

УДК 691.32:620.193/199

ОЦЕНКА КАРБОНИЗАЦИИ И РАЗВИТИЯ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ ВО ВРЕМЕНИ ПО СЕЧЕНИЮ БЕТОНОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ

канд. техн. наук, доц. А.А. ВАСИЛЬЕВ

(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

Выполнен анализ оценки и прогнозирования развития карбонизации бетона на основе существующих методик и показана необходимость разработки новых. Предложены новые показатели карбонизации бетона (цементно-песчаной фракции) и современная методика их определения, позволяющая объективно оценивать параметры карбонизации бетона. Получены расчетно-экспериментальные зависимости прогнозирования изменения во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие карбонатной составляющей и степени карбонизации бетона. Предложены граничные условия для оценки карбонизации бетона и ее влияния на состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре. Выполнено сравнение полученных автором результатов с существующими в части рекомендуемых классов бетонов по прочности на сжатие для различных эксплуатационных условий.

Ключевые слова: бетон, железобетонные элементы, железобетонные конструкции, карбонизация, граничные условия, защитные свойства бетона, прочность на сжатие.

Введение. 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.

Основным видом коррозии бетона в любых атмосферных средах 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), определяя в целом техническое состояние ЖБЭ и ЖБК и их долговечность.

Основная часть. Механизм карбонизации, влияние карбонизации на физико-химические характеристики бетона и зависимость скорости карбонизации от различных факторов исследовались и исследуются многочисленными учеными различных стран [1–40]. Подавляющая доля исследований была проведена в лабораторных условиях, и только отдельные выполнены на ЖБЭ, эксплуатировавшихся длительные сроки в реальных условиях [5; 6; 8; 18; 19]. Изучалось воздействие карбонизации на пористость и проницаемость, прочность, усадку, состояние защитных свойств бетона и, наоборот, влияние технологических и климатических факторов на карбонизацию.

Все исследования карбонизации бетона базируются на основном уравнении карбонизации, которое введено авторами работы [1], 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:

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

где x – толщина нейтрализованного слоя по фенолфталеиновой пробе, см;

A – коэффициент;

τ – время службы конструкции, с,

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

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 .

Необходимо отметить, что понятие эффективного коэффициента диффузии CO_2 было введено искусственно, чтобы увязать толщину нейтрализованного слоя бетона, определяемого по фенолфталеиновому тесту (ФФТ), с параметрами карбонизации. Было принято, что бетон в неокрашенной зоне карбонизирован и полностью потерял свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре, в окрашенной – полностью сохраняет свои защитные свойства. Таким образом, карбонизация развивается по сечению бетона жестко линейно, деля бетон на «больной» и «здоровый».

Результаты, полученные учеными в оценке механизма карбонизации и зависимости скорости карбонизации от различных параметров бетонной смеси, атмосферных условий, значительно отличаются [1; 5; 6; 14; 24]. 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 [5; 8–10; 13; 15].

Многочисленными учеными постоянно производятся исследования различных параметров, влияющих на коэффициент A (в части состава бетона, технологических параметров, условий эксплуатации и др.) для улучшения соответствия расчетных результатов реальным. Исследователи считают, что уточняя отдельные параметры, изменяя подходы (но не отменяя основу – ФФТ), можно приблизить расчетные значения глубины карбонизации к фактическим, однако, это невозможно уже хотя бы потому, что в капиллярно-пористой структуре бетона не может быть резкого перехода (как считается, толщиной около 1 мм) «больного» бетона в «здоровый».

Поскольку карбонизацию бетона определяют ФФТ, резко изменяющим окраску бетона в определенной зоне, значит, он должен показывать либо границу карбонизированного слоя (остановка карбонизации), либо, при продолжении карбонизации по сечению бетона и во времени, изменение толщины слоя, потерявшего свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре. Важнейшим фактором является то, что ФФТ 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 [5–8]. На основании результатов исследования более 10 000 образцов бетона, отобранных по сечению реально эксплуатируемых ЖБЭ и отдельно, в зоне расположения стальной арматуры, было доказано, что карбонизация не происходит линейно по сечению бетона, деля его на «большой» и «здоровый», а развивается по сложной экспоненциальной зависимости, причем, если количественно содержание карбонатов кальция максимально в поверхностных слоях и уменьшается по сечению до минимума, то изменение щелочности поровой жидкости по сечению бетона обратно пропорционально. Также и другие ученые, приводя результаты своих исследований, показывают, что поглощение углекислого газа по сечению бетона происходит не линейно, а по сложной зависимости. Первыми, в своей работе [1], были С.Н. Алексеев и Н.К. Розенталь, приведшие зависимости распределения связанной углекислоты по сечению образцов цементно-песчаного раствора с различными В/Ц, однако в дальнейшем это не было развито, т.к. не вписывалось в существующую теорию карбонизации.

