

УДК 693.94

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Е. В. БЕЛЯЕВА, магистрант, А. Н. БУЛАВКО, студент, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА ПО ОТНОШЕНИЮ К СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЕ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ ОТКРЫТОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ВТОРИЧНОЙ ЗАЩИТЫ БЕТОНА СОСТАВОМ «ГС ПЕНЕТРАТ»

На основании лабораторных исследований образцов бетона, изготовленных в заводских условиях с применением тепловлажностной обработки (ТВО), и использованием вторичной защиты составом «ГС Пенетрат» получены регрессионные зависимости изменения карбонатной составляющей (показателя КС) и степени карбонизации (СК) по сечению для различных классов бетона по прочности и сроков эксплуатации в условиях повышенной агрессивности открытой атмосферы. Показано, что применение вторичной защиты в значительной степени уменьшает карбонизацию бетона, повышая его защитные свойства по отношению к стальной арматуре и, как следствие, долговечность железобетонных элементов и конструкций.

Введение. Основную долю строительных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в настоящее время, составляют железобетонные элементы (ЖБЭ) и конструкции (ЖБК) различных типов, что, как следствие, обуславливает эксплуатационную надежность и долговечность большинства зданий и сооружений в целом.

Массовость применения железобетона в зданиях и сооружениях, многолетние сроки службы, условия эксплуатации от нормальных до сильноагрессивных, качество эксплуатации обуславливают значительную повреждаемость ЖБЭ и ЖБК.

Систематизация повреждений по видам и их количественное соотношение исследуются многочисленными авторами. Так, процентное соотношение основных типов повреждений ЖБЭ (ЖБК) по результатам анализа авторов [1] представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Количественное соотношение между повреждениями ЖБЭ (ЖБК)

Наименование повреждения	Процент от общего количества
Коррозия стальной арматуры под воздействием хлоридов (внутренних и внешних)	37,8
Коррозия арматуры вследствие карбонизации бетона	16,7
Размораживание бетона	11,1
Химические воздействия	3,6
Внутренняя коррозия бетона	8,9
Усадочные деформации	13,9
Абразия/эрозия	3,3
Кавитационные повреждения	1,1
Пластическое растрескивание	0,9
Термическое растрескивание	2,7

Приведенные данные показывают, что более чем в 50 % описанных случаев повреждения бетона были связаны с коррозией стальной арматуры из-за наличия хлоридов или развития карбонизации бетона.

Многолетние исследования доцента А. А. Васильева поврежденности ЖБЭ, эксплуатиовавшихся различные сроки в условиях открытой атмосферы, показывают, что в длительно эксплуатируемых элементах и конструкциях из общей доли повреждений до 80 % составляют коррозия бетона и (или) стальной арматуры [2].

Поскольку большинство ЖБЭ и ЖБК эксплуатируются в различных атмосферных условиях, одной из основных причин их повреждаемости является воздействие агрессивных компонентов воздушной среды на конструкции зданий и сооружений в процессе их длительной эксплуатации. А так как основным видом коррозии бетона элементов и конструкций, эксплуатирующихся в условиях агрессивности атмосферных сред, является карбонизация, и именно структурные изменения бетона, инициированные непрерывающимся взаимодействием углекислого газа воздуха с гидроксидом кальция, вызывая нейтрализацию бетона, определяют состояние его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, и, в значительной степени, техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) в целом, для обеспечения длительной безопасной эксплуатации железобетона необходима его защита, в первую очередь, от воздействия углекислого газа воздуха.

Наиболее целесообразными являются меры первичной защиты. Несмотря на их преимущества, они еще не получили широкого применения. Кроме того, объемы уже построенных и введенных в эксплуатацию зданий и сооружений с использованием ЖБЭ и ЖБК огромны и с каждым днем растут, а продлить срок службы эксплуатирующихся ЖБЭ и ЖБК можно, используя вторичную защиту – пропитку бетонных поверхностей, контактирующих с эксплуатационной средой обработкой гидрофобизирующими составами. Однако остается вопрос: оценка увеличения срока безопасной эксплуатации, поскольку существующие методики позволяют оценить изменение отдельных физико-механических характеристик бетона, но не дают возможности определить количественные характеристики изменения защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре.

