

КАРБОНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНО УПЛОТНЕННОГО ПРОПИТОЧНЫМИ СОСТАВАМИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

CARBONIZATION OF A CEMENT STONE SURFACE SEALED BY DRYING COMPOSITIONS

А. Г. Зарецкий,
производитель работ филиала
МСУ 6 ОАО «Мостострой»,
г. Минск, Беларусь

В. В. Бабицкий,
доктор технических наук,
профессор Белорусского
национального технического
университета,
г. Минск, Беларусь

Исследовалось влияние гидрофобизации (реагент «Г88»), а также поверхностного уплотнения цементного камня пропиточным составом, взаимодействующим с гидроксидом кальция и иными продуктами гидратации цемента (реагент «Сифтор-Б»), на процессы карбонизации материала. Образцы – кубики с водоцементным отношением от 0,27 до 0,50 и размером $4 \times 4 \times 4$ см, твердевшие 28 суток в нормальных условиях, с последующей пропиткой в течение 1 суток в водных растворах реагентов. Глубина карбонизации цементного камня определялась по стандартной методике, но в среде углекислого газа с концентрацией 100 % по объему. Через 10 суток глубина карбонизации цементного камня при водоцементном отношении от 0,30 до 0,50 (без пропитки и с пропиткой) изменялась от $(2,1 \pm 0,7)$ до $(12,1 \pm 1,4)$ мм. Цементный камень с водоцементным отношением 0,27 практически не карбонизировался. Установлено, что при снижении водоцементного отношения цементного теста от 0,50 до 0,30 эффективный коэффициент диффузии углекислого газа изменяется от $1,88 \cdot 10^{-4}$ до $1,23 \cdot 10^{-5}$, от $2,17 \cdot 10^{-4}$ до $1,77 \cdot 10^{-5}$, от $9,33 \cdot 10^{-5}$ до $9,96 \cdot 10^{-6}$ и от $1,49 \cdot 10^{-4}$ до $1,23 \cdot 10^{-5}$ см²/с для цементного камня без пропитки и с пропиткой растворами «Сифтор-Б» 15%-ной и 5%-ной концентрации, а также гидрофобизатора «Г88», соответственно. Расчеты времени полной карбонизации бетона защитного слоя показали, что использование раствора реагента «Сифтор-Б» 15%-ной концентрации эффекта не дает вне зависимости от водоцементного отношения. При снижении концентрации до 5% долговечность железобетона существенно повышается – примерно в 2,2 раза при водоцементном отношении, равном 0,40. Положительное влияние оказывает и пропитка цементного камня гидрофобизатором. Таким образом, воздействие состава, содержащего реагенты, взаимодействующие с гидроксидом кальция, на глубину карбонизации бетона, носит неоднозначный характер, зависящий от изначальной плотности бетона и концентрации пропиточного состава. И это следует учитывать при проектировании вторичной защиты железобетонных конструкций.

Ключевые слова: цементный камень, бетон, пропитка, пропиточный состав, карбонизация, долговечность.

The effect of hydrophobization (reagent «G88»), as well as surface compaction of cement stone with an impregnating composition interacting with calcium hydroxide and other products of hydration of cement (reagent «Siffor-B»), on the processes of carbonization of the material was investigated. Samples – cubes with water-cement ratio from 0.27 to 0.50 and size $4 \times 4 \times 4$ cm, hardened for 28 days under normal conditions, followed by impregnation for 1 day in aqueous solutions of the reagents. The depth of carbonization of the cement stone was determined by a standard procedure, but in a carbon dioxide environment with a concentration of 100 % by volume. After 10 days the depth of carbonization of the cement stone at water-cement ratio from 0.30 to 0.50 (without impregnation and impregnation) varied from (2.1 ± 0.7) to $(12.1 \pm \pm 1.4)$ mm. Cement stone with a water-cement ratio of 0.27 was practically not carbonized. It is established that when the water-cement ratio of cement paste decreases from 0.50 to 0.30, the effective diffusion coefficient of carbon dioxide varies from $1.88 \cdot 10^{-4}$ to $1.23 \cdot 10^{-5}$, from $2.17 \cdot 10^{-4}$ to $1.77 \cdot 10^{-5}$, from $9.33 \cdot 10^{-5}$ to $9.96 \cdot 10^{-6}$ and from $1.49 \cdot 10^{-4}$ to $1.23 \cdot 10^{-5}$ cm^2/s for a cement stone without impregnation and impregnating solutions «Siffor-B» 15 % and 5 % concentration, as well as hydrophobic «G88», respectively. Calculations of the time of complete carbonization of the concrete of the protective layer showed that the use of the solution of the reagent «Siffor-B» with a 15 % concentration of the effect does not give regardless of the water-cement ratio. When the concentration is reduced to 5 %, the durability of the reinforced concrete is significantly increased – approximately 2.2 times with a water-cement ratio of 0.40. A positive effect is also provided by the impregnation of cement stone with a hydrophobizator. Thus, the effect of the composition containing reagents interacting with calcium hydroxide on the depth of carbonization of concrete is ambiguous, depending on the initial density of the concrete and the concentration of the impregnating composition. And this should be taken into account when designing secondary protection of reinforced concrete structures.

