

Масуд ГОЛШАНИ,
аспирант кафедры
"Технология бетона
и строительные материалы"
Белорусского национального
технического университета

Михаил Сергеевич БИБИК,
кандидат технических наук,
директор ОАО "Завод СЖБ № 1"

Вячеслав Вацлавович БАБИЦКИЙ,
доктор технических наук,
профессор кафедры
"Технология бетона
и строительные материалы"
Белорусского национального
технического университета

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ БЕТОНА НА ГЛУБИНУ ЕГО КАРБОНИЗАЦИИ

INFLUENCE OF THE STRUCTURAL FEATURES OF CONCRETE ON THE CARBONATION DEPTH

Предложены аналитические зависимости для прогнозирования глубины карбонизации бетона, основанные на его структурных особенностях. Разработана упрощенная методика оценки глубины карбонизации бетона.

Analytical relationships based on the concrete structural features have been proposed for prediction of the concrete carbonation depth. A simplified technique of estimating the concrete carbonation depth has been developed.

ВВЕДЕНИЕ

В составе бетонной смеси самый дорогостоящий компонент — цемент. Этим и обусловлено желание предприятий, производящих вяжущее, заменять часть клинкерного фонда разнообразными тонкомолотыми минеральными составляющими, а технологов-бетонщиков — иногда обоснованно, а, зачастую, и необоснованно — сокращать расход цемента. При этом часто игнорируется тот факт, что расход цемента, как основной фактор, позволяющий снижать водоцементное отношение, должен определяться не только прочностными характеристиками бетона, но и долговечностью бетона и железобетона. Вместе с тем, для железобетона вследствие его низкой ремонтпригодности каждый 1 рубль, сэкономленный при изготовлении конструкции, оборачивается 100 рублями затрат на ремонт конструкции, в основном из-за коррозии арматуры и отслоения защитного слоя [1]. То есть экономим сейчас, а теряем потом.

Например, в США в 1990 г. признано, что 42 % от 578 000 государственных автомобильных мостов имеют коррозионные дефекты. Стоимость восстановления составляет 78 млрд долл. США, а ежегодные потери от создания пробок, перерасхода топлива, выплаты компенсаций — 50 млрд долл. США. В России 100 % обследованных мостов нуждаются в ремонте [2]. Отмечено [3], что агрессивному воздействию подвергаются от 15 % до 75 % строительных конструкций различных отраслей народного хозяйства, и при этом 70 %–80 % сооружений в России требуют капитального ремонта [4]. Не лучше обстоят дела и в Республике Беларусь, а также в Республике Иран, гражданин которой является одним из соавторов настоящей работы.

Одной из причин отмеченной низкой долговечности железобетона является карбонизация защитного слоя бетона с последующей коррозией стальной арматуры. При этом определяющим фактором, влияющим на коррозионную стойкость железобетона, должна быть не прочность бетона на сжатие (на что нацеливают некоторые литературные источники), а его структурные особенности.

УЧЕТ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ БЕТОНА ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Среди важнейших направлений научных исследований выделяется "...разработка расчетных методов прогноза долговечности подземных и наземных железобетонных конструкций, работающих при воздействии жидких и газо-воздушных агрессивных сред..." [3], при этом "...необходим новый подход к определению сроков службы, основанный на теории физико-химических процессов коррозии, их классификации с привлечением математического моделирования и созданием компьютеризованной методологии прогноза..." [5].

Для математического описания длительности так называемого инкубационного периода предложены аналитические зависимости [6–8], учитывающие эффективные коэффициенты диффузии (ЭКД) агрессивных веществ (и, в частности, углекислого газа) в защитном слое бетона, которые по причине масштабов их применения и общей признанности можно назвать классическими. В соответствии с ними знание ЭКД углекислого газа и особенностей эксплуатационной среды позволяет рассчитывать глубину карбонизации бетона (x , см) и, следовательно, долговечность железобетонной конструкции (из условия, что к данному сроку эксплуатации глубина карбонизации не превышает толщину защитного слоя бетона) по формуле

$$x = \sqrt{\frac{2c \cdot \tau \cdot D_{\text{CO}_2}}{m_0 \cdot \frac{\zeta}{300}}}, \quad (1)$$

где c — концентрация углекислого газа, доли ед.;
 τ — продолжительность воздействия газа на бетон, с;

D_{CO_2} — ЭКД углекислого газа в бетоне, см²/с;

m_0 — реакционная емкость бетона, см³;

ζ — расход цемента в 1 м³ бетона, кг.

