с возможностью быстрой съёмки марки Canon 1200D, аппарат для газирования очищенной и дистиллированной воды модели Oursson OS1000SK, перфоратор аккумуляторный DeWALT DCH133M1.

Для выявления участков поврежденного бетона в лабораторных условиях применялась авторская методика создания искусственных условий нейтрализации «свободного» гидроксида кальция [7]. Грани испытываемых образцов предварительно смачивались дистиллированной водой и погружались в открытый пластиковый сосуд. После пластиковый сосуд устанавливался в другой закрытый герметичный сосуд большего размера. В закрытом сосуде находилась активная коррозионная среда – дистиллированная вода, насыщенная углекислым газом (рис. 2).

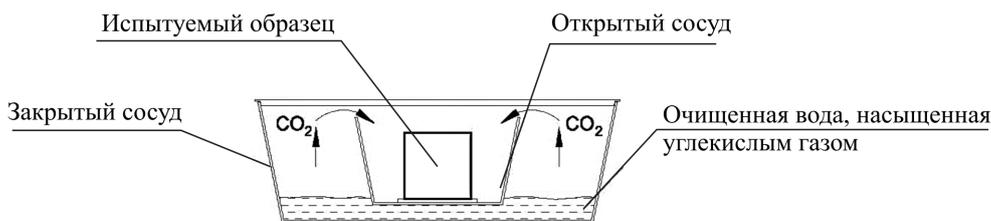


Рис. 2. Создание условий искусственной нейтрализации pH бетона в условиях действия угольной кислоты

Fig. 2. Creation of conditions for artificial neutralization of the pH of concrete under the action of carbonic acid

В среде углекислого газа образцы находились 28 сут, после чего вынимались и помещались непосредственно в раствор угольной кислоты на 120 сут (рис. 3). Раствор угольной кислоты менялся один раз в два дня для поддержания необходимого уровня pH раствора (также сам раствор дополнительно подкисляли), при этом каждый день проверялась и контролировалась влажность бетонных образцов.

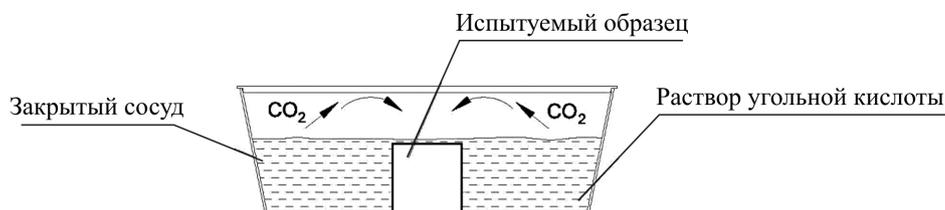


Рис. 3. Нахождение образцов в растворе коррозионно-активной среды (угольной кислоты)

Fig. 3. Finding samples in a solution of a corrosive medium (carbonic acid)

Часть испытуемых образцов находилась в условиях открытого воздуха без доступа к углекислой коррозионной среде.

После нахождения образцов в агрессивной углекислой среде в течение указанного срока производилось полное высушивание образцов. Высушенные образцы подвергали предварительной подготовке – наносили разметку по срединным линиям (рис. 4, а). Мелкоразмерные образцы подвергали раскалыванию по срединной линии (рис. 4, б), после чего в местах скола производили определение фактической глубины карбонизированного слоя растворами кислотно-основных индикаторов – КОИ (рис. 4, в, г).