Один из возможных (а по сути – единственный на данный момент) способ оценки долговечности ЖБЭ и ЖБК – на основе предложенных расчетно-экспериментальных моделей параметров карбонизации бетона [3] и критериев оценки технического состояния железобетонных элементов и конструкций с учетом карбонизации бетона [4].

Для оценки изменения защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре использовали материал, сочетающий действие проникающей гидроизоляции

и мембранной обмазочной гидроизоляции – «Состав гидроизоляционный проникающий ГС Пенетрат» (ТУ ВУ 100926738.017-2011). Это кристаллообразующий материал глубокого проникновения, предназначенный для значительного увеличения водонепроницаемости и предотвращения капиллярного проникновения влаги через бетон [5].

Механизм гидроизоляции составов проникающего действия сводится к химической реакции активных реагентов (пенетратов) со свободной известью и капиллярной водой в бетоне. Ее результатом является образование труднорастворимых продуктов, гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, коагулирующих капиллярно-пористую структуру бетона.

Результаты исследований. Для оценки эффективности применения состава «ГС Пенетрат» в качестве защиты от карбонизации по сечению бетона исследовали кубики сечением 100×100×100 мм, выполненные в заводских условиях из бетонов классов по прочности $C^{16}/_{20}$, $C^{18}/_{22,5}$, $C^{20}/_{25}$, $C^{25}/_{30}$.

Составы бетона образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Составы бетона образцов

Класс бетона по прочности на сжатие	В/Ц	Состав смеси, кг/м ³				
		Ц	П	Щ	В	С-3,
$C^{16}/_{20}$	0,654	257	783	1191	171	20,9
$C^{20}/_{25}$	0,546	317	738	1184	173	25,4
$C^{25}/_{30}$	0,460	373	690	1183	172	29,9

Примечания
 1 В/Ц – водоцементное отношение.
 2 Ц, П, Щ, В, С-3 – массы цемента, песка, щебня, воды, добавки, кг.

Было изготовлено по две серии (по три кубика) для каждого класса бетона по прочности на сжатие. После изготовления кубики подвергали тепловлажностной обработке (ТВО) в заводских условиях по стандартному режиму. После ТВО по сечению всех кубов (с одной грани), с шагом 5 мм, определялся показатель КС, % (карбонатная составляющая).

Отбор образцов и определение показателя КС выполнялись по методикам [6].

Затем образцы 2-й серии обрабатывались составом «ГС Пенетрат». Для приготовления состава смешивали в течение 2 мин вручную 0,25 л воды на 1 кг «ГС Пенетрат» до получения жидкого сметанообразного раствора.

Перед нанесением «ГС Пенетрат» поверхность бетонных образцов увлажнялась до полного влагонасыщения. Гидроизоляционный состав наносился на предварительно очищенную поверхность бетона в 2 слоя кистью из синтетического волокна. Первый слой наносился на влажный бетон. Второй – на свежий, но уже схватившийся первый слой через два часа [3].

После высыхания нанесенного гидроизолирующего слоя в течение 2 суток поддерживалась влажность поверхности кубиков. Растрескивание и шелушение покрытия не наблюдалось.

Группы кубиков (серия 1 – контрольные, без обработки и серия 2 – с обработкой) хранились в атмосферных условиях (класс по условиям эксплуатации ХС4 [7]) в течение 0,5 года.

Атмосферные условия в помещении лаборатории были созданы следующим образом: два раза в день кубики погружались в воду, после чего устанавливались на деревянные подставки под вентилятор; таким обра-

зом кубики ежедневно проходили двойной цикл увлажнения и высыхания.