В выражении (1) параметры внешней среды учитываются концентрацией углекислого газа в эксплуатационной среде. Вместе с тем, отсутствуют такие факторы,

как ее температура и влажность. Что же касается самого бетона, то его особенности определяются только величиной ЭКД газа. Поскольку методика расчета отсутствует, то фактически ЭКД необходимо определять экспериментально. Вместе с тем, возможность прогнозирования степени гидратации цемента [9] открывает и соответствующую возможность прогнозирования глубины карбонизации бетона [10].

Ранее одним из авторов данной статьи на основании известной зависимости Д. А. Франка-Каменецкого было получено уравнение для расчета ЭКД углекислого газа D_{CO_2} , связывающее диффузионные характеристики бетона с общепринятыми структурными:

$$D_{CO_2} = \frac{D_0}{1,45 \cdot \left(\frac{1}{\Pi_k} + 3\Pi_k \right)^{2,3} \cdot \sqrt[3]{V_k^2}}, \quad (2)$$

где D_0 — коэффициент диффузии газа в газе;
 V_k — объем цементного камня в бетоне, доли ед.;
 Π_k — капиллярная пористость бетона, доли ед.

Проведенные по описанной ниже методике эксперименты дали возможность уточнить и упростить это выражение. Вначале определяли глубину карбонизации цементного камня различной плотности, изготовленного на чистоклинкерном цементе с добавлением тонкомолотых минеральных добавок. Затем прокарибонизированный слой удаляли и посредством прокаливания измельченной навески в муфельной печи устанавливали количество химически связанной воды и степень гидратации цемента. После чего по величине степени гидратации цемента и начальному водоцементному отношению цементного теста рассчитывали капиллярную пористость цементного камня. В результате получена формула для расчета ЭКД углекислого газа

$$D_{CO_2} = k_u \cdot \Pi_k \cdot \sqrt[3]{V_k^2}. \quad (3)$$

Величина k_u в формуле (3) изменялась в пределах 0,05–0,07.

Рассмотрим также вопрос, касающийся реакционной емкости бетона (m_0). Следует отметить, что в соответствии с [8] при расходе цемента 300 кг/м³ она равна 43,2 см³, то есть 1,0 см³ бетона связывает 43,2 см³ углекислого газа. Однако знание степени гидратации цемента позволяет рассмотреть вопрос с иной стороны, перейдя от реакционной емкости бетона к реакционной емкости продуктов гидратации цемента (m_r), что, по мнению авторов, более объективно описывает процесс карбонизации бетона.

Масса цемента, вступившего в гидратационные процессы, а, следовательно, и масса продуктов гидратации цемента Π_r , кг, составляет:

$$\Pi_r = \alpha \cdot \Pi \cdot (1 - \eta), \quad (4)$$

где α — степень гидратации цемента, доли ед.;
 Π — расход цемента в 1,0 м³ бетона, кг;
 η — содержание инертных минеральных добавок в цементе, доли ед.

Далее, произведя элементарные вычисления, легко прийти к формуле для расчета реакционной емкости

продуктов гидратации m_r , см³, приходящихся на 1,0 см³ бетона:

$$m_r = 0,205 \alpha \cdot \Pi \cdot (1 - \eta). \quad (5)$$

Тогда выражение (1) может быть записано следующим образом:

$$x = k_t \cdot k_w \cdot \sqrt{\frac{2c \cdot \tau \cdot D_{CO_2}}{0,205 \alpha \cdot \Pi \cdot (1 - \eta)}}. \quad (6)$$

В формуле (6) коэффициент k_t учитывает влияние температуры эксплуатационной среды [8], а k_w — влияние влажности и отражает общеизвестную экстремальную зависимость интенсивности процессов карбонизации от относительной влажности воздуха (максимум приходится на диапазон 40 %–70 %). Формула (6) выгодно отличается от первоосновы (1) тем, что в ней структурные характеристики не статичны, а динамично изменяются во времени в зависимости от степени гидратации цемента. В соответствии с расчетной моделью весь предстоящий период эксплуатации железобетонной конструкции разбивается на равные промежутки времени, для каждого этапа прогнозируется степень гидратации цемента, а по ней: капиллярная пористость бетона, масса прогидратировавшего цемента, реакционная емкость продуктов гидратации цемента, ЭКД углекислого газа и, в конечном итоге, глубина карбонизации бетона защитного слоя. Именно такая модель прогнозирования заложена в программный продукт, описанный в [10], достаточно убедительно, по мнению авторов, показавший свою работоспособность.