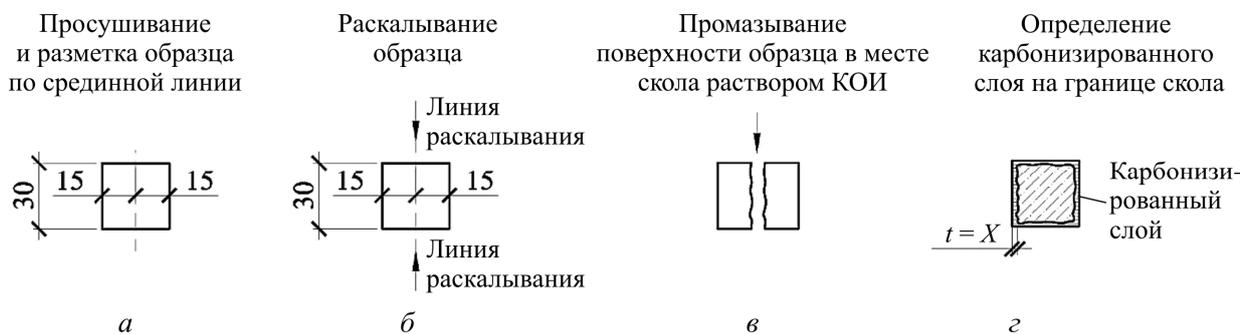


Рис. 4. Стадии лабораторных испытаний мелкоразмерных образцов-кубиков: а – просушивание и разметка образца по срединной линии; б – раскалывание образца; в – промазывание поверхности образца в месте скола раствором кислотно-основных индикаторов; г – определение карбонизированного слоя на границе скола

Fig. 4. Stages of laboratory testing of small-sized cube samples: а – drying and marking the sample along the midline; б – splitting the sample; в – smearing the sample surface at the cleavage site with a solution of acid-base indicators; г – determination of the carbonized layer at the cleavage boundary

Образцы с гранью в 10 см также подвергали высушиванию и разметке по срединным линиям. В центре пересечения срединных линий просверливались контрольные отверстия диаметром 24 и глубиной 36 мм (рис. 5). Полости отверстий тщательно очищались от пыли (в том числе и дистиллированной водой), после чего по стенкам отверстий наносили приготовленные растворы кислотно-основных индикаторов. В течение некоторого времени в местах карбонизированного слоя фиксировали характерное окрашивание раствора индикатора с помощью фотоаппарата.

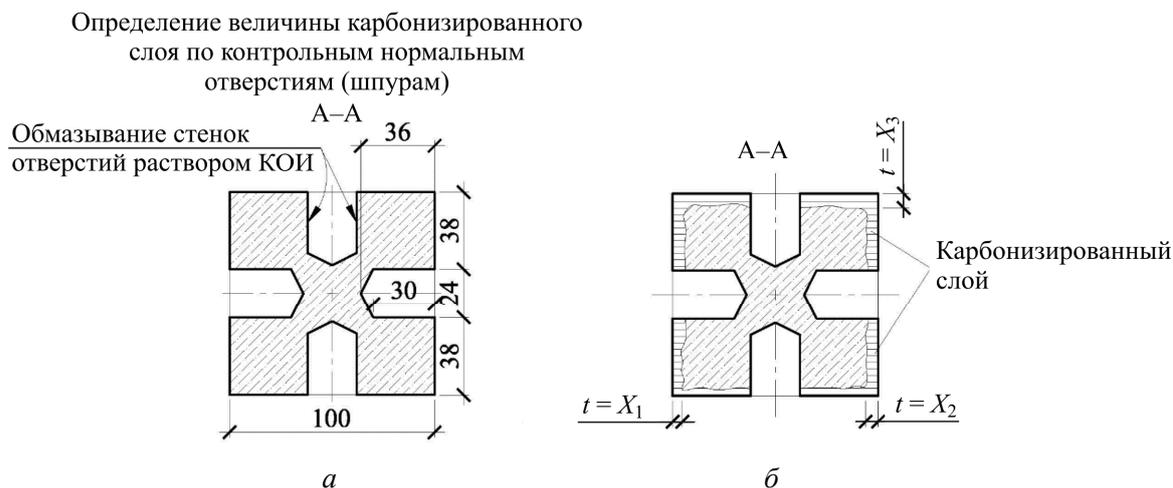


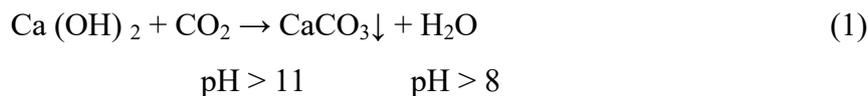
Рис. 5. Определение фактической глубины карбонизации образцов методом контрольных отверстий: *a* – сечении испытуемого образца; *б* – разрез А-А по сечению образца

Fig. 5. Determining the actual depth of carbonization of samples by the method of control holes: *a* – the section of the test specimen; *б* – section A-A along the section of the sample

Растворы индикаторов ализарина и нейтрального красного подготавливали в соответствии с требованиями приготовления ализаринсодержащих и других индикаторов по государственным стандартам, используемым для определения pH различных сред [8–10]. Применялись 0,1 и 1%-ные растворы ализарина и нейтрального красного в этиловом спирте по требованиям государственных стандартов.