Keywords: cement stone, concrete, impregnation, impregnating composition, carbonization, durability.

ВВЕДЕНИЕ

Цементный бетон обеспечивает высокую коррозионную стойкость стальной арматуры, что объясняется щелочностью поровой жидкости (рН больше критического значения 11,8). Вместе с тем существующая капиллярно-пористая структура цементного камня не способна препятствовать диффузии углекислого газа в тело бетона. Взаимодействие же углекислого газа с гидроксидом кальция и иными продуктами гидратации цемента приводит к образованию карбоната кальция (процесс карбони-

зации) и соответствующему снижению щелочности поровой жидкости ниже критического значения. При полной карбонизации защитного слоя бетона сталь переходит из пассивного состояния в активное и при определенных условиях возможно начало коррозии арматуры железобетона [1–3]. Для повышения долговечности железобетона применяют разнообразные методы вторичной защиты, уплотняющие поверхностные слои бетона. В частности, достаточно популярны сравнительно технологичные и дешевые способы пропитки поверхности конструкций составами, обладающими гидрофобным эффектом или взаимодействующими с гидроксидом кальция [4–6]. При этом либо снижается влажность материала, либо продукты реакции коагулируют поры и капилляры, положительно влияя на структуру цементного камня, водопоглощение, истираемость, прочность и другие характеристики бетона. Вместе с тем, например, снижение содержания гидроксида кальция неизбежно приведет и к снижению щелочности поровой жидкости, что требует специальных перспективных исследований. Изменение же структуры цементного камня должно влиять и на процессы карбонизации цементного камня, что, в частности, и явилось предметом настоящих исследований.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Исследование влияния структурных особенностей бетона на процесс нейтрализации (карбонизации) бетона производилось с использованием цементного камня с различным водоцементным отношением: 0,27; 0,3; 0,4 и 0,5 (четыре партии по 6 образцов в каждой серии). Используемый цемент – М500 с нормальной плотностью 27 % производства ОАО «Красносельскстройматериалы». Применение цементного камня более удобно, чем бетона, поскольку исключается влияние свойств и содержания заполнителей. Устанавливаемые же разнообразные закономерности, получаемые для цементного камня, сравнительно легко переносятся на бетон, если принимать (что достаточно корректно), что свойства «чистого» цементного камня и цементного камня в бетоне при равенстве водоцементного отношения практически идентичны. Образцы – кубики размером $4 \times 4 \times 4$ см, поскольку при больших размерах наблюдается растрескивание цементного камня, а при меньших – достаточно трудно определять глубину карбонизации бетона. Образцы твердели в нормальных условиях в течение 28 суток, затем без предварительного высушивания помещались на 1 сутки в емкости для пропитки в водном растворе «Сифтор-Б» [7], [8] 15 %-ной и 5 %-ной концентрации, а также в растворе гидрофобизатора «Г88» (три серии образцов). Затем 5 граней каждого образца покрывали воско-канифольной мастикой. Таким образом,

доступной для углекислого газа оставалась лишь одна грань. Одна серия образцов (контрольная) защитными композициями не пропитывалась.

