

## ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА И ГЛУБИНА ЕГО КАРБОНИЗАЦИИ

Бабицкий В.В., д-р техн. наук, професор (БНТУ)

**Аннотация.** Приведены результаты компьютерного моделирования процесса карбонизации бетона различного состава с варьированием активности цемента, содержания минеральных добавок в нем, однородности бетона и его отпускной прочности. Показана недостаточная связь класса бетона по прочности бетона на сжатие и глубины его карбонизации.

Если взять основные нормативные документы, например [1, 2], то нетрудно заметить одну основную особенность – условия эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций увязываются с классом бетона по прочности на сжатие. Несомненно, с точки зрения проектировщика это очень удобно. Но надежна ли эта связь и насколько эффективен такой подход с технико-экономических соображений, поскольку свойства бетона должны соответствовать требуемой длительности эксплуатации.

Попытаемся на примере моделирования процессов формирования прочности бетона на сжатие (в последующем просто прочность) и глубины его карбонизации выявить их соответствие.

Ранее такую попытку осуществили Н.К. Розенталь, С.Н. Алексеев [3]. Взяв за основу общеизвестное уравнение Б.Г. Скрамтаева, связывающее прочность бетона в проектном возрасте ( $R_{28}$  в МПа) со свойствами заполнителя (коэффициент  $A$ ), активностью цемента ( $R_{ц}$  в МПа) и водоцементным отношением  $\left(\frac{B}{Ц}\right)$ , и уравнение К. Кишитани, в соответствии с которым глубина карбонизации ( $x$ ) определяется водоцементным отношением и временем эксплуатации ( $t$  в годах), ими было получено обобщающее уравнение:

$$x = k \cdot \sqrt{t} \sqrt{\frac{0,639AR_{ц}}{R_{28} + 0,5AR_{ц}}} - 0245, \text{ см.} \quad (1)$$

С его использованием произведены расчеты глубины карбонизации за 50 лет бетона из жесткой бетонной смеси на щебне и кварцевом песке при  $k = 1$  и  $A = 0,55$  [3].

Как оказалось, глубина карбонизации бетона обратно пропорционально зависит от его прочности, при этом зависимость близка к линейной, но только при использовании цемента одной и той же активности. Увеличение активности цемента приводит к соответствующему уменьшению расхода цемента и повышению водоцементного отношения (в пределах одной и той же прочности), а, следовательно, к увеличению пористости, проницаемости и, в конечном итоге, повышению глубины карбонизации бетона. Так, для бетона прочностью 20 МПа при использовании цемента активностью 30 МПа глубина

карбонизации через 50 лет эксплуатации составит 2,5 см, а активностью 60 МПа – 4,1 см.

В дальнейшем Н.К. Розенталь, С.Н. Алексеев [3] провели эксперименты на бетонах различного состава (с использованием разнообразных цементов), хранившихся после пропарки в сухом помещении в течение 3 лет. Результаты более 540 определений прочности образцов и соответствующей глубины карбонизации представлены в виде области (обработано автором данной статьи) на рис. 1. На область распределения результатов нанесены полученные линейная и параболическая уравнения регрессии, а также соответствующие коэффициенты корреляции.

Анализ полученных данных дал основание авторам сделать следующий вывод: «Методом корреляционного анализа установлено, что у бетонов, изготовленных из бетонной смеси равной подвижности при различных В/Ц и расходе цемента, между прочностью на сжатие  $R_{сж}$  и глубиной карбонизации  $x$  существует взаимосвязь. Коэффициенты корреляции этих параметров для испытанных групп образцов находятся в пределах от 0,37 до 0,96. У бетонов, изготовленных из смесей различной подвижности с разным расходом воды, такая взаимосвязь отсутствует» [3].