Результаты

В ходе проведения экспериментов при нормальном атмосферном давлении происходило выделение углекислого газа из раствора угольной кислоты, вследствие чего его молекулы адсорбировались в поры бетонных образцов и во влажной среде начинался медленный процесс нейтрализации «свободного» гидроксида кальция по реакциям (1) и (2). При непосредственном нахождении образцов в коррозионно-активной среде было зафиксировано ускорение нейтрализации щелочной среды бетона [11–16].



Спиртовой раствор ализарина имеет три интервала перехода окраски, благодаря чему возможно определение границ зон бетона высокой щелочности с $12 \geq \text{pH} \geq 10,1$ и границ зон нейтрализованного и подкисленного бетона с $\text{pH} < 7,5$ [13, 17–19]. Согласно теоретическим данным, оттенок окрашивания ализарина более темный, вследствие чего участки карбонизи-

рованного бетона при попеременном нанесении на поверхность двух индикаторов должны быть заметны. Следовательно, использование раствора данного индикатора в теории позволит повысить универсальность применения метода фенолфталеиновой пробы.

Спиртовой раствор нейтрального красного имеет один интервал перехода окраски, но в сторону меньшего значения рН бетона с $6,8 \leq \text{pH} < 8,0$ [20–22]. Смена окраски индикатора настолько явная, что позволяет без проблем контролировать состояние поверхности бетона. Фактическую глубину карбонизации определяли растворами кислотно-основных индикаторов по зонам видимых областей характерного окрашивания (рис. 6).

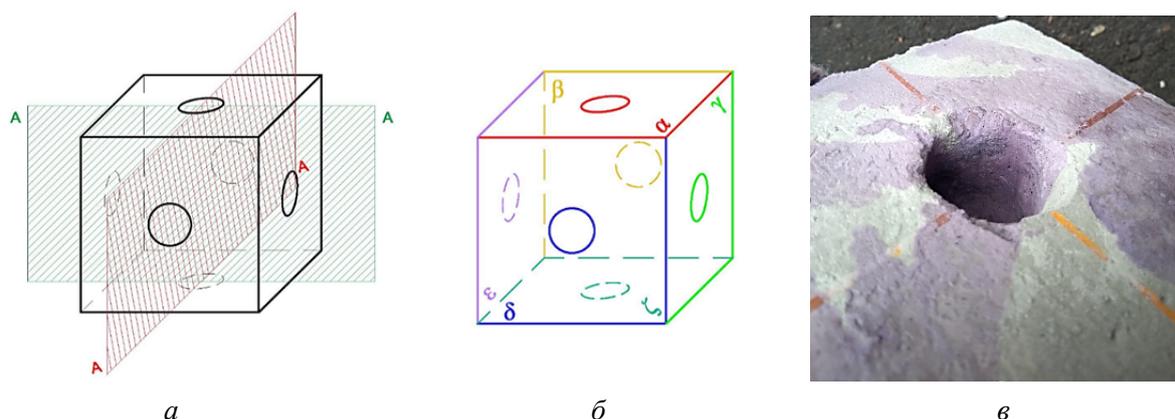


Рис. 6. Расположение контрольных отверстий (а); наименование сторон в лабораторных образцах (б); окрашивание щелочных зон бетона раствором ализарина по стенкам контрольных отверстий (в)

Fig. 6. The location of the control holes (a); the name of the parties in the laboratory samples (b); staining of alkaline zones of concrete with a solution of alizarin along the walls of the control holes (v)

В то же время определение фактической глубины карбонизации бетона [23–26] нескольких образцов проводили и методом фенолфталеиновой пробы с целью сравнения точности и границ применения методов.