ФФТ – химическая реакция взаимодействия фенолфталеина с едким натром и гидроксидом кальция, вызывающая обесцвечивание (окраску) раствора при определенном значении показателя щелочности поровой жидкости (рН), но никак не индикатор окончания карбонизации, соответственно, ФФТ не показывает границу карбонизированного слоя бетона.

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. Общеизвестно, что ФФТ показывает изменение показателя щелочности среды в области значений рН 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 [19] по результатам исследования образцов цементно-песчаной фракции было получено, что значение границы нейтрализованного слоя соответствует показателю рН $\approx 10,3$, т.е. стальная арматура, находясь в зоне, считающейся защитной для стальной арматуры (рН = 10,3–11,8), может и корродировать в условиях доступа кислорода и влаги из воздуха.

Таким образом, все результаты, полученные на основе ФФТ, не позволяют объективно оценивать и прогнозировать карбонизацию бетона. ФФТ – частный случай, показывающий толщину бетона, снизившего свои защитные свойства до показателя рН $\approx 10,3$, что не дает возможность оценивать и прогнозировать карбонизацию до и после граничного значения рН и ее влияние на состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре.

Приведенное выше обуславливает необходимость применения новых подходов и методов исследования карбонизации бетона. Авторские исследования карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов) выполнялись методами рН- и карбометрии. Определялись показатели рН (водородный показатель водной вытяжки цементного камня) и КС (карбонатная составляющая), поскольку показатель рН 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 характеризует количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона в массовых процентах и его влияние на изменение показателя рН. Были разработаны экспресс-методы определения показателей рН и КС цементно-песчаной фракции бетона [8].

На основании исследования образцов цементно-песчаной фракции, отобранных из бетонов различных классов по прочности на сжатие, как лабораторных составов, так и реально эксплуатируемых ЖБЭ были полу-

чены усредненные регрессионные зависимости карбонизации во времени по сечению бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15}-C^{30/37}$ для различных степеней агрессивности воздушных сред [8]. В общем виде

$$KC(l, t) = \alpha_1 + (\alpha_2 + \alpha_3 \sqrt{t}) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}, \quad KC(l, t)_{\max} = \alpha_4 \alpha, \quad (3)$$

где α – степень гидратации цемента, %;

$\alpha_1-\alpha_4$ – коэффициенты.

Значения коэффициентов $\alpha_1-\alpha_4$ для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15}-C^{30/37}$ и различных эксплуатационных условий приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Значения показателей $\alpha_1-\alpha_4$

Класс бетона по прочности на сжатие	α_1	α_2	α_4	α_3					
				СХ О	СХ У	ОПЗ О	ОПЗ У	А О	А У
$C^{12/15}$	2,39	0,500	27,3	0,619	1,16	0,312	0,882	0,676	0,962
$C^{16/20}$	2,77	0,560	36,1	0,577	1,11	0,274	0,825	0,634	0,906
$C^{18/22,5}$	3,04	0,585	39,6	0,549	1,07	0,249	0,791	0,609	0,869
$C^{20/25}$	3,22	0,625	43,1	0,529	1,05	0,223	0,758	0,586	0,843
$C^{22/27,5}$	3,39	0,655	45,6	0,512	1,03	0,208	0,729	0,567	0,818
$C^{25/30}$	3,62	0,710	49,6	0,485	0,996	0,172	0,688	0,538	0,782
$C^{28/35}$	4,12	0,760	56,3	0,438	0,937	0,105	0,621	0,485	0,717
$C^{30/37}$	4,32	0,790	58,8	0,419	0,913	0,077	0,585	0,464	0,692

Примечание. СХ, ОПЗ, А – условия, соответственно, сельскохозяйственных зданий; общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой; открытой атмосферы; О, У – области, соответственно, обычной и ускоренной карбонизации.

Путем математической обработки получены зависимости изменения показателей $\alpha_1-\alpha_4$ от гарантированной прочности бетона на сжатие [8]:

$$KC(l, t) = (0,0874C + 1,0423) + \left((0,0134C + 0,2944) + \alpha_3 \sqrt{t} \right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}, \quad (4)$$

$$KC(l, t)_{\max} = (1,399C + 7,4773) \alpha, \quad (5)$$

где C – гарантированная прочность на сжатие, МПа.

Полученные регрессионные зависимости позволяют прогнозировать во времени изменение показателя KC по сечению бетона с момента изготовления изделия.

При выполнении детального обследования эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК для прогнозирования изменения карбонизации необходимо учитывать фактическое значение показателя KC (KC_{ϕ}) на момент обследования (время t_{ϕ}).

Регрессионные зависимости изменения во времени ($t_{\text{прог}}$) показателя карбонатной составляющей ($KC_{\text{прог}}$) во времени по сечению бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15}-C^{30/37}$ для различных степеней агрессивности воздушных сред с учетом значений карбонатной составляющей (KC_{ϕ}) на момент обследования в общем виде:

$$KC_{\text{прог}} = KC_{\phi} + \alpha e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)} \left(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_{\phi}} \right), \quad (6)$$

где α – коэффициент, соответствует коэффициенту α_3 (таблица 2).

