

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 691.32

В. В. БАБИЦКИЙ, доктор технических наук, доцент; Белорусский национальный университет транспорта, г. Минск; А. А. ВАСИЛЬЕВ, научный сотрудник; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА

Рассмотрена существующая модель карбонизации бетона, выполнена ее оценка. На основании результатов обследования многочисленных железобетонных конструкций по глубине предложена иная модель карбонизации, в соответствии с которой реакция нейтрализации бетона происходит в широком слое, степень карбонизации изменяется линейно от предельной в поверхностных слоях до минимальной в глубине конструкции, а коррозия стальной арматуры начинается значительно ранее. На основе аналитических расчетов и экспериментальных исследований предложена схема прогнозирования глубины карбонизации бетона. Для практической реализации предложенной сложной модели разработан расчетно-графический метод, основанный на полученной системе номограмм (связывающей класс бетона по прочности и структурные особенности бетона с его защитными свойствами по отношению к стальной арматуре), позволяющий прогнозировать карбонизацию бетона и состояние стальной арматуры как на стадии проектирования конструкций, так и в реально эксплуатируемых железобетонных конструкциях.

Выполнено сравнение расчетных значений с экспериментальными результатами обследования конструкций.

Агрессивность воздушной среды по отношению к железобетонным конструкциям обусловлена наличием в ее составе углекислого газа в количестве около 0,03 % по объему (а в помещениях сельскохозяйственного назначения – 0,2–0,3 %) [1]. Постепенное, длящееся годами и десятилетиями взаимодействие углекислого газа с продуктами гидратации цемента (в первую очередь, с гидроксидом кальция) приводит к карбонизации (нейтрализации) бетона, в результате чего снижается щелочность поровой жидкости бетона и происходит снижение защитных свойств бетона по отношению к арматуре. Такое взаимодействие сопровождается снижением показателя pH поровой влаги и изменением состава цементного камня за счет образования карбонатов, что ведет к возможности деградации бетона и окисления арматуры [2].

Таким образом, для обеспечения безаварийной службы железобетонных конструкций в течение всего проектного срока эксплуатации необходимо знание механизма коррозии, наличия системы уравнений, позволяющих обеспечивать правильное назначение толщины и плотности защитного слоя бетона применительно к конкретным эксплуатационным условиям.

Целью данной работы явилась разработка метода прогнозирования состояния железобетонных конструкций, основывающегося на связи структурных особенностей бетона, выраженных косвенно, через класс бетона по прочности на сжатие,

с его защитными свойствами по отношению к стальной арматуре.

Объектом исследования явились железобетонные конструкции различных типов, выполненные из тяжелого бетона. Метод исследования – экспериментальный, графо-аналитический.

В соответствии с современными представлениями [3] реакция карбонизации идет в достаточно тонком слое цементного камня (около 1 мм) единым фронтом (рисунок 1).

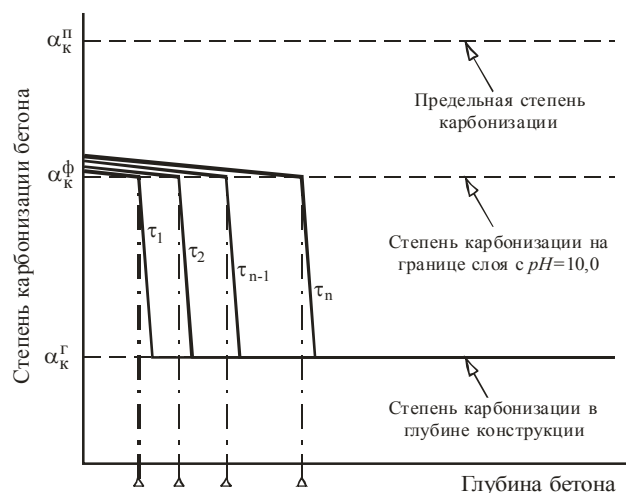


Рисунок 1 – Традиционная модель карбонизации бетона

В поверхностных слоях бетона степень карбонизации далека от полной, равной 1, хотя с течением времени и развивается. Такая схема под-