С учетом среднегодовых климатических данных для г. Гомеля данные лабораторные условия приравнивались к 2 годам эксплуатации бетона в условиях открытой атмосферы, области ускоренной карбонизации [3].

По результатам испытаний были построены усредненные зависимости изменения показателя КС по сечению бетона для всех серий кубиков каждого класса бетона по прочности на сжатие. После чего для межремонтных сроков 25 и 50 лет принимали прогнозные значения КС по расчетно-экспериментальным моделям карбонизации [3]. Затем, путем интерполяции, через соотношение скоростей карбонизации бетона серий 1 и 2 для двухлетнего возраста, получили регрессионные зависимости карбонизации бетона, обработанного составом «ГС Пенетрат» для возраста 25 и 50 лет.

Поскольку значения карбонатной составляющей не позволяют напрямую оценивать защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре, полученные значения КС в соответствии с методикой [3] пересчитывали в значения степени карбонизации (СК) и по ним строили регрессионные зависимости I -СК. В качестве примера на рисунке 1 приведены полученные регрессионные зависимости I -КС, на рисунке 2 – I -СК, соответственно, для классов бетона по прочности на сжатие $C^{16}/_{20}$ и $C^{25}/_{30}$ для серий кубиков 1 и 2.

Анализ полученных результатов. Для оценки эффективности применения вторичной защиты бетона составом «ГС Пенетрат» использовали критерии оценки технического состояния железобетонных элементов и конструкций с учетом карбонизации бетона [4], предложенные на основе многолетних исследований зависимости состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, коррозионного состояния бетона и стальной арматуры от физико-химических показателей бетона защитного слоя. По полученным и прогнозным показателям СК для контрольных образцов и образцов, обработанных составом «ГС Пенетрат», определяли прогнозные значения (для межремонтного срока 25 лет и планируемого срока эксплуатации 50 лет при эксплуатации в атмосферных условиях области ускоренной карбонизации) категории потери защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, степени коррозии стальной арматуры и технического состояния ЖБЭ (ЖБК).

В качестве примера в таблице 3 приведены результаты исследований изменения параметров карбонизации и защитных свойств для бетонов классов по прочности $C^{16}/_{20}$ и $C^{25}/_{30}$. Проведенный анализ позволил оценить возможности состава «ГС Пенетрат».

В условиях открытой атмосферы в зоне ускоренной карбонизации для бетона с применением состава «ГС Пенетрат» наблюдается значительное снижение степени карбонизации по сечению бетона:

– класса по прочности $C^{16}/_{20}$, для возраста 2 года – на 17–6; для межремонтного срока 25 лет – на 30–16; для срока эксплуатации 50 лет – на 34–19 %;

– класса по прочности $C^{20}/_{25}$, для возраста 2 года – на 9–3; для межремонтного срока 25 лет – на 18–9; для срока эксплуатации 50 лет – на 20–11 %;

– класса по прочности $C^{25}/_{30}$, для возраста 2 года – на 5–2; для межремонтного срока 25 лет – на 11–5; для срока эксплуатации 50 лет – на 12–6 %.