Таблица 2. – Значения показателя α_3

Условия эксплуатации	Коэффициент α_3
СХ О	$-0,0091C + 0,7565$
СХ У	$-0,0112C + 1,3295$
ОПЗ О	$-0,0108C + 0,4882$
ОПЗ У	$-0,0135C + 1,0929$
А О	$-0,0097C + 0,8267$
А У	$-0,0123C + 1,1495$

Приведенные расчетно-экспериментальные зависимости карбонизации бетона показывают изменение во времени карбонатной составляющей (показателя КС). Для различных классов бетона по прочности на сжатие величина карбонатной составляющей зависит от количества использованного цемента (Ц), В/Ц, способа твердения бетона и др. Одно и то же численное значение карбонатной составляющей для одних бетонов может свидетельствовать о начале карбонизации, для других – уже о полной карбонизации в рассматриваемом сечении. Таким образом, показатель КС не позволяет объективно оценивать карбонизацию бетона. Для оценки карбонизации необходим параметр, который независимо от состава бетона позволял бы оценивать его коррозионное состояние. Таким показателем предлагается принять степень карбонизации бетона (показатель СК) – величину, определяющую процент гидроокиси кальция и гидратированных клинкерных материалов, перешедших в карбонаты на разной глубине бетона.

Показатель СК рассчитывается из пропорции

$$X \% СК_l = \frac{\% КС_l \cdot 100}{\% КС_{\max}}, \quad (7)$$

где $СК_l$ и $КС_l$ – соответственно, значения степени карбонизации и карбонатной составляющей, %, в рассматриваемом сечении бетона;

$КС_{\max}$ – максимальное значение карбонатной составляющей,

$$КС_{\max} = ПВК \cdot \alpha. \quad (8)$$

где ПВК – предельная величина карбонизации бетона, %;

α – степень гидратации цемента, %.

Методика определения ПВК приведена в [8].

Предлагаемый показатель не имеет никакого отношения к общепринятому понятию степени карбонизации, в соответствии с которым степень карбонизации бетона определяется количеством поглощенного бетоном CO_2 воздуха.

Предлагаемые на основании выполненных исследований и расчетов усредненные регрессионные зависимости изменения степени карбонизации во времени по сечению бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15}-C^{30/37}$ для различных степеней агрессивности воздушных сред в общем виде

$$СК(l,t) = \frac{\alpha_1 + (\alpha_2 + \alpha_3 \sqrt{t}) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}}{\alpha_4 \alpha}, \quad (9)$$

где α – степень гидратации цемента, %;

$\alpha_1-\alpha_4$ – коэффициенты.

Значения показателей $\alpha_1-\alpha_4$ приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Значения показателей $\alpha_1-\alpha_4$

Класс бетона по прочности на сжатие	α_1	α_2	α_3						α_4
			СХ О	СХ У	ОПЗ О	ОПЗ У	А О	А У	
$C^{12/15}$	2,39	0,500	0,619	1,16	0,312	0,882	0,676	0,962	19,5
$C^{16/20}$	2,77	0,565	0,577	1,11	0,274	0,825	0,634	0,906	25,8
$C^{18/22,5}$	3,04	0,585	0,549	1,07	0,249	0,791	0,609	0,869	28,3
$C^{20/25}$	3,22	0,625	0,529	1,05	0,223	0,758	0,586	0,843	30,8
$C^{22/27,5}$	3,39	0,655	0,512	1,03	0,208	0,729	0,567	0,818	32,6
$C^{25/30}$	3,62	0,710	0,485	0,996	0,172	0,688	0,538	0,782	35,4
$C^{28/35}$	4,12	0,760	0,438	0,937	0,105	0,621	0,485	0,717	40,2
$C^{30/37}$	4,32	0,790	0,419	0,913	0,077	0,585	0,464	0,692	42,0

Примечание. СХ, ОПЗ, А – условия, соответственно, сельскохозяйственных зданий; общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой; открытой атмосферы; О, У – области, соответственно, обычной и ускоренной карбонизации.

Путем математической обработки получена зависимость изменения показателей $\alpha_1-\alpha_4$ от гарантированной прочности бетона на сжатие (коэффициент α соответствует коэффициенту α_3 , таблица 3):

$$СК(l,t) = \frac{(0,0874C + 1,0423) + \left[(0,0134C + 0,2944) + \alpha_3 \sqrt{t} \right] e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}}{(1,399C + 7,4773)\alpha}. \quad (10)$$

В общем виде зависимости изменения карбонатной составляющей и степени карбонизации бетона от расхода цемента

$$KC(C, l, t) = (0,0080C + 0,6747) + \left((0,0012,97C + 0,2308) + \gamma_3 \sqrt{t} \right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)}, \quad (11)$$

$$СК(C, l, t) = \frac{(0,0080C + 0,6747) + \left[(0,0012C + 0,2308) + \gamma_3 \sqrt{t} \right] e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)}}{(0,0912C + 0,2581)\alpha}, \quad (12)$$

где C – расход цемента, кг/м³ (таблица 4).