тверждена экспериментально, причем в лабораторных условиях [3]. Ускорение процесса достигнуто посредством воздействия углекислого газа концентрации 10 и 20 % при постоянной влажности, что абсолютно отличается от реальных условий эксплуатации конструкций. Толщина прокарбонизированного слоя оценивается пробой фенолфталеина (индикаторным методом). Такая методика очень проста, доступна лицам с низкой квалификацией, не требует специального оборудования и позволяет в кратчайшие сроки произвести обследование значительного числа конструкций. Резкое изменение окраски от малиновой до бесцветной (что удобно при визуальной оценке) происходит при переходе щелочности поровой жидкости бетона через границу $pH \approx 10$ [4]. Эта величина существенно меньше критической границы пассивно-активного состояния стали, а именно $pH = 11,8$ [5]. Кроме того, индикаторный метод не позволяет детально судить об изменении показателя pH поровой влаги цементного камня в нейтрализованной зоне и за ее пределами.

Однако полученные результаты обследования по глубине многочисленных железобетонных конструкций различных типов [6–10] кардинально отличаются от описанных, что отражено на схеме, представленной на рисунке 2.

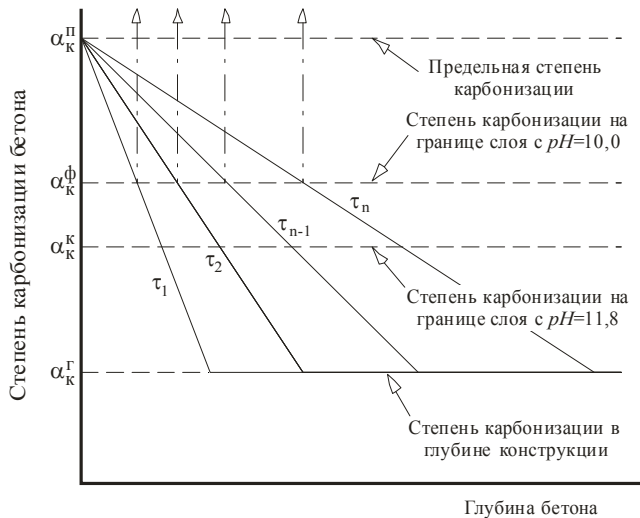


Рисунок 2 – Модель карбонизации бетона, основанная на экспериментальных результатах

В соответствии с ней уже в ранние сроки эксплуатации (соответствует нескольким годам) степень карбонизации бетона поверхностных слоев достигает предельного значения и изменяется до постоянного минимального значения в глубинных слоях. Распределение же значений pH по глубине бетона носит характер, обратный распределению карбонатной составляющей (КС).

Таким образом, отличная от традиционной, концепция предполагает, что реакция нейтрализации идет не в тонком, а в широком, размытом слое. В принципе, если оценивать кинетику про-

цесса, то в конечном итоге концепции не имеют явных противоречий: в обоих случаях происходит последовательное перемещение нейтрализованных слоев бетона (рисунок 3) с $pH = 10,0$ и $pH = 11,8$.