В результате экспериментов для испытываемых образцов была определена фактическая глубина карбонизации бетона с использованием исходного и модернизированного методов фенолфталеиновой пробы. Результаты приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значение фактической глубины нейтрализации бетона испытываемых образцов
 размером $3 \times 3 \times 3$ см

Table 1

The value of the actual depth of neutralization of the concrete of the test samples $3 \times 3 \times 3$ sm

№ образца	Наименование лабораторных образцов, сторона		Среда эксплуатации	Фактическая глубина карбонизации X, мм	
				исходный метод	модернизированный метод
1	Куб № 1	Верхняя и боковые грани	Агр. CO ₂	~4,0	3,7
		Нижняя грань		3,9	3,8
2	Куб № 2	Верхняя и боковые грани	Агр. CO ₂	4,2	4,0
		Нижняя грань		3,25	3,5
3	Куб № 3	Верхняя и боковые грани	Агр. CO ₂	4,0	3,8
		Нижняя грань		3,7	3,7
4	Куб № 4	Верхняя и боковые грани	Агр. CO ₂	3,9	3,9
		Нижняя грань		4,1	3,9

Окончание табл. 1

№ образца	Наименование лабораторных образцов, сторона		Среда эксплуатации	Фактическая глубина карбонизации X, мм	
				исходный метод	модернизированный метод
5	Куб № 5	Верхняя и боковые грани	Агр. CO ₂	4,0	4,0
		Нижняя грань		4,0	3,8
6	Куб № 6	Верхняя и боковые грани	Агр. CO ₂	4,2	3,8
		Нижняя грань		4,0	3,6
7	Куб № 7		Неагрессивная	0	0
8	Куб № 8		Неагрессивная	0	0
9	Куб № 9		Неагрессивная	0,1	0,1
10	Куб № 10		Неагрессивная	0	0

Примечание: в табл. 1, 2 агр. – агрессивный.

Таблица 2

Значение фактической глубины нейтрализации бетона испытываемых образцов размером 10 × 10 × 10 см

Table 2

The value of the actual depth of neutralization of the concrete of the test samples 10 × 10 × 10 sm

№ образца	Фактическая глубина карбонизации X, мм	Среда эксплуатации	Наименование лабораторных образцов, сторона					
11		Агр. CO ₂	куб № 1 (возраст 5 лет)					
			стороны куба					
	Исходный метод		α	β	γ	δ	ε	ζ
	Модернизированный метод		2,0	1,5	1,7	1,5	1,6	2,1
			2,0	1,6	1,5	1,7	1,7	2,4
12		Агр. CO ₂	Куб № 2 (возраст 5 лет)					
	Исходный метод		1,8	1,5	1,55	1,45	1,5	1,9
	Модернизированный метод		1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,8
13		Агр. CO ₂	Куб № 3 (возраст 5 лет)					
	Исходный метод		2,1	1,6	1,9	1,9	1,7	2,0
	Модернизированный метод		2,0	1,6	1,8	1,8	1,7	2,0
14		Неагрессивная (хранение на улице)	Куб № 4 (возраст 3 г.)					
	Исходный метод		0,1	0,1	0,15	0,1	0,15	0,1
	Модернизированный метод		0,1	0	0,2	0,2	0,1	0,1
15		Неагрессивная (хранение на улице)	Куб № 5 (возраст 3 г.)					
	Исходный метод		Карбонизации не выявлено					
	Модернизированный метод		0,1	0	0	0	0	0,1

На основании результатов, представленных в табл. 1 и 2, были сформулированы выводы, определяющие возможность применения на практике предложенных методов исследования.

Заключение

Модернизированный метод фенолфталеиновой пробы обладает повышенной точностью (в некоторых случаях более чем на 8–10 % в сравнении с обычным методом). Раствор нейтрального красного помогает расширить применение метода фенолфталеиновой пробы для определения зон карбонизации бетона при $6 < \text{pH} < 10,5$. В результате испытаний выявлено, что использование ализарина в дополнение к раствору фенолфталеина

является затруднительным, поскольку раствор индикатора имеет слишком тусклое окрашивание, вследствие чего определение зон сильнощелочного бетона является неточным.