Таблица 4. – Значения показателя γ_3

Условия эксплуатации	Коэффициент γ_3
СХ О	$- 0,0007C + 0,7730$
СХ У	$- 0,001C + 1,3791$
ОПЗ О	$- 0,0007C + 0,4672$
ОПЗ У	$- 0,0010C + 1,0964$
А О	$- 0,0007C + 0,8390$
А У	$- 0,0010C + 1,1854$

Полученные зависимости (11) и (12) позволяют прогнозировать на стадии изготовления бетона изменение показателей КС и СК во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие для разных атмосферных условий.

Оценка карбонизации и прогнозирование ее развития важны, прежде всего, с точки зрения изменения во времени защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре. Поскольку в зоне нанесения индикатора ФФТ показывает изменение показателя рН в пределах от 8,3 до 14, в зоне резкого перехода цвета цементно-песчаной фракции значение показателя рН составляет $\approx 10,3$. При рН = 9,0 бетон полностью теряет свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре, а в соответствии с термодинамическими расчетами В.И. Бабушкина [3] коррозия стальной арматуры возможна при рН < 11,8. Таким образом, значение рН = 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.

На основании многолетних исследований распределения по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие показателей рН и КС (СК) была выявлена их взаимосвязь [8], а также их взаимосвязь с состоянием стальной арматуры.

Для оценки корректности предложенной методики оценки толщины бетона, потерявшего свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре по показателю СК, было выполнено сравнение полученных результатов с результатами других авторов. Сравнение выполнялось только для показателей рН = 10,3 (ФФТ) и рН = 10,3 (СК = 36%), т.к. отсутствуют исследования другими авторами зон до и после граничного значения показателя рН. Были проанализированы результаты определения толщины бетона, потерявшего свои защитные свойства, по отношению к стальной арматуре для бетонов классов бетона по прочности на сжатие $C^{12}/_{15} - C^{30}/_{37}$ и одинаковых эксплуатационных условий.

Предложенные различными авторами выражения для расчета глубины карбонизации от прочности бетона на сжатие не учитывают состав бетона (тип и количество цемента, водоцементное отношение, технологические факторы), а именно он определяет коррозионную стойкость (по исследованиям проф. В.В. Бабицкого, класс бетона по прочности на сжатие $C^{20}/_{25}$ можно получить 972 составами и долговечность такого бетона (по карбонизации (ФФТ)) будет составлять от 13 до 114 лет). Поэтому сравнивали полученные результаты с результатами оценки карбонизации бетона по модели проф. В.В. Бабицкого, которая учитывает не только состав бетона (количество цемента и В/Ц), степень гидратации цемента, но и капиллярную пористость бетона, в значительной степени определяющую его карбонизацию, формулы (13)–(16).

$$X = \sqrt{\frac{2c\tau D}{m_0 \frac{C}{300}}}, \quad (13)$$

$$D = k_q \cdot D_0 \left(\Pi_k^6 - 0,03 \right)^3, \quad (14)$$

$$\Pi_k^6 = \frac{\Pi [0,98(V/\Pi) - 0,0094 - 0,369\alpha]}{1000}, \quad (15)$$

$$m_0 = k_{\text{цм}_0} \alpha \Pi (1 - \eta), \quad (16)$$

где Π – количество цемента в 1 м³ бетона, кг;

$k_{\text{ц}}$ – коэффициент, определяющий вид цемента, для портландцемента $k_{\text{ц}} = 12$;

D_0 – коэффициент диффузии газа в газе, см²/с; для углекислого газа $D_0 = 1,65 \cdot 10^{-1}$;

Π_k^6 – капиллярная пористость бетона, д. ед.;

V/Π – водоцементное отношение;

α – степень гидратации цемента;

$k_{\text{цм}_0}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на реакционную емкость бетона, см³/кг;

для портландцемента $k_{\text{цм}_0} = 0,205$ см³/кг;

η – содержание инертных минеральных добавок в вяжущем, д. ед.

Определяли развитие карбонизации до возраста бетона 50 лет для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$, условий открытой атмосферы, усредненных составов (ПЦ 500, Д0; ОК = 1–4 см).

Результаты вычислений по методике проф. В.В. Бабицкого представлены на рисунке 1, по авторской методике – на рисунке 2.