Далее образцы помещались на стеллажи в выполненной из органического стекла испытательной камере размером 79 × 80 × 80 см (0,5056 м³), на дне которой находилась ванна с насыщенным водным раствором хлористого натрия, в которой поддерживалась относительная влажность воздуха (75 ± 3) % и температура (20 ± 5) °С. Здесь образцы выдерживались при периодическом взвешивании до стабилизации массы. Затем в испытательную камеру периодически (по мере снижения объема) подавался углекислый газ и образцы выдерживались при 100 % концентрации CO₂ в течение 10 суток.

По истечении времени воздействия газа образцы извлекались из камеры, взвешивались, затем раскалывались перпендикулярно к открытой грани. На свежий скол наносили 0,1 %-ный раствор фенолфталеина в этиловом спирте и в 10 точках измеряли расстояние от грани до слоя цементного камня, окрашенного в малиновый цвет, то есть определялась глубина карбонизации. Затем производилась обработка результатов испытаний.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Расчеты производились в следующем порядке [9].

По 10 точкам измерения для каждого испытываемого образца определяли среднее арифметическое из результатов, полученных при всех измерениях,

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где x_i – i -й результат измерений (глубина карбонизации, масса образца, прирост массы);

n – количество результатов измерений.

Далее рассчитывали среднее арифметическое для каждой серии образцов и, при необходимости, производили выбраковку.

Затем для каждой серии определяли выборочное стандартное отклонение

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

коэффициент вариации

$$V = \frac{S}{\bar{x}} 100 \quad (3)$$

и среднюю квадратичную ошибку среднего арифметического

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. \quad (4)$$

Границы доверительного интервала μ при выбранном коэффициенте надежности α (принят равным 0,95, что вполне приемлемо для коррозионных исследований) рассчитывали по формуле

$$\bar{x} - t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

где t_{α} – табличный коэффициент Стьюдента.

Зависимость глубины карбонизации цементного камня (среднее арифметическое значение) от его водоцементного отношения представлена на рисунке 1. Как следует из этих данных, наиболее эффективно на процесс карбонизации воздействует пропитка 5 %-ным раствором «Сифтор-Б» вне зависимости от водоцементного отношения. Несколько менее эффективно воздействие гидрофобизатора. Пропитка же 15 %-ным раствором «Сифтор-Б» положительного эффекта практически не дает. В целом, процесс карбонизации закономерно замедляется со снижением водоцементного отношения.

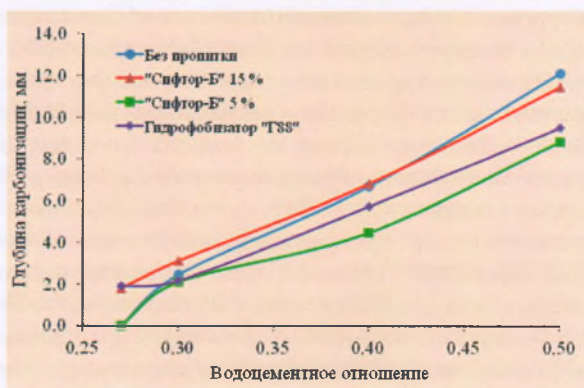


Рисунок 1 – Зависимость глубины карбонизации цементного камня от его водоцементного отношения

Для более объективного сравнительного анализа полученных результатов была проведена статистическая оценка полученных данных [9]. Для этого сопоставлялись ранее полученные средние значения: без пропитки защитными композициями (массив данных БП) и с пропиткой (массив П). С этой целью последовательно рассчитывали

$$S_{БП-П} = \sqrt{\frac{(n_{БП} - 1) S_{БП}^2 + (n_{П} - 1) S_{П}^2}{n_{БП} + n_{П} - 2}}, \quad (6)$$

$$S_{\bar{x}_{\text{БП-П}}} = S_{\text{БП-П}} \sqrt{\frac{n_{\text{БП}} + n_{\text{П}}}{n_{\text{БП}} n_{\text{П}}}}, \quad (7)$$

$$t = \frac{|\bar{x}_{\text{БП}} - \bar{x}_{\text{П}}|}{S_{\bar{x}_{\text{БП-П}}}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{БП}}$, $S_{\text{П}}$ – выборочные стандартные отклонения в массивах данных без пропитки образцов (БП) и с пропиткой (П), соответственно;

$n_{\text{БП}}$, $n_{\text{П}}$ – количество результатов измерений в соответствующих массивах.

Затем устанавливалось табличное значение коэффициента Стьюдента t_{α} и сопоставлялось с полученной по (8) величиной t .