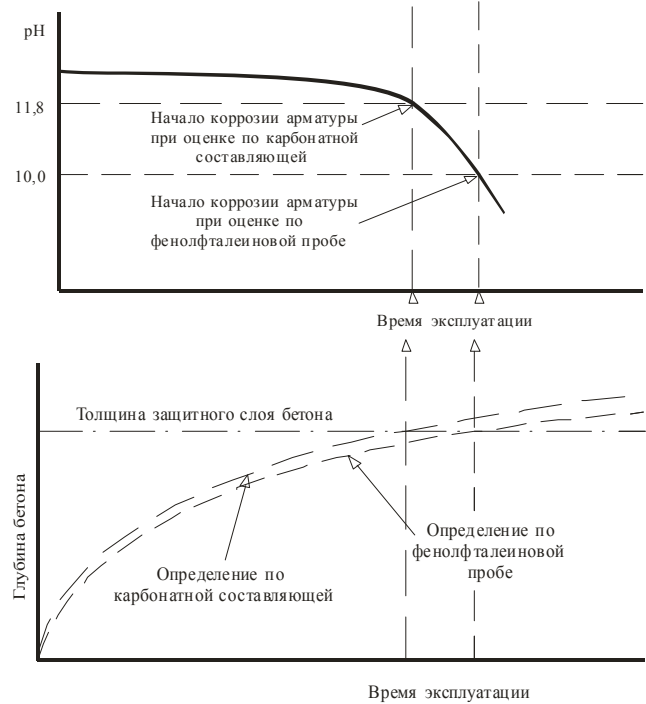


Рисунок 3 – Кинетика карбонизации бетона

Однако во втором случае начало коррозии стальной арматуры будет происходить раньше. Внешнее подобие процессов карбонизации позволяет адаптировать ранее разработанную систему прогнозирования процесса карбонизации бетона [3] и к варианту реакции в широком размытом слое.

Фактически модель процесса карбонизации можно представить в виде условного треугольника, один из катетов которого постоянен (предельная степень карбонизации) для всего периода эксплуатации конструкции, а второй (определяет общую глубину карбонизации бетона) постоянно возрастает (рисунок 4).

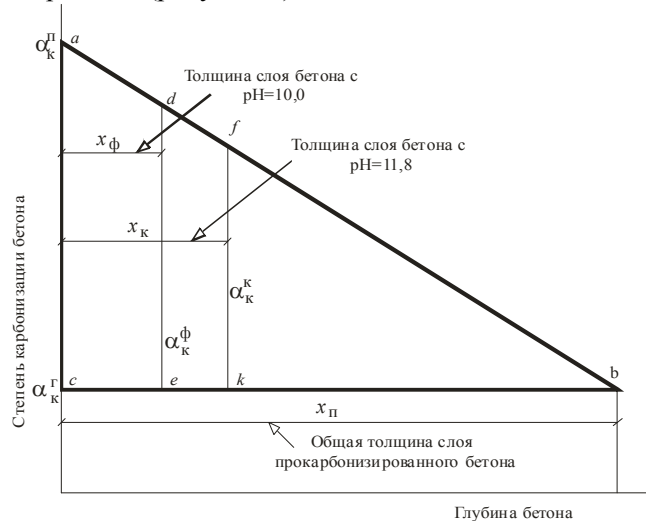


Рисунок 4 – Схема расчета глубины карбонизации бетона

Здесь $\alpha_K^П$ – степень карбонизации бетона в поверхностном слое конструкции; $\alpha_K^Ф$ – степень карбонизации бетона на внутренней границе слоя с $pH = 10,0$; α_K^K – степень карбонизации бетона на внутренней границе слоя с $pH = 11,8$; $\alpha_K^Г$ – степень карбонизации в глубине бетона; $x_П$ – общая толщина прокарбонизированного слоя бетона; $x_Ф$ – толщина прокарбонизированного слоя бетона, определенная индикаторным методом; x_K – толщина прокарбонизированного слоя бетона, определенная по количеству связанного углекислого газа.

Таким образом, для разработки схемы прогнозирования глубины карбонизации бетона необходимо знание опорных количественных значений: $\alpha_K^П, \alpha_K^Ф, \alpha_K^K, \alpha_K^Г$.

Известная система прогнозных расчетов [3] основывается на положении, согласно которому глубина карбонизации ($x_Ф$) пропорциональна корню квадратному из времени и может быть рассчитана по уравнению

$$x_Ф = \sqrt{\frac{2D'c_0}{m_0}} \tau, \quad (1)$$

где D' – эффективный коэффициент диффузии (ЭКД) углекислого газа; c_0 – концентрация углекислого газа во внешней среде; τ – время эксплуатации; m_0 – реакционная емкость бетона.