Можно отметить, что сам по себе метод фенолфталеиновой пробы имеет несколько основных ограничений, которые могут затруднить работу исследователей на полевой стадии, вследствие чего есть смысл продолжать поиск индикаторов, которые смогут дополнить или полноценно заменить фенолфталеин для данных целей.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Долманюк Р.Ю., Махаев К.В. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с помощью вероятностного расчета глубины и скорости карбонизации // Современные научные исследования и разработки. – 2018. – № 1 (18). – С. 132–135.
2. Гоглев И.Н., Логинова С.А. Новый индикаторный метод определения зон карбонизации в бетонных и железобетонных конструкциях // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 8. – С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-8-16
3. Логинова С.А., Гоглев И.Н. Индикаторные способы определения долговечности железобетонных конструкций при их обследовании // Строительство и техногенная безопасность. – 2022. – № S1. – С. 119–126.
4. Гутенева С.В., Журавлева-Деге Н.В. Методы оценки износа строительных конструкции в Германии // Вестник научных конференций. – 2016. – № 10–2 (14). – С. 35–37.
5. Rimshin V., Truntov P. Determination of carbonation degree of existing reinforced concrete structures and their restoration // E3S Web of Conferences. – 2019. – № 135. – P. 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/201913503015
6. Alghamdi A.H. Determination of zinc by square-wave adsorptive stripping voltammetry using alizarin as a chelating agent // Journal of Saudi Chemical Society. – 2010. – № 14 (1). – P. 1–7. DOI: 10.1016/j.jscs.2009.12.002
7. Способ определения долговечности железобетонных конструкций: пат. Рос. Федерации [Электронный ресурс] / Рыбнов Д.С., Гоглев И.Н., Соколов К.Ю. – № 2755246; заявл. 19.08.2020; опубл. 14.09.2021. – 3 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2272281C1_20060320 (дата обращения: 02.02.2023).
8. Li Y., Zhou X., Jia C. Bayesian method and its application in prediction of concrete carbonation depth. Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) // Journal of Central South University (Science and Technology). – 2014. – № 45 (9). – P. 3121–3126.
9. Шалый Е.Е., Ким Л.В., Леонович С.Н. Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчёта-прогноза срока службы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 6. – С. 5–14.
10. Долманюк Р.Ю., Махаев К.В. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с помощью вероятностного расчета глубины и скорости карбонизации // Современные научные исследования и разработки. – 2018. – № 1 (18). – С. 132–135.

11. Способ повышения долговечности мостовых железобетонных конструкций за счет использования бетонов, устойчивых к карбонизации / В.К. Козлова, А.В. Вольф, В.О. Могуз, Е.В. Строганов, А.В. Кастюрин // *Дороги и мосты*. – 2020. – № 1 (43). – С. 113–128.
12. Васильев А.А. Оценка карбонизации и развития ее параметров во времени по сечению бетонов для различных эксплуатационных условий // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. – 2021. – № 8. – С. 43–52.
13. Анализ причин появления подземной и атмосферной воды в подвальных помещениях эксплуатируемого здания / А.И. Полищук, Д.А. Чернявский, В.В. Гуменюк, Г.Г. Солонов // *Construction and Geotechnics*. – 2021. – № 2 (12). – С. 86–96.
14. Влияние процесса карбонизации на состав продуктов гидратации и прочность цементного камня / В.К. Козлова, А.В. Вольф, Е.В. Божок, А.М. Маноха, К.А. Махов // *Ползуновский вестник*. – 2018. – № 2. – С. 117–121. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.022
15. Анализ влияния карбонизации бетона и проникновения хлоридов на состояние арматурного стержня / М.А. Шевцова, А.М. Боженко, Т.Б. Лимонина и др. // *Наука и бизнес: пути развития*. – 2021. – № 11 (125). – С. 143–145.
16. Lo Y., Lee H.M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy // *Building and Environment*. – 2002. – № 37 (5). – P. 507–514. DOI: 10.1016/S0360-1323(01)00052-X
17. Хирис Н.С., Акчурин Т.К. Высоконаполненный мелкодисперсный бетон для фундаментов гидротехнических сооружений // *Construction and Geotechnics*. – 2014. – № 4. – С. 297–303.
18. Васильев А.А. К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода // *Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура*. – 2020. – № 1 (119). – С. 77–80.
19. Testing and modelling chloride penetration into concrete / C. Andrade, M. Prieto, P. Tanner [et al.] // *Constr. Build. Mater.* – 2011. – Vol. 39. – P. 9–18.
20. Анализ зрелости BIM-решений как инструмента обеспечения жизненного цикла здания / А.С. Сунцов, О.Л. Симченко, Ю.А. Толкачев, Е.Л. Чазов, Д.Р. Самигуллина // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – № 3 (11). – С. 41–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.04
21. Goglev I.N. A new promising method for detecting carbonization of reinforced concrete building structures during inspections // *Smart Composite in Construction*. – 2021. – № 4 (2). – P. 35–45. DOI: 10.52957/27821919_2021_4_35
22. Обследование зданий и сооружений / А.Н. Куликов, С.И. Битюков, И.Я. Макушенцева, И.Н. Горин. – Волгоград: Волгоград. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2010. – 130 с.
23. Ключева Н.В., Дорофеев А.А. Методика экспериментальной оценки длительной прочности нагруженного и корродирующего бетона // *Вестник НИЦ «Строительство»*. – 2011. – № 3–4. – С. 131–134.
24. Ha-Won Song, Velu Saraswathy. Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2007. – № 2. – P. 1–28.
25. Xinyuan Ke. Micro-fabricated electrochemical chloride ion sensors: From the present to the future // *Talanta*. – 2020. – № 211 (4). – P. 120734. DOI: 10.1016/j.talanta.2020.120734
26. Yartsev V P., Nikolyukin A.N., Pluzhnikova T.M. Assessment and Modeling of Bond Strength of Corroded Reinforcement in Concrete Structures // *Advanced Materials & Technologies*. – 2018. – № 3. – P. 70–82. DOI: 10.17277/amt.2018.03.pp.070-082