Полагалось, что при $t < t_{\alpha}$ расхождение между массивами БП и П носит случайный характер, а если $t > t_{\alpha}$, то это существенно различные величины [9]. Полученные результаты представлены в таблицах 1–3 (в таблицах СФ 15 % и СФ 5 % – водные растворы реагента «Сифтор-Б» 15 %-ной и 5 %-ной концентрации, соответственно).

Таблица 1 – Глубина карбонизации бетона, мм

В/Ц	Пропитка	$\bar{x} \pm \mu$, мм	S, мм	V, %	$S_{\bar{x}}$, мм	Сравнение		
						$S_{\text{БП-П}}$, мм	$S_{\bar{x}_{\text{БП-П}}}$, мм	Разница
0,50	-	12,1±1,4	1,30	10,78	0,53	-	-	-
	СФ 15 %	11,4±3,1	2,96	25,87	1,21	2,29	1,32	Нет
	СФ 5 %	8,8±0,7	0,66	7,46	0,27	1,03	0,60	Есть
	Г88	9,5±2,5	2,38	25,09	0,97	1,92	1,11	Есть
0,40	-	6,7±0,4	0,36	5,37	0,15			
	СФ 15 %	6,8±0,9	0,82	12,13	0,34	0,64	0,37	Нет
	СФ 5 %	4,5±0,5	0,45	10,08	0,18	0,41	0,24	Есть
	Г88	5,7±0,6	0,60	10,46	0,24	0,49	0,29	Есть
0,30	-	2,5±0,5	0,50	20,29	0,20			
	СФ 15 %	3,1±0,5	0,44	14,3	0,18	0,47	0,27	Есть
	СФ 5 %	2,1±0,7	0,59	28,25	0,24	0,55	0,32	Нет
	Г88	2,2±0,8	0,72	32,78	0,29	0,62	0,36	Нет

Таблица 2 – Масса образцов до карбонизации

В/Ц	Пропитка	$m_0 \pm \mu$, г	S, г	V, %	$S_{\bar{x}}$, г	Сравнение		
						$S_{\text{БП-П}}$, г	$S_{\bar{x}_{\text{БП-П}}}$, г	Разница
0,50	-	101,3±2,9	2,8	2,7	1,1	-	-	-
	СФ 15 %	100,3±4,4	4,2	4,1	1,7	3,54	2,05	Нет
	СФ 5 %	111,5±7,0	6,7	6,0	2,7	5,10	2,95	Есть
	Г88	107,1±5,3	5,0	4,7	2,1	4,07	2,35	Есть
0,40	-	115,1±7,4	7,1	6,16	2,9			
	СФ 15 %	106,4±1,8	1,8	1,65	0,7	5,16	2,98	Есть
	СФ 5 %	115,1±7,4	7,1	6,16	2,9	6,39	3,69	Нет
	Г88	119,3±8,8	8,4	7,03	3,4	7,77	4,49	Нет
0,30	-	126,3±10	9,5	7,54	3,9			
	СФ 15 %	120,1±0,6	0,5	0,45	0,2	6,75	3,90	Нет
	СФ 5 %	125,8±4,4	4,2	0,36	1,7	7,37	4,26	Нет
	Г88	123,0±6,5	6,2	5,01	2,5	8,03	4,63	Нет

Таблица 3 – Прирост массы образцов после карбонизации в сравнении с массой до карбонизации, %

В/Ц	Пропитка	$\Delta m \pm \mu, \text{ г}$	$S, \text{ г}$	$V, \%$	$S_{\bar{x}}, \text{ г}$	Сравнение		
						$S_{\text{БП}}, \text{ г}$	$S_{\text{П}}, \text{ г}$	Разница
0,50	-	9,9±0,7	0,63	6,35	0,26	-	-	-
	СФ 15 %	10,0±1,0	0,94	9,37	0,38	0,80	0,46	Нет
	СФ 5 %	6,5±0,6	0,61	9,35	0,25	0,62	0,36	Есть
	Г88	7,6±0,3	0,30	3,98	0,24	0,49	0,28	Есть
0,40	-	5,5±0,5	0,71	12,96	0,29			
	СФ 15 %	5,3±0,8	0,74	14,13	0,30	0,73	0,42	Нет
	СФ 5 %	4,0±0,5	0,51	12,82	0,21	0,62	0,36	Есть
	Г88	3,4±0,1	0,09	2,46	0,04	0,53	0,32	Есть
0,30	-	2,0±0,7	0,69	35,30	0,28			
	СФ 15 %	3,0±0,3	0,26	8,45	0,10	0,52	0,30	Есть
	СФ 5 %	1,0±0,2	0,22	21,32	0,09	0,51	0,30	Есть
	Г88	1,2±0,1	0,14	11,51	0,06	0,50	0,29	Есть