Проверим точность выражения (6), сопоставив рассчитываемые величины глубины карбонизации с приведенными в [8]. Для составов бетонной смеси марки П1 (таблица 1), были изготовлены образцы и испытаны в различных организациях (таблица 2). Полученные результаты значений глубины карбонизации бетона приведены в таблице 3. В таблице 4 сопоставляются относительные величины (глубина карбонизации бетона при водоцементном отношении 0,50 принята равной 1,00). Проанализировав данные таблиц 3 и 4, можно констатировать, что расчетные величины в целом соответствуют

Таблица 1. Составы бетона на портландцементе Ново-Здолбуновского завода марки П1

В/Ц	Расход, кг/м ³			
	Цемент	Песок	Щебень	Вода
0,40	477	730	1030	191
0,45	410	740	1050	186
0,50	372	775	1065	186
0,55	344	820	1075	189
0,60	320	830	1035	192

Таблица 2

Источник испытания и расчетов
I. Испытания в НИИЖБе при относительной влажности воздуха 75 %
II. Испытания в Харьковском ПромстройНИИПроекте в тех же условиях
III. Расчет по формуле Кишитани $x = \sqrt{32 \cdot (В/Ц - 12,2)}$
IV. Расчет по данным Л. А. Вандаловской

фактическим данным, причем не своим, а полученным другими исследователями.

**МЕТОДИКА
УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ
ГЛУБИНЫ КАРБОНИЗАЦИИ
БЕТОНА**

Рассмотрим также вопрос экспериментальной оценки склонности бетона к карбонизации. В основе системы прогнозирования лежит величина эффективного коэффициента диффузии углекислого газа в бетоне, который при существующей базе знаний в области бетоноведения можно прогнозировать, но зачастую надо уметь и экспериментально определять, например, при применении новых химических и минеральных добавок. При этом соответствующие методики, включая и установки, должны быть не уникальными, доступными лишь крупным научным организациям, а достаточно простыми, в том числе и для предприятий, работающих в области строительства.

Для исследования карбонизации бетона авторами [8] разработана специальная упрощенная установка, представленная на рис. 1. Баллон с углекислым газом 1, снабженный редуктором (вентилем) 2 и манометром, через систему газопроводов 3 связан с камерой 4. В камере, снабженной для поддержания однородности газо-воздушной среды вентилятором 5, установлен стеллаж 6, под которым находится ванна с насыщенным раствором поваренной соли 7 для обеспечения постоянной относительной влажности в камере. На стеллаже равномерно расставляются образцы 8, выполненные из цементно-песчаного раствора или бетона. Концентрация газа в камере контролируется посредством химического газоанализатора 9.

Принцип работы установки следующий. С помощью редуктора углекислый газ подается в камеру, где периодически контролируется, и вручную доводится до рабочей концентрации, равной 10 %. В этой среде бетонные (или растворные) образцы выдерживаются в течение 14 суток, после чего раскалываются в направлении движения фронта карбонизации. Затем, нанося на свежий скол образца спиртовой раствор фенолфталеина, определяют глубину прокарбонизированного слоя бетона.

Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне рассчитывается по формуле

$$D_{CO_2} = \frac{m_0 \cdot x^2}{2c \cdot \tau} \quad (7)$$

Точность определения глубины карбонизации бетона напрямую зависит от концентрации углекислого газа в камере, контроль которой, особенно в ночное время (из-за значительного потребления CO₂), затруднен. В связи с этим, впоследствии описанная установка с ручным управлением была трансформирована в авто-

Таблица 3. Глубина карбонизации бетона

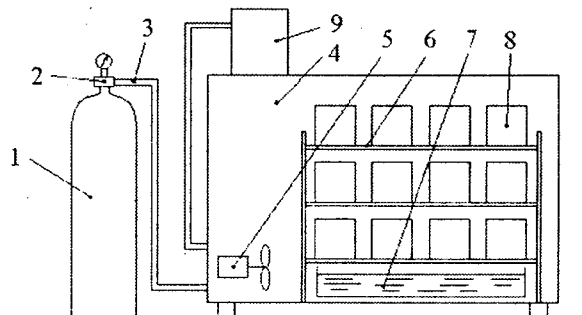
Источник данных	Глубина карбонизации бетона, мм, при В/Ц				
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
I	17,0	19,0	28,0	33,5	38,0
II	8,0	8,8	12,0	14,2	19,2
III	7,5	14,7	19,3	23,2	26,4
IV	15,7	26,0	33,2	38,0	54,0
Пределы изменения	7,5–17,0	8,8–26,0	12,0–33,2	14,2–38,0	19,2–54,0
По расчету авторов	8,4	10,1	13,6	16,8	20,1