References

1. Dolomanyuk R.YU., Mahaev K.V. Prognozirovaniye dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstrukcij s pomoshch'yu veroyatnostnogo rascheta glubiny i skorosti karbonizacii [Predicting the durability of reinforced concrete structures using probabilistic calculation of the depth and rate of carbonization]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki*, 2018, iss. 1 (18), pp. 132-135.
2. Goglev I.N., Loginova S.A. Novyj indikatornyj metod opredeleniya zon karbonizacii v betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukciyah [A new indicator method for determining carbonization zones in concrete and reinforced concrete structures]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*, 2022, vol. 8, pp. 8-16. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-8-16
3. Loginova S.A., Goglev I.N. Indikatornyye sposoby opredeleniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstrukcij pri ih obsledovanii [Indicator methods for determining the durability of reinforced concrete structures during their examination]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*, 2022, vol. S1, pp. 119-126.
4. Guteneva S.V., ZHurvavleva-Dege N.V. Metody ocenki iznosa stroitel'nykh konstrukcii v Germanii [Methods for assessing the wear of building structures in Germany]. *Vestnik nauchnykh konferencij*, 2016, iss. 10-2 (14), pp. 35-37.
5. Rimshin V., Truntov P. Determination of carbonation degree of existing reinforced concrete structures and their restoration. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 135, p. 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/201913503015.
6. Alghamdi A.H. Determination of zinc by square-wave adsorptive stripping voltammetry using alizarin as a chelating agent. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2010, iss. 14 (1), pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.jscs.2009.12.002.
7. Rybnov D.S., Goglev I.N., Sokolov K.YU. Sposob opredeleniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstrukcij [Method of determining the durability of reinforced concrete structures]. Patent Rossiiskaia Federatsia no. 2755246 (2021).
8. Li Y., Zhou X., Jia C. Bayesian method and its application in prediction of concrete carbonation depth. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, iss. 45 (9), pp. 3121-3126.
9. SHalyj E.E., Kim L.V., Leonovich S.N. ZHelezobeton pri vozdejstvii karbonizacii i hloridnoj agressii: veroyatnostnaya model' raschyota-prognoza sroka sluzhby [Reinforced concrete under the influence of carbonization and chloride aggression: a probabilistic model for calculating and predicting the service life]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. SHuhova*, 2018, vol. 6, pp. 5-14.
10. Dolomanyuk R.YU., Mahaev K.V. Prognozirovaniye dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstrukcij s pomoshch'yu veroyatnostnogo rascheta glubiny i skorosti karbonizacii [Predicting the durability of reinforced concrete structures using probabilistic calculation of the depth and rate of carbonization]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki*, 2018, iss. 1 (18), pp. 132-135.
11. Kozlova V.K., Vol'f A.V., Motuz V.O., Stroganov E.V., Kastyurin A.V. Sposob povysheniya dolgovechnosti mostovykh zhelezobetonnykh konstrukcij za schet ispol'zovaniya betonov, ustojchivyyh k karbonizacii [A method for increasing the durability of bridge reinforced concrete structures through the use of concretes resistant to carbonization]. *Dorogi i mosty*, 2020, iss. 1 (43), pp. 113-128.
12. Vasil'ev A.A. Ocenka karbonizacii i razvitiya ee parametrov vo vremeni po secheniyu betonov dlya razlichnykh ekspluatatsionnykh uslovij [Evaluation of carbonization and the development of its parameters over time over the cross section of concrete for various operating condi-

tions]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, 2021, vol. 8, pp. 43-52.