Для расчета ЭКД углекислого газа В.В. Бабицким [11] получено уравнение, связывающее диффузионные характеристики бетона с его капиллярной пористостью ($\Pi_K^б$):

$$D_{CO_2} = k_{ц} D_0 (\Pi_K^б - 0,03)^3, \quad (2)$$

Где $k_{ц}$ – коэффициент, определяющий влияние вида цемента (например, для портландцемента он равен 12, а для шлакопортландцемента – 20); D_0 – коэффициент диффузии углекислого газа в воздухе (составляет $1,65 \cdot 10^{-1} \text{ см}^2/\text{с}$).

Вторая важная характеристика бетона, определяющая глубину карбонизации, – реакционная емкость, численно равная объему углекислого газа V_{CO_2} , связанного единицей объема бетона $V_{\text{карб.бетона}}$:

$$m_0 = \frac{V_{CO_2}}{V_{\text{карб.бетона}}}. \quad (3)$$

В [12] получено, что величина m_0 определяется расходом цемента. Нами расчетная модель не-

сколько усложнена, в результате получено следующее уравнение:

$$m_0 = 0,294 \alpha \Pi \alpha_K. \quad (4)$$

В основу (4) положены допущения:

– карбонизируется не сам цемент, а лишь новообразования, количество которых определяется степенью гидратации цемента (α);

– реакционная емкость определяется и степенью карбонизации бетона – отношением массы новообразований, вступивших в реакцию, к общей массе продуктов гидратации цемента (α_K).

Такой подход к расчету учитывает все многообразие влияющих факторов, поскольку степень гидратации цемента определяется не только расходом цемента (Π), но и его видом, водоцементным отношением бетонной смеси, видом и количеством введенных химических добавок, временем и температурно-влажностными условиями твердения и эксплуатации конструкций [3].

Таким образом, уравнения (1), (2) и (4) позволяют рассчитать кинетику перемещения фронта слоя с границей, соответствующей $pH=10,0$.

В соответствии с выводами Н.К. Розенталя реакционная емкость бетона для указанных условий $m_0 = 43,2 \text{ см}^3$, что в соответствии с (4) дает $\alpha_K^Ф = 70 \%$. Но для реализации концепции реакции в широком слое этого недостаточно. Нам необходимо прогнозировать перемещение прокарбонизированного слоя с $pH=11,8$.

Воспользовавшись схемой, приведенной на рисунке 4, можно получить, исходя из подобия треугольников, соответствующее уравнение для определения толщины прокарбонизированного слоя бетона (x_K) по количеству связанного углекислого газа

$$x_K = \frac{\frac{\alpha_K^П - \alpha_K^Г}{\alpha_K^П - \alpha_K^Ф} (\alpha_K^Ф - \alpha_K^K) + \alpha_K^K - \alpha_K^Г}{\alpha_K^Ф - \alpha_K^Г} x_Ф. \quad (5)$$

Результаты обследования многочисленных железобетонных конструкций по глубине [8, 10] показывают, что pH поровой жидкости становится меньше критического значения, равного 11,8, при карбонатной составляющей 12–18 %, в среднем – 15 %. Это соответствует степени карбонизации около 55 % ($\alpha_K^K = 55 \%$).

Для прогнозных расчетов необходимо дополнительно знание степени карбонизации бетона в глубинных слоях конструкции, что не определяется особенностями эксплуатации, а зависит от исходных свойств компонентов бетонной смеси и карбонизации продуктов гидратации в процессе изготовления железобетона. В результате анализа многочислен-

ных данных по обследованию конструкций установлено, что карбонатная составляющая в глубинных слоях колеблется в пределах 2–4 % и в среднем может быть принята равной около 3 %. Тогда простым расчетом легко получить, что это соответствует степени карбонизации бетона около 10 % ($\alpha_K^r = 10\%$).