Таблица 4. Относительная глубина карбонизации бетона

Источник данных	Относительная глубина карбонизации бетона при В/Ц			
	0,40	0,45	0,55	0,60
НИИЖБ (1 вариант)	0,61	0,68	1,20	1,36
НИИЖБ (2 вариант)	0,65	0,73	1,20	1,37
Харьковский ПромстройНИИПроект	0,67	0,71	1,18	1,60
НИИЖБ (3 вариант)	0,65	0,83	—	1,39
НИИЖБ (4 вариант)	0,33	0,94	1,12	1,25
Расчет по формуле Кишитани	0,54	0,77	1,25	1,46
Расчет по формуле $x_{отн} = 4,6 В/Ц - 1,3$	0,39	0,76	1,20	1,37
По данным Майера	0,72	—	—	1,34
По данным Ниши	0,49	—	—	1,42
По данным Л. А. Вандаловской	0,47	0,79	1,15	1,63
Пределы изменения	0,33–0,72	0,68–0,94	1,12–1,25	1,25–1,63
По расчету авторов	0,53	0,74	1,19	1,5

матическую [8], поддерживающую 10 %-ную концентрацию углекислого газа в камере с помощью электромагнитного клапана, установленного на газопроводе, и снабженную автоматическим газоанализатором с побудителем расхода газа. Объем же углекислого газа, пошедшего на химическую реакцию взаимодействия с гидроксидом кальция (что необходимо для точного расчета глубины карбонизации бетона), определяется с помощью газомера.

Недостатком автоматизированной установки является достаточно сложное техническое исполнение. Естественно, применение углекислого газа концентрацией 100 % существенно упростило бы конструкцию установки. Необходимость применения концентрации



1 — баллон с углекислым газом; 2 — редуктор (вентиль); 3 — система газопроводов; 4 — камера; 5 — вентилятор; 6 — стеллаж; 7 — ванна с насыщенным раствором поваренной соли; 8 — цементно-песчаные образцы; 9 — химический газоанализатор

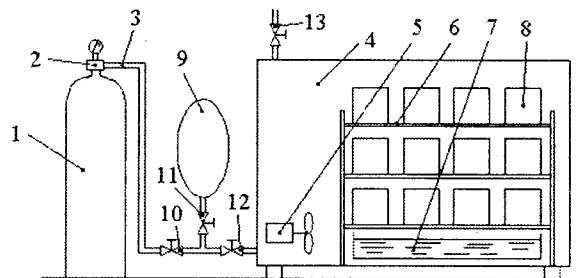
Рис. 1. Установка с ручным управлением для испытаний бетона в среде углекислого газа [8]

именно 10 % в [8] обусловлена желанием выделить только диффузионный механизм торможения процесса карбонизации и отсечь вязкое течение газа, для чего дано соответствующее обоснование. Однако авторы данной работы, несмотря на выдвинутые теоретические препоны, попытались максимально упростить лабораторную методику определения карбонизируемости бетона при сохранении достаточной точности.

Для решения поставленной задачи использованы следующие особенности установки. Во-первых, в установке создается газовая среда со 100 %-ным содержанием CO_2 , что в свою очередь исключает необходимость автоматизированного измерения и регулирования концентрации газа. Во-вторых, в качестве накопителя углекислого газа используется шар из латекса, который снабжает испытательную камеру углекислым газом, расходуемым в процессе карбонизации бетона. Это позволяет отказаться от автоматических устройств подачи газа и регистрации объема его потребления.