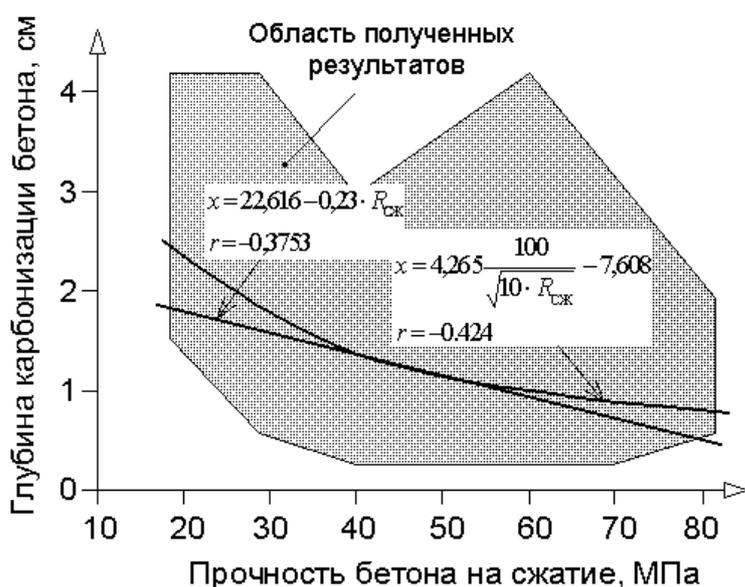


Рисунок 1 – Зависимость глубины карбонизации бетона от его прочности

Из этого следует, что, в принципе, определенная связь может быть, хотя и при некоторых ограничениях состава бетона. В целом же (с учетом всех влияющих технологических факторов), величина корреляции крайне низка для утверждения о надежной связи прочностных характеристик бетона и глубины его карбонизации.

Рассмотрим возможность связи не прочности, а класса бетона по прочности на сжатие и его долговечности, характеризуемой глубиной карбонизации. Будем полагать, что долговечность железобетонной конструкции определяется длительностью так называемого индукционного (инкубационного) периода, то есть временем утраты бетоном защитных свойств по отношению к стальной арматуре [4]. В случае карбонизации бетона это время достижения фронта нейтрализованного бетона поверхности арматуры и ее последующей активации.

Наука о бетоне к настоящему времени накопила достаточно достоверных формул, позволяющих рассчитывать составы бетона с учетом множества влияющих факторов, прогнозировать структурные особенности бетона, а также

процессы его карбонизации. Воспользуемся ими для компьютерного моделирования кинетики нейтрализации бетона углекислым газом воздуха.

Возьмем класс среды по условиям эксплуатации ХС1 (сухая или постоянно влажная) для элементов конструкций внутри помещений с низкой влажностью. Расчеты привяжем, например, к бетону класса С 20/25. Толщину защитного слоя бетона примем равной 25 мм, концентрацию углекислого газа 0,03 % по объему, относительную влажность воздуха 50...60 % (наиболее оптимальную для развития процессов карбонизации) и температуру 15 °С.

Итак, инженер-проектировщик, основываясь на условиях эксплуатации, назначил данный класс. Теперь инженер-технолог должен создать бетон, по прочностным характеристикам отвечающий данному классу, для чего он обладает достаточно широкими возможностями варьирования состава, обеспечивающего получение заданного класса.

Примем диапазоны основных влияющих факторов, которые могут иметь место на предприятиях по производству сборных железобетонных конструкций: цементы марок 400...600; содержание минеральных добавок в цементе 0...20 %; марки бетонной смеси по удобоукладываемости П1...П3; коэффициент вариации прочности бетона 6...16 %, а отпускная прочность бетона 70...100 % от проектной. Предположим, свойства заполнителей во всех составах идентичны: щебень гранитный крупностью 20 мм, песок кварцевый с модулем крупности 2,2. Заполнители чистые, мытые.

Таким образом, с использованием вычислительного комплекса «Технолог» подобраны 972 состава бетона, причем все они обеспечивают получение класса С 20/25. В соответствии с расчетами расход цемента может изменяться в пределах от 250 до 650 кг м<sup>3</sup>, а водоцементное отношение – от 0,41 до 0,72. Объем цементного теста (камня) изменяется в пределах от 0,250 до 0,450 м<sup>3</sup>, капиллярная пористость – от 6,8 до 13 %. Расчетная марка бетона по морозостойкости изменяется от F50 до F500, а по водонепроницаемости – от W2 до W12.

Следует обратить внимание на то, что химические добавки в расчетах не применялись, в противном случае диапазон получаемых результатов еще более увеличился бы.

Для расчета длительности инкубационного периода (периода пассивного состояния стальной арматуры) российские ученые [5-7] предложили аналитическую зависимость, учитывающую эффективный коэффициент диффузии (ЭКД) углекислого газа в защитном слое бетона, и которую по причине масштабов ее применения и общей признанности можно назвать классической:

$$x_k = \sqrt{\frac{2c\tau D}{m_0 \frac{\rho}{300}}}, \text{ см}, \quad (2)$$

где  $c$  – концентрация углекислого газа в воздухе, доли единицы по объему;

$\tau$  – длительность эксплуатации конструкции, с;

$D$  – эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне, см<sup>2</sup>/с;

- $m_0$  – реакционная емкость бетона при расходе цемента 300 кг/м<sup>3</sup> (может быть принята равной 42 см<sup>3</sup> углекислого газа);  
 $\Pi$  – расход цемента в 1 м<sup>3</sup> бетона, кг.