При сравнительно высоких значениях водоцементного отношения (0,50 и 0,40) сохраняется установленная ранее закономерность: пропиточные композиции «Сифтор-Б» 5 % и гидрофобизатор «Г88» снижают интенсивность карбонизации цементного камня (таблица 1). Обратная картина вырисовывается при водоцементном отношении, равном 0,30, хотя следует отметить, что при низких водоцементных отношениях (при 0,30, а тем более при 0,27) глубина карбонизации чрезвычайно мала и трудно оценивается инструментальными методами. В связи с этим данные для цементного камня с водоцементным отношением, равным 0,27, не приведены: все параметры (глубина карбонизации, начальная масса и прирост массы образцов) пропитанного материала и без пропитки практически идентичны. Влияние гидрофобизатора на глубину карбонизации цементного камня сравнительно легко объясняется снижением влажности поверхностных слоев образцов цементного камня и, соответственно, уменьшением потока углекислого газа в глубинные слои материала. Несколько парадоксально выглядит воздействие раствора «Сифтор-Б». Казалось бы, с ростом концентрации пропиточной композиции глубина карбонизации должна уменьшаться, но этого не наблюдается. На наш взгляд, это обусловлено следующим. Увеличение концентрации раствора способствует и увеличению количества гидроокиси кальция, вступающей в реакцию с компонентами реагента «Сифтор-Б» с образованием водонерастворимых фторидов магния и кальция именно в поверхностных слоях образцов и сокращением толщины пропитанного слоя. При более низкой концентрации «Сифтор-Б» (5 %) в силу снижения вязкости раствора и меньшего содержания способных к реакции компонентов пропиточная композиция проникает в тело материала на большую глубину, способствуя снижению процессов диффузии углекислого газа.

То есть, одним из решающих факторов, оказы-

вающих влияние на интенсивность процессов карбонизации, является глубина пропитки цементного камня (или бетона). Наши попытки оценить глубину пропитки прямыми методами, например, с помощью различных индикаторов, успеха не имели, и в этом направлении исследования следует продолжить. Косвенная же оценка глубины проникновения пропиточных композиций (таблица 2) проведена по изменению массы образцов до (серия БП) и после пропитки (серия П). При низких водоцементных отношениях, а именно 0,27 (нейтрализованный слой удалось выявить лишь у нескольких образцов – это образцы, пропитанные 15 %-ным раствором «Сифтор-Б», и один образец, пропитанный гидрофобизатором «Г88») и 0,30, разница практически отсутствует. С увеличением водоцементного отношения появляется разница: при В/Ц, равном 0,50, вполне логичная, соответствующая данным, приведенным в таблице 1, а при водоцементном отношении 0,40 – обратная. Вероятно, алогичность результатов, приведенных в таблице 2, при водоцементном отношении 0,40 объясняется высоким разбросом данных: величина изменяется от 1,8 для образцов с пропиткой раствором «Сифтор-Б» 15 % до 7,4–8,8 для остальных серий.

Полученные результаты позволяют рассчитать и эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в цементном камне. Расчет производится в соответствии с последовательностью, предложенной в [1]. Величину глубины карбонизации принимают по верхней границе поля допуска ($\bar{x} + \mu$):

$$D_{\text{CO}_2} = \frac{m_0 x^2}{2Ct}, \quad (9)$$

где m_0 – реакционная емкость бетона (цементного камня) по отношению к углекислому газу;

x – глубина карбонизации материала, см;

C – концентрация углекислого газа в относительных единицах по объему;

t – продолжительность воздействия газа, с.