Установка (рис. 2) содержит все основные составляющие установки, предложенной в [8] (соответствующие обозначения элементов установки на рис. 1 и 2 аналогичны). Важной особенностью является наличие промежуточной емкости, выполненной в виде шара из латекса 9, врезанного в газопровод. Исследуемые образцы помещают в камеру на стеллажи. Кранами 10 и 12 при перекрытом кране 11 источник газа напрямую подключают к камере и открывают вентиль 2. Углекислый газ поступает в камеру и, как более плотный, вытесняет воздух через открытый кран выпуска 13. После появления CO_2 в соответствующем патрубке, свидетельствующем о заполнении всего объема камеры, перекрывают кран выпуска 13, а с помощью крана 11 к источнику газа подключают накопительный шар из латекса 9. После наполнения шара 9 газом до необходимого размера вентилем 2 подачу газа отключают и перекрывают кран 10. Диаметр шара 9 измеряют в отмеченном месте на его образующей, затем шар подключают к камере. В процессе карбонизации образцов углекислый газ расходуется на реакцию, а накопительный шар 9 непрерывно восполняет его недостаток в камере. Количество газа, пошедшего на химическую реакцию, определяют по изменению диаметра шара 9. Конечно, можно было бы применить вместо эластичной накопительной емкости жесткую емкость. Однако в этом случае необходимо было бы создавать существенное избыточное давление для компенсации расхода газа, идущего на процессы карбонизации, что неизбежно приводило бы к искажению получаемых результатов. Применение же эластичной емкости сводит колебания давления к минимуму и повышает точность определений. По мере расходования газа накопительный шар 9 периодически вручную подпитывается порциями CO_2 .

Использование углекислого газа большей концентрации ускоряет процессы карбонизации бетона, и это позволяет сократить срок выдержки образцов в камере до 10 суток. В остальном предлагаемая методика не отличается от классической.



1–8 — то же, что на рис. 1; 9 — шар из латекса; 10, 11, 12 — краны; 13 — кран выпуска

Рис. 2. Предлагаемая установка с ручным управлением для испытаний бетона в среде углекислого газа

Для оценки предложенной методики карбонизируемости бетона были проведены сопоставительные опыты. Образцы цементного камня (по мнению авторов, цементный камень в отличие от бетона позволяет точнее и информативнее сопоставить результаты) изготавливали в виде кубов с размером ребра 70 мм. Для опытов использовали цемент ОАО "Красносельскстройматериалы" марки М500 с нормальной плотностью 26 %. Водоцементное отношение варьировали в пределах от 0,25 до 0,40, что охватывало весь диапазон структурной связности цементного теста. Образцы твердели 28 суток в нормально-влажностных условиях, а затем выдерживались в эксикаторах с относительной влажностью воздуха 70 % до стабилизации массы. Далее часть образцов подвергали в течение 14 суток воздействию газовой среды с 10 %-ной концентрацией, а часть — 10 суток в среде со 100 %-ной концентрацией углекислого газа. Глубину карбонизации цементного камня определяли по толщине неокрашенного слоя после нанесения на свежий, увлажненный водой, скол цементного камня 0,1 % спиртового раствора фенолфталеина (таблица 5). Затем по формуле (7) рассчитывали эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в цементном камне. При этом реакционную емкость цементного камня корректировали с учетом отношения реального расхода цемента к 300.

Нетрудно убедиться, согласно таблице 5, что наблюдается устойчивая связь результатов, полученных по различным методикам. Это подтверждает, что предлагаемая методика, преимуществом которой является простота использования, позволяет получать вполне достоверные данные по глубине карбонизации. Кроме того, использование в полезной модели 100 % среды CO_2 значительно ускоряет процессы карбонизации в сравнении с прототипом, что позволяет получить результаты в более короткие сроки.

Таблица 5. Глубина карбонизации цементного камня в зависимости от водоцементного отношения (В/Ц) и концентрации углекислого газа

В/Ц	Глубина карбонизации цементного камня, мм		Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в цементном камне (D_{CO_2}), $\text{см}^2/\text{с}$	
	Классическая методика	Предлагаемая методика	Классическая методика	Предлагаемая методика
0,25	1,4	3,9	$2,02 \cdot 10^{-05}$	$2,19 \cdot 10^{-05}$
0,30	2,7	7,2	$6,89 \cdot 10^{-05}$	$6,86 \cdot 10^{-05}$
0,35	4,1	12,1	$1,47 \cdot 10^{-04}$	$1,79 \cdot 10^{-04}$
0,40	7,0	18,5	$3,98 \cdot 10^{-04}$	$3,89 \cdot 10^{-04}$

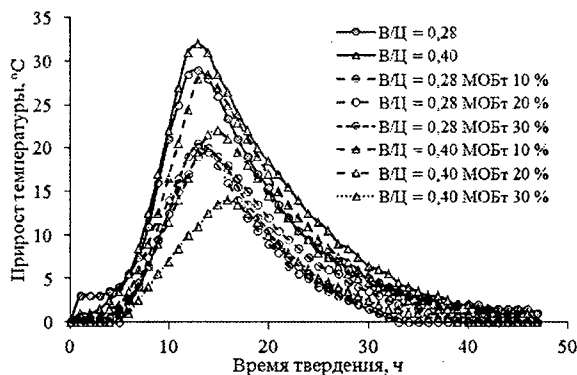


Рис. 3. Кинетика изменения температуры цементного теста

В ОАО "Завод СЖБ № 1" разрабатывается технология вторичного использования отходов железобетонных конструкций, в частности, применения измельченной до тонкости помола около 300 м²/кг растворной части для частичной замены цемента. Исследования бетона с этой минеральной добавкой по прочности на сжатие и морозостойкости показали реальность такого направления сбережения ресурсов в технологии бетонных и железобетонных конструкций.