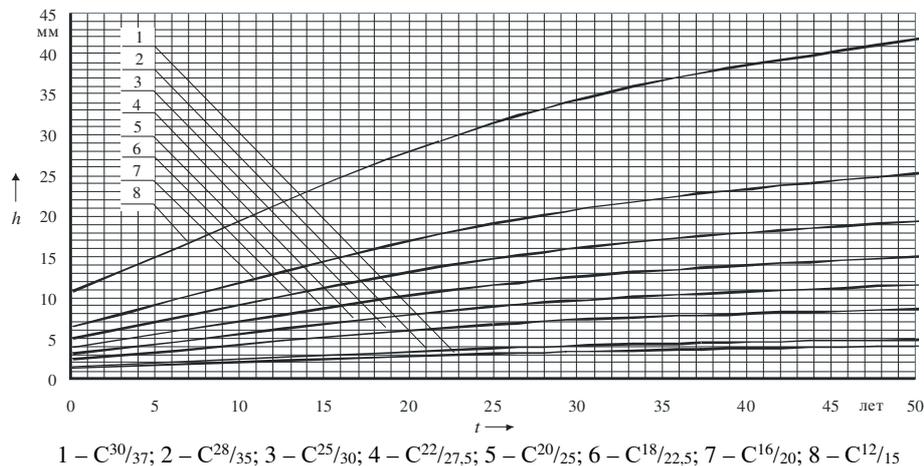


Рисунок 1. – Усредненные регрессионные зависимости t - h развития карбонизации для различных классов бетона по прочности на сжатие, условий открытой атмосферы, области ускоренной карбонизации по методике проф. В.В. Бабицкого (ФФТ; $pH \approx 10,3$)

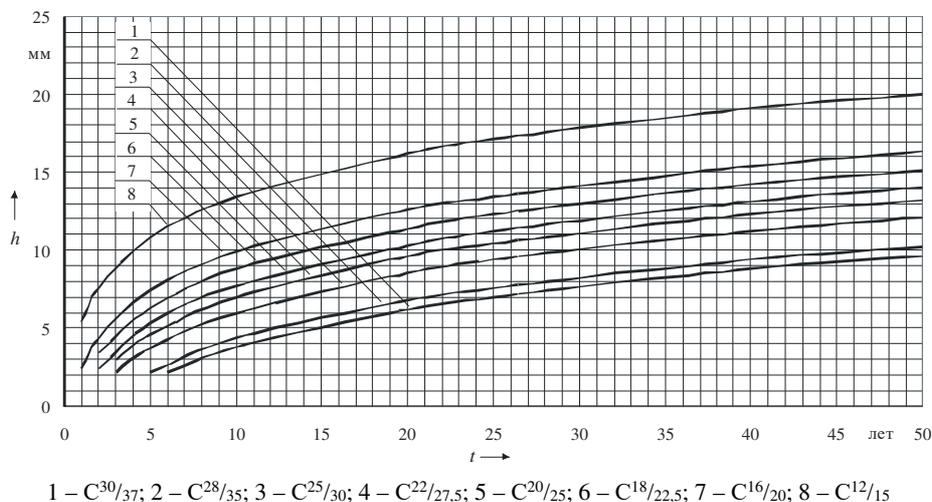


Рисунок 2. – Усредненные регрессионные зависимости t - h развития карбонизации для различных классов бетона по прочности на сжатие условий открытой атмосферы, области ускоренной карбонизации по авторской методике ($pH \approx 10,3$; СК = 36%)

Анализ сравнения результатов изменения во времени глубины карбонизации различных авторов показывает, что обе зависимости близки по характеру, однако авторские располагаются «более компактно», абсолютные значения для времени эксплуатации 25 и 50 лет (что соответствует европейским нормам) для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{18/22,5}-C^{25/30}$ отличаются незначительно. Таким образом, выполненные исследования позволяют оценивать и прогнозировать толщину бетона, потерявшего свои защитные свойства по отношению к стальной арматуре, для различных граничных условий. Так, например, в [8] приведена оценка для следующих граничных значений карбонизации: $pH = 11,8$; $СК = 13\%$ (потеря защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, возможность начало коррозии стальной арматуры); $pH = 11,3$; $СК = 18\%$ (гарантированное начало коррозии стальной арматуры); $pH = 10,8$; $СК = 26\%$ (развитие коррозии стальной арматуры низкой степени интенсивности); $pH = 10,3$; $СК = 36\%$ (потеря защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре по ФФТ).

Кроме того, результаты исследований дают возможность подбирать класс бетона по прочности на сжатие не только для определенных условий эксплуатации, но и для конкретной толщины бетона защитного слоя [14]. Так, в таблицах 5–7 приведено сравнение (для разных граничных условий) рекомендуемых классов бетона по прочности на сжатие, при использовании в условиях карбонизации бетона, различными нормативными документами и автора.