В свою очередь, реакционная емкость рассчитывается в зависимости от расхода цемента Ц (в кг на 1 м³ бетона или цементного камня), относительной массы основных окислов в цементе в пересчете на СаО *p* (примерно равна 0,6) и степени нейтрализации цементного камня, равной отношению количества основных окислов, прореагировавших с СО₂, к общему их количеству в цементе *f* (примерно равна 0,6):

$$m_0 = 0,4Цpf. \quad (10)$$

Расход цемента в 1 м³ цементного камня определяется водоцементным отношением цементного теста В/Ц, плотностью цемента ρ_ц (3100 кг/м³) и воды ρ_в (1000 кг/м³):

$$Ц = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}}}. \quad (11)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в цементном камне

В/Ц	\bar{x} , мм, при пропитке				Ц, кг	m_0	D_{CO_2} , см ² /с, при пропитке/характеристика проницаемости бетона			
	-	СФ 15%	СФ 5%	Г88			-	СФ 15%	СФ 5%	Г88
0,50	13,5	14,5	9,5	12	1216	175	$1,88 \cdot 10^{-4}$ БНП	$2,17 \cdot 10^{-4}$ БНП	$9,33 \cdot 10^{-5}$ БНП	$1,49 \cdot 10^{-4}$ БНП
0,40	7,1	7,7	5,0	6,1	1384	199	$5,93 \cdot 10^{-5}$ БНП	$6,98 \cdot 10^{-5}$ БНП	$2,94 \cdot 10^{-5}$ БНП	$4,38 \cdot 10^{-5}$ БНП
0,30	3,0	3,6	2,7	3,0	1606	231	$1,23 \cdot 10^{-5}$ БНП	$1,77 \cdot 10^{-5}$ БПП	$9,96 \cdot 10^{-6}$ БПП	$1,23 \cdot 10^{-5}$ БНП

Примечание – Под чертой дана градация: БНП и БПП – бетон нормальной и пониженной проницаемости, соответственно.

Полагая, что в бетоне заполнитель (например, гранитный щебень и кварцевый песок) представляет собой инертный материал, то карбонизации подвергается исключительно цементный камень. И диффузионная проницаемость цементного камня определяет эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне. В этом случае градация характеристик проницаемости бетона для углекислого газа, представленная в соответствующем стандарте [10], может быть распространена на полученные выше результаты для цементного камня. Переход от структурных характеристик цементного камня к параметрам бетона сравнительно просто достигается посредством учета разницы общего расхода воды на образование бетонной смеси и на смачивание поверхности зерен крупного и мелкого заполнителей (для достаточно достоверных расчетов для гранитного щебня и кварцевого песка 1,5 % и 3,5 % от массы заполнителей, соответственно).

Полученные результаты по диффузионной проницаемости бетона дают возможность рассчитать ориентировочный срок эксплуатации железобетона до момента полной карбонизации защитного слоя бетона и начала активации арматуры. Долговечность – время пассивного состояния стальной арматуры – для бетона без пропитки принято за 100 % (рис. 2).

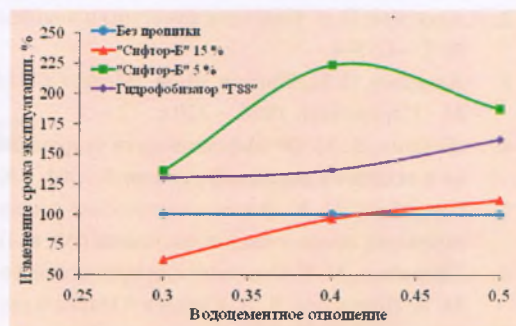


Рисунок 2 – Влияние водоцементного отношения цементного камня на срок эксплуатации железобетона

Как следует из приведенных на рисунке 2 данных, использование реагента «Сифтор-Б» с концентрацией 15 % эффекта не дает. При снижении концентрации до 5 % существенно (примерно в 2,2 раза при водоцементном отношении, равном 0,40) повышается долговечность железобетона. Положительное влияние оказывает и пропитка цементного камня гидрофобизатором «Г88».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана экспериментальная установка для исследования процессов карбонизации цементного камня в среде повышенной концентрации углекислого газа.

Показано снижение глубины карбонизации цементного камня, пропитанного раствором гидрофобизатора «Г88».

Пропитка цементного камня водным раствором «Сифтор-Б» 15 %-ной концентрации ухудшает защитные свойства бетона. Снижение концентрации

раствора до 5 % увеличивает расчетный срок эксплуатации железобетона в 2,2 раза.