В связи с этим, были проведены предварительные эксперименты в соответствии с предложенной методикой по выявлению влияния тонкомолотых отходов (МОБт) на карбонизацию бетона. Как оказалось, введение добавки МОБт в количестве 10 % от массы цемента практически не сказывается на интенсивности карбонизации. При введении 20 % МОБт глубина карбонизации увеличивается примерно в 1,1 раза, а 30 % в 1,4 раза.

Ранее авторами статьи описывалась установка, разработанная в ОАО "Завод СЖБ № 1", для калориметри-

ческого исследования цемента, в том числе с химическими добавками [11]. В связи с изложенным, уместно предположить существование связи результатов калориметрических исследований твердеющего цементного теста с возможной глубиной карбонизации цементного камня и бетона.

Представленные на рис. 3 графики отражают влияние добавки МОБт на прирост температуры твердеющего цементного теста. Можно отчетливо наблюдать, что с увеличением содержания минеральной добавки последовательно снижается интенсивность тепловыделения. Это в целом соответствует изменению глубины карбонизации цементного камня, и открывает возможность введения в формулу (4) поправочного коэффициента, учитывающего активность применяемой минеральной добавки, то есть способности ее связываться с продуктами гидратации цемента. В настоящее время проводятся углубленные исследования возможности разработки комплексной методики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена система формул для расчета глубины карбонизации бетона в связи с его структурными особенностями.
2. Разработана упрощенная методика, включая установку для исследования карбонизации цементного камня и бетона.
3. Показана возможность применения тонкомолотых отходов бетонных и железобетонных конструкций для замены части цемента без существенного увеличения глубины карбонизации бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, А. И. Прогноз коррозии арматуры железобетонных мостовых конструкций при карбонизации защитного слоя / А. И. Васильев // Бетон и железобетон. — 2001. — № 3. — С. 16–20.
2. Васильев, А. И. Прогноз коррозии арматуры железобетонных конструкций автодорожных мостов в условиях хлоридной агрессии и карбонизации / А. И. Васильев, А. М. Подвальный // Бетон и железобетон. — 2002. — № 6. — С. 27–32.
3. Степанова, В. Ф. Проблемы долговечности бетонных и железобетонных конструкций в современном строительстве. Долговечность и защита от коррозии. Строительство, реконструкция (теория, исследования, практика, ресурсосбережение и экология, оценка качества, сертификация): матер. Междунар. конф. 25–27 мая 1999 г. — М., 1999. — С. 32–37.
4. Гусев, Б. В. Проблема сохранности основных фондов страны. Долговечность и защита от коррозии. Строительство, реконструкция (теория, исследования, практика, ресурсосбережение и экология, оценка качества, сертификация): матер. Междунар. конф. 25–27 мая 1999 г. — М., 1999. — С. 23–25.
5. Иванов, Ф. М. Оценка агрессивности среды и прогнозирование долговечности подземных конструкций / Ф. М. Иванов, Н. К. Розенталь // Бетон и железобетон. — 1990. — № 3. — С. 7–9.
6. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузев; под общ. ред. В. М. Москвина. — М.: Стройиздат, 1980. — 536 с.
7. Алексеев, С. Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шиссл. — М.: Стройиздат, 1990. — 320 с.
8. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной производственной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. — М.: Стройиздат, 1976. — 205 с.
9. Бабицкий, В. В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В. В. Бабицкий // Материалы, технологии, инструменты. — 2005. — № 1. — С. 76–79.
10. Голшани, М. Прогнозирование глубины карбонизации бетона железобетонных мостовых конструкций / М. Голшани, В. В. Бабицкий, О. М. Вайтович // Строительная наука и техника. — 2011. — № 3(36). — С. 13–16.
11. Бибик, М. С. Оценка кинетики твердения цементного камня с использованием термодатчиков системы "Термохрон" / М. С. Бибик, В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. — 2010. — № 4(31). — С. 23–26.

Статья поступила в редакцию 14.11.2011.