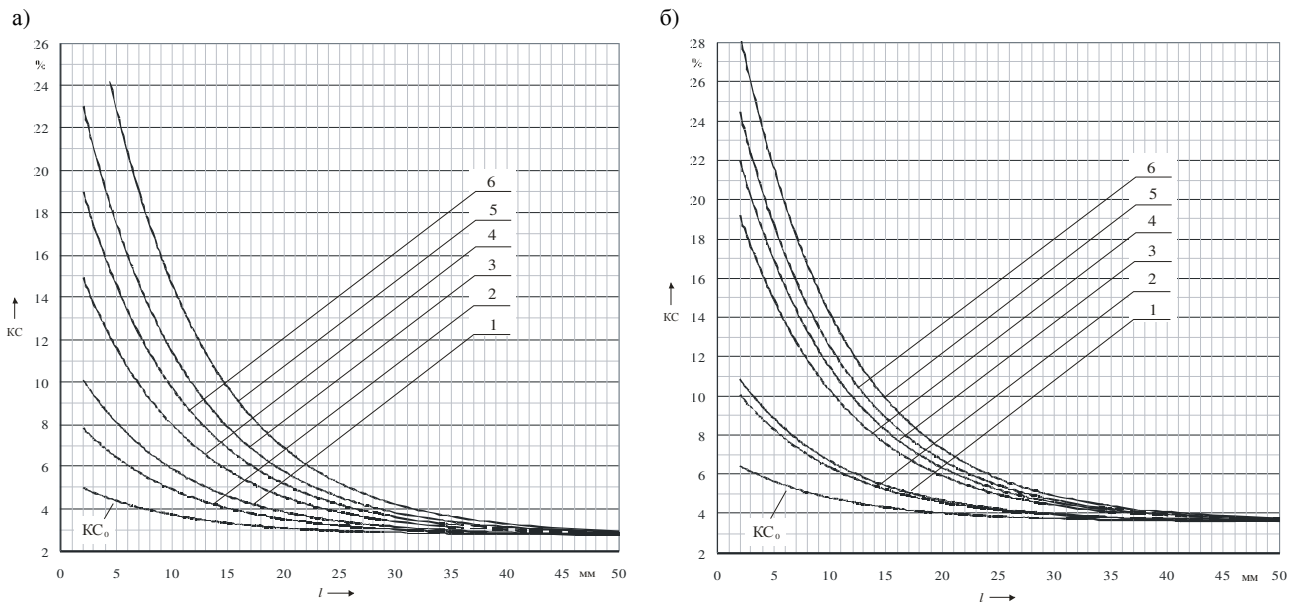


Рисунок 1 – Изменение карбонатной составляющей по сечению бетона с применением вторичной защиты в атмосферных условиях для области ускоренной карбонизации:

a – класс бетона по прочности на сжатие $C^{16}/_{20}$; *б* – класс бетона по прочности на сжатие $C^{25}/_{30}$;

KC_0 – значение карбонатной составляющей сразу после изготовления с применением ТВО; 1 и 2 – экспериментальные значения карбонатной составляющей в возрасте 2 лет, соответственно, серии 1 – без обработки и серии 2 – с обработкой; 3 и 4 – прогнозные (модельные) значения карбонатной составляющей в возрасте 25 лет, соответственно, серии 1 – без обработки и серии 2 – с обработкой; 5 и 6 – прогнозные (модельные) значения карбонатной составляющей в возрасте 50 лет, соответственно, серии 1 – без обработки и серии 2 – с обработкой