Необходимы дальнейшие исследования в области повышения защитных свойств бетона различ-

ной плотности по отношению к стальной арматуре с расширением гаммы пропиточных композиций и их концентрации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, С. Н., Розенталь, Н. К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.
2. Алексеев, С. Н. Коррозия арматуры и повышение защитного действия бетона // Бетон и железобетон. – 1986. – № 7. – С. 3–4.
3. Алексеев, С. Н., Иванов, Ф. М., Модры, С., Шиссль, П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. – М. : Стройиздат, 1990. – 320 с.
4. Шейнин, А. М. Об эффективности вторичной защиты дорожного бетона / А. М. Шейнин, С. В. Эккель // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2004. – № 1. – С. 19–23.
5. Пшембаев, М. К. Физико-химические основы процессов защиты поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий пропиточными составами / М. К. Пшембаев // Наука и техника. – 2017. – Т. 16. – № 2. – С. 144–152.
6. Пшембаев, М. К. Оптимизация пропиточного состава для защиты бетонных покрытий автомобильных дорог / М. К. Пшембаев, Я. Н. Ковалев // Наука и техника. – 2018. – Т. 17. – № 2. – С. 95–99.
7. Хотянович, О. Е. Технология гексафторсилката магния / О. Е. Хотянович, М. И. Кузьменков // Химическая промышленность. – 2007. – Т. 84. – № 5. – С. 233–241.
8. Кузьменков, М. И. Синтез гексафторсилката магния / М. И. Кузьменков, О. Е. Хотянович // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии : сб. науч. трудов / НАН Беларуси, Институт химии новых материалов. – Минск : Белорусская наука, 2008. – С. 161–173.
9. Алесковский, В. В. и др. Физико-химические методы анализа. Практическое руководство. – 2-е изд-е, пер. и испр. – Л. : Химия. – 424 с.
10. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний : ГОСТ 31383-2008.

SPISOK ISPOL'ZOVANNOJ LITERATURY

1. Alekseev, S. N., Rozental', N. K. Korrozionnaya stojkost' zhelezobetonnyh konstrukcij v agressivnoj promyshlennoj srede. – M. : Strojizdat, 1976. – 205 s.
2. Alekseev, S. N. Korroziya armatury i povyshenie zashchitnogo dejstviya betona // Beton i zhelezobeton. – 1986. – № 7. – S. 3–4.
3. Alekseev, S. N., Ivanov, F. M., Modry, S., Shissl' P. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnyh sredah. – M. : Strojizdat, 1990. – 320 s.
4. Shejnin, A. M. Ob effektivnosti vtorichnoj zashhity dorozhnogo betona / A. M. Shejnin, S. V. Ekkel' // Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli. – 2004. – № 1. – S. 19–23.
5. Pshembaev, M. K. Fiziko-himicheskie osnovy processov zashhity poverhnostnogo sloya dorozhnyh betonnyh pokrytij propitochnymi sostavami / M. K. Pshembaev // Nauka i tekhnika. – 2017. – T. 16. – № 2. – S. 144–152.
6. Pshembaev, M. K. Optimizaciya propitochnogo sostava dlya zashhity betonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog / M. K. Pshembaev, Ya. N. Kovalev // Nauka i tekhnika. – 2018. – T. 17. – № 2. – S. 95–99.
7. Hotyanovich, O. E. Tekhnologiya geksaftorsilikata magniya / O. E. Hotyanovich, M. I. Kuz'menkov // Himicheskaya promyshlennost'. – 2007. – T. 84. – № 5. – S. 233–241.
8. Kuz'menkov, M. I. Sintez geksaftorsilikata magniya / M. I. Kuz'menkov, O. E. Hotyanovich // Himicheskie reaktivy, reagenty i processy malotonnazhnoj himii : sb. nauch. trudov / NAN Belarusi, Institut himii novyh materialov. – Minsk : Belorusskaya nauka, 2008. – S. 161–173.
9. Aleskovskij, V. V. i dr. Fiziko-himicheskie metody analiza. Prakticheskoe rukovodstvo. – 2-e izd-e, per. i ispr. – L. : Himiya. – 424 s.
10. Zashhita betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij ot korrozii. Metody ispytanij : GOST 31383-2008.

Статья поступила в редакцию 21.05.2018.