Таблица 5. – Рекомендуемые классы бетона по прочности на сжатие для планируемого срока службы 50 лет ($СК = 18\%$; $pH = 11,3$)

Категория по условиям эксплуатации	Условия эксплуатации	Толщина защитного слоя, мм	Рекомендуемый класс бетона по прочности на сжатие		
			СТБ EN 206-1-2009	СНБ 5.03.01-02	авторский
XC1	ОПЗ О	10	$C^{20/25}$	$C^{12/15}$	$C^{30/37}$
		15			$C^{25/30}$
		20			$C^{18/22,5}$
		25			$C^{16/20}$
XC2	А О	10	$C^{25/30}$	$C^{16/20}$	$\gg C^{30/37}$
		15			$\gg C^{30/37}$
		20			$C^{30/37}$
		25			$C^{20/25}$
XC3	ОПЗ У	10	$C^{30/37}$	$C^{20/25}$	$\gg C^{30/37}$
		15			$\gg C^{30/37}$
		20			$> C^{30/37}$
		25			$C^{22/27,5}$
XC4	А У	10	$C^{30/37}$	$C^{25/30}$	$\gg C^{30/37}$
		15			$\gg C^{30/37}$
		20			$> C^{30/37}$
		25			$C^{25/30}$
XC5	СХ У	10	–	–	$\gg C^{30/37}$
		15			$\gg C^{30/37}$
		20			$\gg C^{30/37}$
		25			$C^{28/35}$

Примечание. XC5 – рекомендуемая автором категория по условиям эксплуатации; СХ, ОПЗ, А – условия, соответственно, сельскохозяйственных зданий; общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой; открытой атмосферы; О, У – области, соответственно, обычной и ускоренной карбонизации.

Таблица 6. – Рекомендуемые классы бетона по прочности на сжатие для планируемого срока службы 50 лет ($СК = 36\%$; $pH = 10,3$)

Категория по условиям эксплуатации	Условия эксплуатации	Толщина защитного слоя, мм	Рекомендуемый класс бетона по прочности на сжатие		
			СТБ EN 206-1-2009	СНБ 5.03.01-02	авторский
XC1	ОПЗ О	10	$C^{20/25}$	$C^{12/15}$	$C^{16/20}$
		15			$C^{12/15}$
		20			$C^{12/15}$
		25			$C^{12/15}$
XC2	А О	10	$C^{25/30}$	$C^{16/20}$	$C^{25/30}$
		15			$C^{16/20}$
		20			$C^{12/15}$
		25			$C^{12/15}$
XC3	ОПЗ У	10	$C^{30/37}$	$C^{20/25}$	$C^{28/35}$
		15			$C^{18/22,5}$
		20			$C^{12/15}$
		25			$C^{12/15}$

Окончание таблицы 6

Категория по условиям эксплуатации	Условия эксплуатации	Толщина защитного слоя, мм	Рекомендуемый класс бетона по прочности на сжатие		
			СТБ EN 206-1-2009	СНБ 5.03.01-02	авторский
XC4	А У	10	C ³⁰ / ₃₇	C ²⁵ / ₃₀	C ³⁰ / ₃₇
		15			C ¹⁸ / _{22,5}
		20			C ¹⁶ / ₂₀
		25			C ¹² / ₁₅
XC5	СХ У	10	–	–	> C ³⁰ / ₃₇
		15			C ²² / _{27,5}
		20			C ¹⁶ / ₂₀
		25			C ¹² / ₁₅

Таблица 7. – Рекомендуемые классы бетона по прочности на сжатие для планируемого срока службы 50 лет (СК = 74%; рН = 9,00)

Категория по условиям эксплуатации	Условия эксплуатации	Толщина защитного слоя, мм	Рекомендуемый класс бетона по прочности на сжатие		
			СТБ EN 206-1-2009	СНБ 5.03.01-02	авторский
XC1	ОПЗ О	10	C ²⁰ / ₂₅	C ¹² / ₁₅	C ¹² / ₁₅
		15			C ¹² / ₁₅
		20			C ¹² / ₁₅
		25			C ¹² / ₁₅
XC2	А О	10	C ²⁵ / ₃₀	C ¹⁶ / ₂₀	C ¹² / ₁₅
		15			C ¹² / ₁₅
		20			C ¹² / ₁₅
		25			C ¹² / ₁₅
XC3	ОПЗ У	10	C ³⁰ / ₃₇	C ²⁰ / ₂₅	C ¹⁶ / ₂₀
		15			C ¹² / ₁₅
		20			C ¹² / ₁₅
		25			C ¹² / ₁₅
XC4	А У	10	C ³⁰ / ₃₇	C ²⁵ / ₃₀	C ¹⁶ / ₂₀
		15			C ¹² / ₁₅
		20			C ¹² / ₁₅
		25			C ¹² / ₁₅
XC5	СХ У	10	–	–	C ¹⁶ / ₂₀
		15			C ¹² / ₁₅
		20			C ¹² / ₁₅
		25			C ¹² / ₁₅

Оценка степени карбонизации бетона, основанная на использовании ФФТ, в Республике Беларусь осуществляется на основании СТБ 1481. В нем степень карбонизации бетона характеризуется содержанием химически связанного цементным камнем диоксида углерода (CO₂) в виде карбоната кальция, т.е. его количеством. Это не только не логично, но и просто непонятно, поскольку степень любого параметра должна определять отношение величин, но никак не количество. Заявлено определение степени карбонизации, значит, не только целесообразно, но и необходимо определять карбонатную составляющую (показатель КС, %), т.е. количество образовавшегося карбоната кальция (CaCO₃). Именно его образование вызывает структурные изменения бетона, приводя к его деградации. В результате химического анализа 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, необходима разработка национального нормативного документа по определению карбонизации бетона с использованием результатов исследований изменения по сечению бетонов предложенных параметров: карбонатной составляющей и степени карбонизации.