Таким образом, мы получили расчетные формулы и опорные количественные значения для расчета кинетики карбонизации в соответствии со схемой на рисунке 4:

$$\alpha_K^p = 100\%, \alpha_K^f = 70\% ;$$

$$\alpha_K^k = 55\%, \alpha_K^r = 10\% .$$

Полученные данные положены в разработанную систему прогнозирования состояния железобетонных конструкций, основывающуюся на связи структурных особенностей бетона, выраженных косвенно, через класс бетона по прочности на сжатие, с его защитными свойствами по отношению к стальной арматуре (рисунок 5).

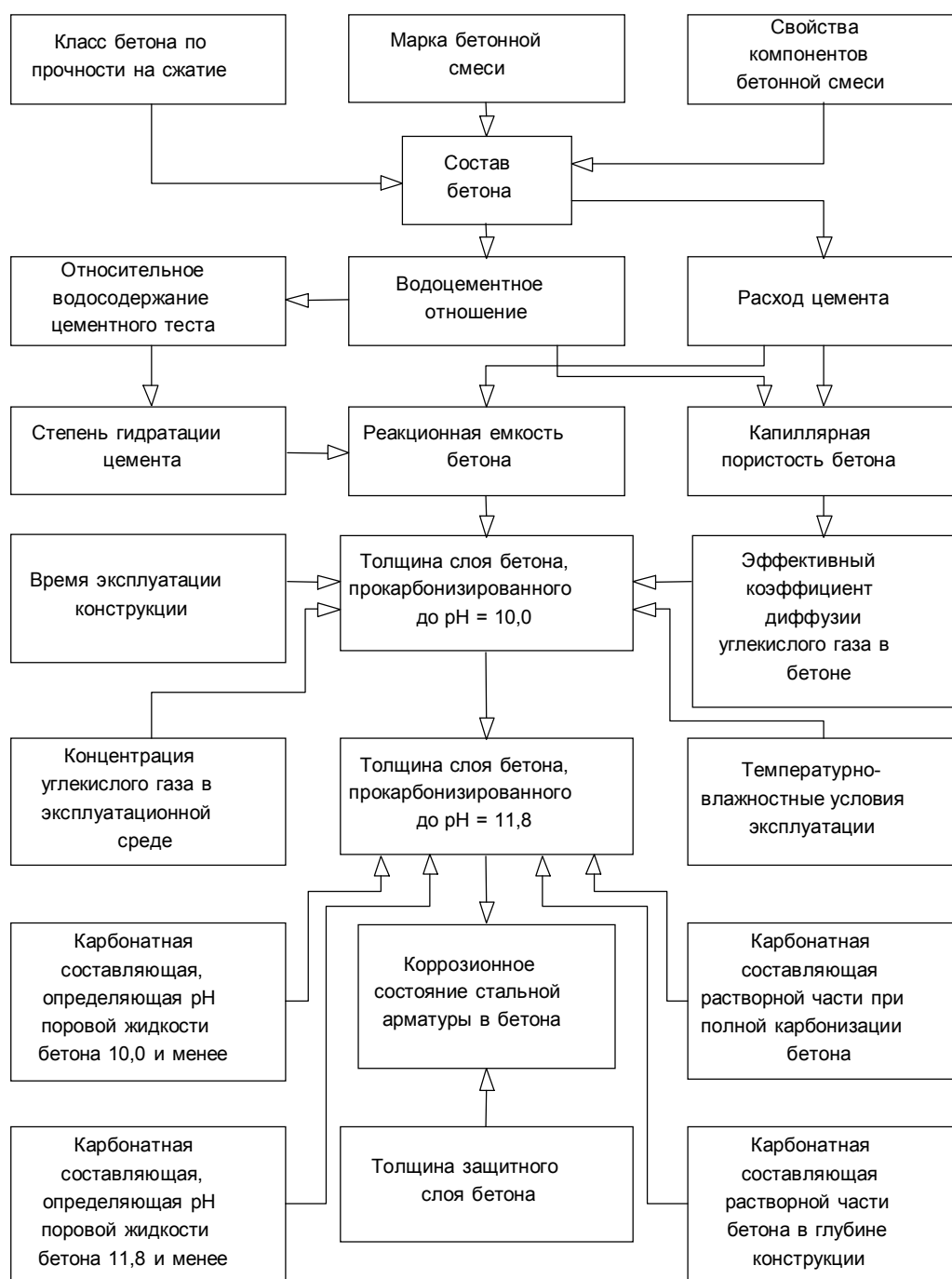


Рисунок 5 – Схема прогнозирования глубины карбонизации бетона

Для практической реализации предложенной достаточно сложной модели разработан расчетно-графический метод, основанный на разработке си-

стемы номограмм [13] (для расчетов водоцементного отношения бетонной смеси, расхода цемента, роста степени гидратации цемента, реакционной

емкости бетона, эффективного коэффициента диффузии углекислого газа, роста глубины карбонизации бетона, глубины карбонизации бетона и степени карбонизации бетона на заданной глубине, карбонатной составляющей от массы цемента, растворной части бетона), позволяющий оперативно назначать толщину защитного слоя бетона и его прочностные характеристики в связи с особенностями эксплуатационной среды на стадии проектирования