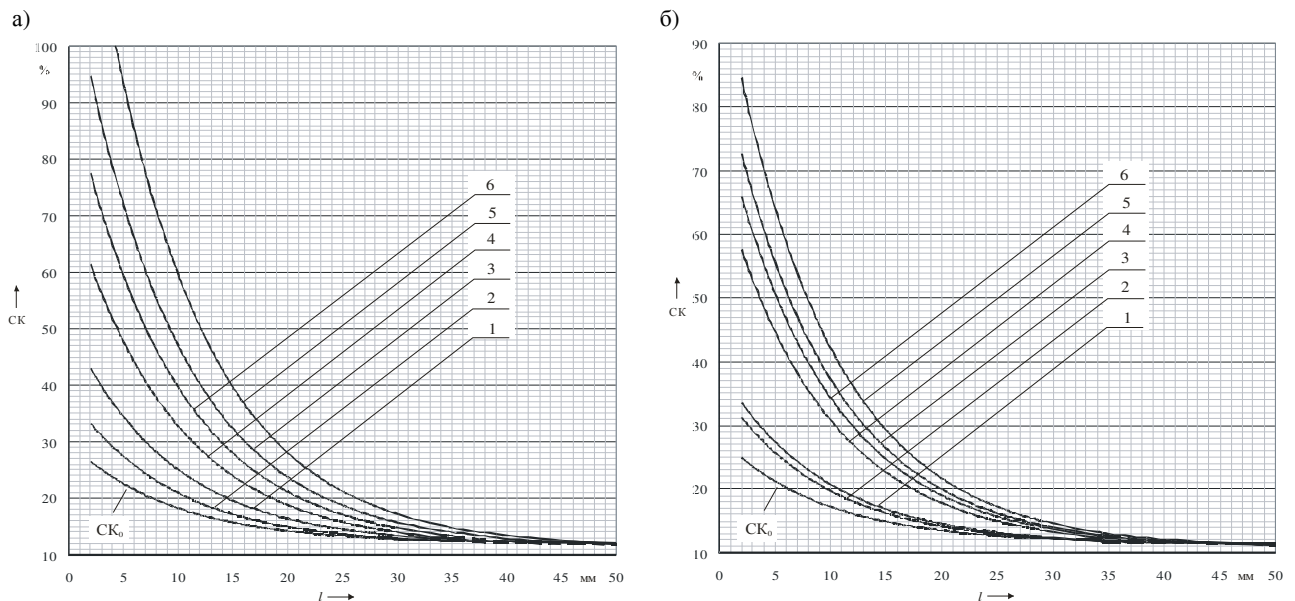


Рисунок 2 – Изменение степени карбонизации по сечению бетона с применением вторичной защиты в атмосферных условиях для области ускоренной карбонизации:

a – класс бетона по прочности на сжатие $C^{16}/_{20}$; *б* – класс бетона по прочности на сжатие $C^{25}/_{30}$;

$СК_0$ – значение степени карбонизации сразу после изготовления с применением ТВО; 1 и 2 – экспериментальные значения степени карбонизации в возрасте 2 лет, соответственно, серии 1 – без обработки и серии 2 – с обработкой; 3 и 4 – прогнозные (модельные) значения степени карбонизации в возрасте 25 лет, соответственно, серии 1 – без обработки и серии 2 – с обработкой; 5 и 6 – прогнозные (модельные) значения степени карбонизации в возрасте 50 лет, соответственно, серии 1 – без обработки и серии 2 – с обработкой

Применение вторичной защиты составом «ГС Пенетрат» позволяет значительно улучшить защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре:

- бетона класса по прочности $C^{16}/_{20}$, для межремонтного срока 25 лет – на одну категорию в поверхностных слоях; для срока эксплуатации 50 лет – на одну категорию;

- бетона класса по прочности $C^{20}/_{25}$, для сроков 25 и 50 лет – на одну категорию в поверхностных слоях.

Для бетона класса по прочности $C^{25}/_{30}$ применение вторичной защиты не уменьшает категорию потери защитных свойств, но значительно уменьшает степень карбонизации

Использование в качестве вторичной защиты состава «ГС Пенетрат» дает возможность прогнозировать уменьшение категории технического состояния для ЖБЭ, эксплуатирующихся длительный срок в условиях открытой атмосферы, выполненных их бетона класса по прочности $C^{16}/_{20}$ на одну ступень.

Таблица 3 – Анализ изменения состояния ЖБЭ (ЖБК) для условий повышенной агрессивности открытой атмосферы