Заключение. Выполненные исследования позволили обосновать необходимость:

- исследований 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 рН- и карбометрии;
- создания на основе результатов реальных исследований параметров карбонизации и ее влияния на изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре нормативного документа Республики Беларусь по оценке степени карбонизации бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.

2. Бабицкий, В.В. Прогнозирование глубины карбонизации бетона железобетонных мостовых конструкций / В.В. Бабицкий, М. Годшани // Стр. наука и техника. – 2011. – № 3 (36). – С. 54–58.
3. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян ; под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. – 4-е изд. – М. : Стройиздат, 1986. – 408 с.
4. Бородай, Д.И. Прогноз сроков карбонизации бетона защитного слоя железобетонных элементов автодорожных мостов / Д.И. Бородай, А.А. Матюнин // Вестн. Донбас. нац. акад. стр-ва и архитектуры. – 2009. – Вып. 1 (75). – С. 147–151.
5. Васильев, А.А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций / А.А. Васильев ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
6. Васильев, А.А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) / А.А. Васильев ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 303 с.
7. Васильев, А. А. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона / А. А. Васильев ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2016. – 263 с.
8. Васильев, А.А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона / А.А. Васильев ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.
9. Васильев, А.А. Исследование кинетики и механизма карбонизации поровой влаги бетона в реальных условиях / А.А. Васильев // Стр. наука и техника. – 2007. – № 6. – С. 39–44.
10. Васильев, А.А. Исследование коэффициента диффузии углекислого газа воздуха в карбонизированном бетоне / А.А. Васильев // Вестн. Белорус. гос. ун-та трансп. – 2008. – № 2 (17). – С. 73–75.
11. Васильев, А.А. Оценка существующей модели карбонизации бетона / А.А. Васильев // Стр. наука и техника. – 2009. – № 1 (22). – С. 54–58.
12. Васильев, А.А. Модель карбонизации бетона в атмосферных условиях / А.А. Васильев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – № 12. – С. 69–82.
13. Васильев, А.А. Исследование характера изменения щелочности поровой жидкости по сечению бетона / А.А. Васильев, Д.Н. Шевченко // Стр. наука и техника. – 2012. – № 1 (40). – С. 10–13.
14. Васильев, А.А. Оценка применимости бетонов в железобетонных элементах и контрукциях для различных эксплуатационных условий / А.А. Васильев // Вестн. Белорус. гос. ун-та трансп. – 2017. – № 2 (35). – С. 133–135.
15. Васильев, А.А. К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода. / А.А. Васильев // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 77–80. Textbook on behavior, design and performance, Structural Concrete: December 2009, – Bulletin 53. – Second edition. – fid. 3. – 2010. – Vol. 3. – 381 p.
16. Васильев, А.И. О выборе толщины защитного слоя бетона мостовых конструкций / А.И. Васильев, А.С. Бейвель, А.М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 2001. – № 5. – С. 25–27.
17. Карапетов, Э.С. Прогноз срока службы железобетонных мостов на основе модели процесса карбонизации защитного слоя / Э.С. Карапетов, Д.А. Шестовицкий // Современ. технологии – транспорту : Изв. Петербург. ун-та транспорта. – 2016. – № 1. – С. 14–24.
18. Кудрявцев, И.А. Исследование карбонизации железобетонных конструкций с длительным сроком эксплуатации / И.А. Кудрявцев, В.П. Богданов // Материалы, технологии, инструменты. – 2000. – Т. 5, № 3. – С. 97–100.
19. 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.
20. Леонович, С.Н. Теоретические основы расчета, долговечности железобетона при карбонизации // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь : материалы VI Междунар. науч.-техн. семинара. – Минск : Технопринт, 2000. – С. 225–237.
21. Розенталь, Н.К. Карбонизация бетона в условиях тропического климата / Н.К. Розенталь, Х. Суаснабар // Бетон и железобетон. – 1986. – № 7. – С. 11–13.
22. Степанова, В.Ф. Разработка модели расчета коррозионной стойкости бетона при воздействии агрессивной углекислоты воздуха / В.Ф. Степанова, Г.В. Чернышук // Долговечность и защита от коррозии. Строительство, реконструкция (теория, исследования, практика, ресурсосбережение и экология, оценка качества, сертификация) : материалы Междунар. конф. – М., 1999. – С. 75–80.
23. Чернякевич, О.Ю. Расчет срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации / О.Ю. Чернякевич, С.Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров : материалы XVII Междунар. науч.-метод. семинара, Гродно, 27–28 мая 2010 г. – С. 369–375.
24. DuraCrete 7: General guidelines for durability design and redesign. The European Union – Brite EuRam III, Project No. BE95-1347, Probabilistic Performance-based Durability Design of Concrete Structures, Report No. T7-01-1. – 1999. – P. 250.
25. Czarnecki, L. Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space? / L. Czarnecki, P. Woyciechowski // Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences. – 2015. – Vol. 63, No 1. – P. 43–54.
26. Do Lago Helene, P.R. A novel method to predict concrete carbonation / P.R. Do Lago Helene, P. Castro-Borges // Investigación y Desarrollo. Concreto y cemento. – Diciembre 2009. – Vol. 1, Núm. 1. – P. 25–35.
27. Ishida, T. Modeling of Carbonation based on Thermo-Hygro Physics with Strong Coupling of Mass Transport and Equilibrium in Micropore Structure of Concrete / Tetsuya Ishida, Chun He Li // Journal of Japan Society of Civil Engineers. – July 2008. – No. 14. – P. 590–591.
28. Jaekiewicz-Rek W. Carbonation rate of airentrai-ned fly ash concretes / W. Jaekiewicz-Rek, P. Woyciechowski // Cement-Lime-Concrete. – 2011. – XVI/XXVIII (5). – P. 249–256.
29. Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of con-crete / J. Kim [et al] // Cem. Concr. Compos. – 2009. – P. 139–144.