Для практической реализации формулы (2) предварительно необходимо экспериментальное определение ЭКД углекислого газа. Кроме того, требует уточнения расчет реакционной емкости бетона.

Предложено [8] ЭКД углекислого газа рассчитывать по формуле

$$D = \frac{k_{\Pi} \cdot \Pi_{\kappa}^2}{\sqrt[3]{V_{\kappa}^2}}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (3)$$

- где  $k_{\Pi}$  – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на диффузионную проницаемость бетона (для портландцемента может быть принят равным 0,025 см<sup>2</sup>/с);  
 $\Pi_{\kappa}$  – капиллярная пористость бетона, д. ед.;  
 $V_{\kappa}$  – объем цементного камня в 1 м<sup>3</sup> бетона, д. ед.

А реакционная емкость бетона может быть рассчитана по выражению

$$m_0 = k_{\Pi m_0} \alpha \Pi (1 - \eta), \text{ см}^3, \quad (4)$$

- где  $k_{\Pi m_0}$  – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на реакционную емкость бетона (для портландцемента может быть принят равным 0,205 см<sup>3</sup>/кг);  
 $\alpha$  – степень гидратации цемента, д. ед.;  
 $\eta$  – содержание инертных минеральных добавок в вяжущем, д. ед.

Степень гидратации цемента определяется множеством факторов, но ограничимся водоцементным отношением и активностью цемента.

Как уже отмечалось выше, проведены расчеты структурных особенностей бетонов различного состава, а уже по ним с использованием приведенных формул (3) и (4) устанавливались эффективный коэффициент диффузии углекислого газа (рис. 2) и реакционная емкость бетона (рис. 3).

Итоговое же уравнение для прогнозирования глубины карбонизации с учетом особенностей температурно-влажностного режима эксплуатации (учитываются коэффициентами  $k_t$  и  $k_{\omega}$ ) выглядит так:

$$x = k_t k_{\omega} \sqrt{\frac{2c\tau \frac{k_{\Pi} \cdot \Pi_{\kappa}^2}{\sqrt[3]{V_{\kappa}^2}}}{0,205\alpha\Pi \cdot (1 - \eta)}}, \text{ см}. \quad (5)$$

ЭКД углекислого газа изменяется в достаточно широких пределах (почти на порядок). Это, а также непостоянство реакционной емкости дали изменчивость долговечности в пределах от 13 до 114 лет.

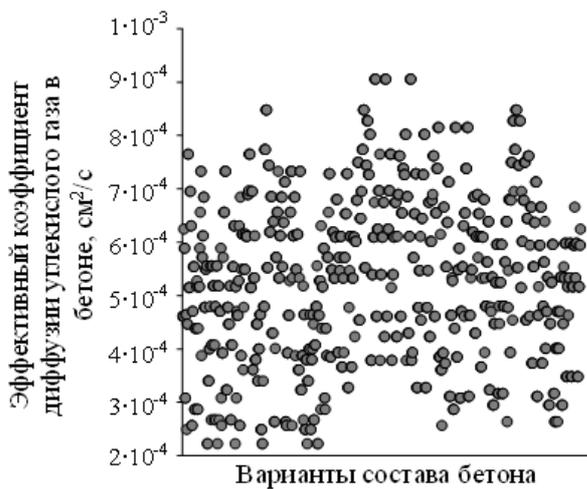


Рисунок 2 – Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетонах различного состава

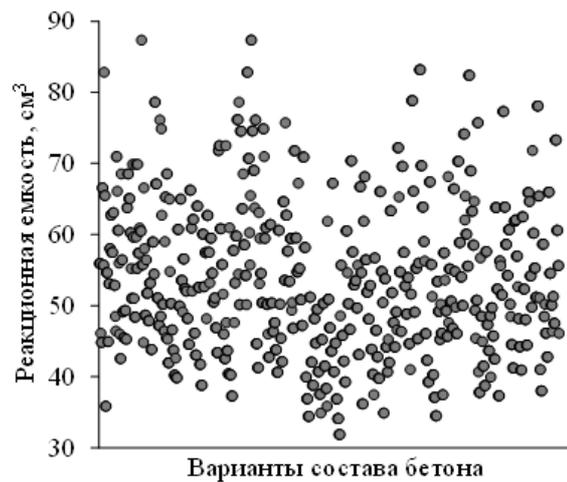


Рисунок 3 – Реакционная емкость бетона

Распределение долговечности по годам представлено на рис. 4.