13. Polishchuk A.I., CHernyavskij D.A., Gumenyuk V.V., Solonov G.G. Analiz prichin poyavleniya podzemnoj i atmosfernoj vody v podval'nyh pomeshcheniyah ekspluatiruemogo zdaniya. [Analysis of the reasons for the appearance of underground and atmospheric water in the basement of an operated building]. *Construction and Geotechnics*, 2021, iss. 2 (12), pp. 86-96. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.08.

14. Kozlova V.K., Vol'f A.V., Bozhok E.V., Manoha A.M., Mahov K.A. Vliyanie processa karbonizacii na sostav produktov gidratatsii i prochnost' cementnogo kamnya [Influence of the carbonization process on the composition of hydration products and the strength of cement stone]. *Polzunovskij vestnik*, 2018, vol. 2, pp. 117-121. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.022

15. SHEvcova M.A., Bozhenko A.M., Limonina T.B. Analiz vliyaniya karbonizacii betona i proniknoveniya hloridov na sostoyanie armaturnogo sterzhnya [Analysis of the effect of concrete carbonization and chloride penetration on the state of the reinforcing bar]. *Nauka i biznes: puti razvitiya*, 2021, iss. 11 (125), pp. 143-145.

16. Lo Y., Lee H.M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. *Building and Environment*, 2002, iss. 37 (5), pp. 507-514. DOI: 10.1016/S0360-1323(01)00052-X

17. Hiris N.S., Akchurin T.K. Vysokonaplnennyj melkodispersnyj beton dlya fundamentov gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [Highly-filled fine-dispersed concrete for the foundations of hydraulic structures]. *Construction and Geotechnics*, 2014, vol. 4, pp. 297-303.

18. Vasil'ev A.A. K voprosu ob "ektivnosti sovremennoj ocenki i prognozirovaniya karbonizacii betona na osnove indikatornogo metoda [On the question of the objectivity of the modern assessment and prediction of carbonization of concrete based on the indicator method]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2020, iss. 1 (119), pp. 77-80.

19. Andrade C., Prieto M., Tanner P. et al. Testing and modelling chloride penetration into concrete. *Constr. Build. Mater.*, 2011, vol. 39, pp. 9-18.

20. Suncov A.S., Simchenko O.L., Tolkachev YU.A., CHazov E.L., Samigullina D.R. Analiz zrelosti BIM-reshenij kak instrumenta obespecheniya zhiznennogo cikla zdaniya [Analysis of the maturity of BIM solutions as a tool for ensuring the life cycle of a building]. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 41-53. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.04.

21. Goglev I.N. A new promising method for detecting carbonization of reinforced concrete building structures during inspections. *Smart Composite in Construction*, 2021, iss. 4 (2), pp. 35-45. DOI: 10.52957/27821919_2021_4_35

22. Kulikov A.N., Bityukov S.I., Makushenceva I.Ya., Gorin I.N. Obsledovanie zdaniy i sooruzhenij [Inspection of buildings and structures]. Volgograd, VGASU, 2010, 130 p.

23. Klyueva N.V., Dorofeev A.A. Metodika eksperimental'noj ocenki dlitel'noj prochnosti nagruzhennogo i korrodiruyushchego betona [Method for experimental evaluation of the long-term strength of loaded and corroding concrete]. *Vestnik NIC Stroitel'stvo*, 2011, vol. 3-4, pp. 131-134.

24. Ha-Won Song, Velu Saraswathy. Corrosion monitoring of reinforced concrete structures - a review. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2007, vol. 2, pp.1- 28.

25. Xinyuan Ke. Micro-fabricated electrochemical chloride ion sensors: From the present to the future. *Talanta*, 2020, no. 211 (4): 120734. DOI: 10.1016/j.talanta.2020.120734.

26. Yartsev V P., Nikolyukin A.N., Pluzhnikova T.M. Assessment and modeling of bond strength of corroded reinforcement in concrete structures. *Advanced Materials & Technologies*, 2018, vol. 3, pp. 70-82. DOI: 10.17277/amt.2018.03.pp.070-082