30. Prediction model for carbonation of concrete structure considering heat and moisture transfer / Y. Kishitani [et al] // J. Structural and Construction Engineering–Trans, AIJ 595. – 2005. – P. 17–22.
31. Te Liang, M. Mathematical modeling and prediction method of concrete carbonation and its applications / M. Te Liang, W. Jun Qu, Ch.-H. Liang // J. Marine Science and Technology. – 2002. – 10 (2). – P. 128–135.
32. Masuda, Y. Mathematical model on process of carbonation of concrete / Y. Masuda, H. Tanano // Concrete Research and Technology. – 1991. – 2 (1). – P. 125–134.
33. Papadakis, V. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation / V. Papadakis, C. Vayenas, M. Fardis // ACI Materials Journal. – 1991. – Vol. 4, No 88. – P. 363–373.
34. Saeki, T. Mechanism of carbonation and prediction of carbonation process of concrete / T. Saeki, H. Ohga, S. Nagataki // Concrete Library International: JSCE. – 1991. – No 17. – P. 23–36.
35. Saetta, A.V. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials / A.V. Saetta, B.A. Schrefler, R.V. Vitaliani // Cem. Concr. Res. – 1993. – № 23 (4). – P. 761–772.
36. Uomoto, T. Factors affecting concrete carbonation ratio / T. Uomoto, Y. Takada // Concrete library International, JSCE. – 2011. – P. 31–44.
37. Yoda, A. Carbonation depth of concrete using different types of cement / A. Yoda, T. Yokomuro // Proceedings of the Japan Concrete Institute. – 1987. – No 9 (1). – P. 327–332.
38. Ying-yu, L. The Mechanism of Carbonation of Mortars and the Dependence of Carbonation on Pore Structure / L. Ying-yu, W. Quidong // Concrete Durability-Katharine and Bryant Mather International Conference. – Detroit : American Concrete Institute, 1987. – Vol. 2. – P. 1915–1943.
39. Yoon, I. Prediction of Carbonation Depth of Concrete Structures Considering Atmospheric Change / I. Yoon, C. Lee, J. Seol // CONSEC'04 : Proceedings of the 4th International Conference on Concrete Under Severe Conditions. – Seoul, 2004. – P. 189–204.
40. Wang, X. A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash / X. Wang, H. Lee // Constr. Build. Mater. – 2009. – P. 725–733.

Поступила 23.02.2021

ASSESSMENT OF CARBONIZATION AND DEVELOPMENT OF ITS PARAMETERS DURING TIME CROSSED CONCRETE FOR DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

A. VASILIEV

Analysis of assessment and forecasting of concrete carbonation development based on existing methods has been performed and the need to develop new ones has been shown. New indicators of concrete carbonization (cement-sand fraction) and a modern method of their determination were proposed, allowing objective assessment of concrete carbonization parameters. Calculated-experimental dependencies of prediction of change in time by cross section of concretes of different classes on strength-strength for compression of carbonate component and degree of concrete carbonation are obtained. Boundary conditions are proposed for assessment of concrete carbonation and its effect on state of concrete protective properties in relation to steel reinforcement. The results obtained by the author were compared with existing ones in terms of recommended classes of concretes in terms of compressive strength for various operating conditions.

Keywords: concrete, reinforced concrete elements, reinforced concrete structures, carbonization, boundary conditions, protective properties of concrete, compressive strength.