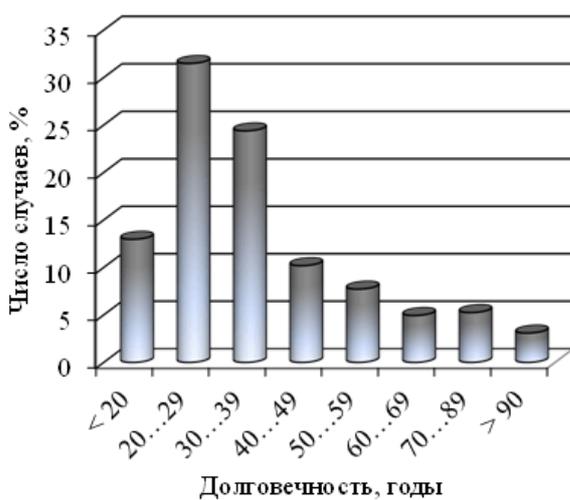


Рисунок 4 – Время карбонизации защитного слоя бетона

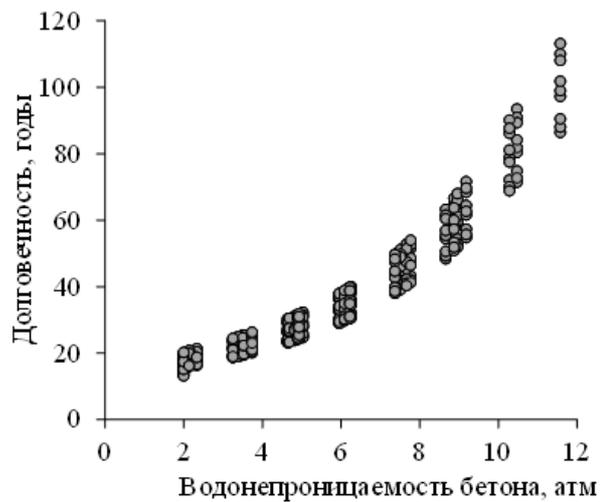


Рисунок 5 – Взаимосвязь водонепроницаемости бетона и времени карбонизации защитного слоя

Получаем, что время эксплуатации бетона класса С20/25 может изменяться в достаточно широких пределах. И это вызывает сомнение в обоснованности практикуемого назначения долговечности железобетона, основываясь на классах бетона по прочности на сжатие. Долговечность определяется не прочностью материала, в частности бетона, а его структурными особенностями, в первую очередь плотностью и проницаемостью.

В связи с изложенным хотелось бы привести цитату из книги известного ученого в области долговечности бетона Н.А. Мощанского: «Развитие выше положения о роли минералогического состава, времени и температурно-влажностных условий в формировании прочности бетонов приводят нас к выводу, что плотность и прочность бетонов не связаны между собой какой-

*либо тесной функциональной зависимостью, хотя и определяются во многом сходными факторами» [9].*

Тогда встает вполне закономерный вопрос – к каким параметрам бетона следует привязываться для обеспечения требуемой долговечности бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в определенных условиях. Попробуем найти связь долговечности и, например, такого общеизвестного регламентируемого показателя, как водонепроницаемость бетона (рис. 5). Нетрудно установить тенденцию роста долговечности со снижением проницаемости. Конечно, необходимо совершенствование расчетов, в частности, водонепроницаемости, но факт имеет место.

**Выводы.** 1. Компьютерное моделирование формирования структуры бетона одного и того же класса (на примере С20/25) и прогнозирование долговечности бетона, определяемой временем карбонизации защитного слоя, показало сомнительность назначения класса бетона по прочности на сжатие в зависимости от условий эксплуатации. 2. Структурные особенности бетона, например, характеризующиеся водонепроницаемостью, могут быть основанием для назначения параметров бетона, эксплуатирующегося в средах с агрессивным воздействием углекислого газа.

**Литература.** 1. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01–02. – Введ. 01.07.2003. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2003. – 144 с. 2. Бетоны конструкционные тяжелые : СТБ 1544-2005. – Введ. 01.01.2010. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2006. – 25 с. 3. Н.К. Розенталь, С.Н. Алексеев. О взаимосвязи защитных свойств и прочности бетона. Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред. Под ред. В.М. Москвина и Ю.А. Саввиной. М.: Стройиздат, 1975. 236 с. с. 92-104. 4. С.Н. Алексеев. Коррозия арматуры и повышение защитного действия бетона. // Бетон и железобетон.–1986.–№ 7.– С. 3-4. 5. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с. 6. Москвин В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев. 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. Шисль. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с. 8. Бабицкий В.В., Семенюк С.Д. Элементы прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетона. Ресурсосберегающие материалы, конструкции, здания и сооружения / Сборник научных работ. Ровно. – 2014. – Выпуск № 28. – с. 112-120. 9. Н.А.Мощанский. Плотность и стойкость бетонов. Государственное издательство строительной литературы. М.: 1951. 176 с.