Сечение, мм	КС, %		СК, %		Уменьшение СК, % (СК _к –СК _д)/СК _к	Категория потери защитных свойств по отношению к стальной арматуре		Степень коррозии стальной арматуры		Категория технического состояния ЖБЭ (ЖБК)	
	К	Д	К	Д		К	Д	К	Д	К	Д
Класс бетона по прочности C¹⁶/₂₀											
<i>Срок эксплуатации (межремонтный) – 25 лет</i>											
10	11,4	7,9	46,9	32,7	30	III	II	III	II	III	II
15	7,9	5,8	32,3	23,9	26	II	I	II	I	II	I
20	5,8	4,6	23,8	18,8	21	I	I	I	I	I	I
25	4,6	3,8	18,8	15,8	16	I	I	I	I	I	I
<i>Срок эксплуатации – 50 лет</i>											
10	14,6	9,7	59,5	39,5	34	IV	III	IV	III	IV	III
15	9,7	6,8	39,7	27,9	30	III	II	III	II	III	II
20	6,9	5,2	28,1	21,1	25	II	I	II	I	II	I
25	5,2	4,2	21,3	17,1	19	I	I	I	I	I	I
Класс бетона по прочности C²⁵/₃₀											
<i>Срок эксплуатации (межремонтный) – 25 лет</i>											
10	11,5	10,3	34,4	30,7	11	II	II	II	II	II	II
15	8,2	7,5	24,7	22,6	9	I	I	I	I	I	I
20	6,4	5,9	19,1	17,8	7	I	I	I	I	I	I
25	5,2	5,0	15,7	15,0	5	I	I	I	I	I	I
<i>Срок эксплуатации – 50 лет</i>											
10	14,2	12,5	42,2	37,2	12	III	III	III	III	III	III
15	9,9	8,9	29,3	26,3	10	II	II	II	II	II	II
20	7,3	6,7	21,7	20,0	8	I	I	I	I	I	I
25	5,8	5,5	17,3	16,2	6	I	I	I	I	I	I
Примечание – К – контрольные образцы, Д – образцы с добавкой.											

По результатам исследования видно, что для «низкопрочного» бетона (класса по прочности C¹⁶/₂₀) снижение количественных показателей карбонизации по сечению бетона в среднем в три раза превышает данные показатели для «высокопрочного» бетона (класса по прочности C²⁵/₃₀), что весьма актуально в связи с его более низкой коррозионной стойкостью.

Заключение. Технологичность применения, производство состава на территории Беларуси, эффективность состава «ГС Пенетрат» в совокупности с приемлемой стоимостью создают все условия на его быстрое внедрение для проведения защитных мероприятий как сразу после изготовления (монтажа элементов и конструкций), так и для проведения капитальных ремонтов с целью увеличения сроков службы ЖБЭ и ЖБК.

Список литературы

1 Textbook on behavior, design and performance, Structural Concrete: December 2009 – Bul. 53. – 2nd. ed. – Fid. 3. – 2010. – Vol. 3. – 381 p.

2 **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. – ISBN 978-985-468-978-4.

Получено 22.11.2016

A. A. Vasilyev, E. B. Belyaeva, A. N. Bulavko. Assessment of change of protective properties of concrete in relation to steel fittings for operational conditions of the open atmosphere at application of secondary protection of concrete by structure “GS Penetrat”.

On the basis of laboratory researches of samples of concrete, factory fabricated with application of the warm and moist processing (WMP), and use of secondary protection by structure "GS Penetrat" are received regression dependences of change of a carbonate component (KS indicator) and the extent of carbonization (EC) on section for various classes of concrete on durability and operation terms in the conditions of the increased aggression of the open atmosphere. It is shown that application of secondary protection substantially reduces concrete carbonization, increasing its protective properties in relation to steel fittings and, as a result – durability of reinforced concrete elements and designs.

3 **Васильев, А. А.** Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2016. – 263 с. – ISBN 978-985-554-499-0.

4 **Васильев, А. А.** Критерии оценки технического состояния железобетонных элементов и конструкций с учетом карбонизации бетона / А. А. Васильев // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : материалы XX междунар. науч.-метод. семинара (Гродно, 17–19 февр. 2016 г.) / М-во образования Респ. Беларусь, ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2016. – С. 225–229.

5 **ТТК-100299864.107-2012.** Типовая технологическая карта на устройство гидроизоляции монолитных и сборных бетонных и железобетонных конструкций и сооружений с применением составов гидроизоляционных «Пенетрат», Минск : РУП «МИНСКТИППРОЕКТ», 2011. – 69 с.

6 **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.

7 **СНБ 5.03.01-02.** Бетонные и железобетонные конструкции / М-во стр-ва и архитектуры. – Минск, 2003. – 139 с.