конструкции. Данный метод можно использовать для оценки состояния уже эксплуатируемых конструкций. Исходя из прочностных характеристик бетона рассчитывается его ориентировочный состав, уточняется реакционная емкость и ЭКД углекислого газа. Затем определяется толщина прокарбонизированного слоя с $pH = 10$, а уже по ней – толщина слоя с $pH = 11,8$. Сопоставляя полученное значение с толщиной защитного слоя бетона, делают вывод о коррозионном состоянии стальной арматуры в данный момент времени.

Рассмотрим достоверность полученной модели. Для этого сопоставим рассчитываемые значения с результатами обследования состояния железобетонных конструкций. Произведем расчеты карбонатной составляющей для различных классов бетона применительно к толщине защитного слоя бетона 20 мм и наложим полученные результаты на данные обследования балок, колонн и плит [7, 9] (рисунок 6).

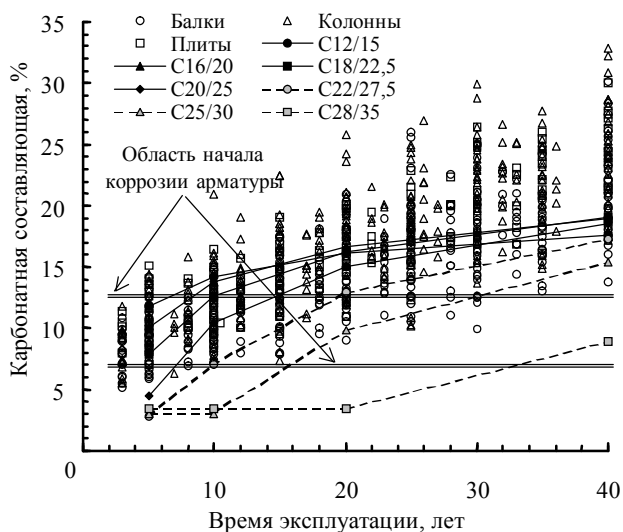


Рисунок 6 – Изменение карбонатной составляющей (КС) во времени (t): фактические результаты для балок, колонн, плит, рассчитанные для различных классов бетона по прочности

В соответствии с полученными результатами бетоны классов $C^{28}/_{35}$ и выше обеспечивают надежную защиту стальной арматуры от коррозии.

Сопоставим результаты, рассчитываемые по приведенной на рисунке 4 схеме расчета с данными С.Н. Алексеева и Н.К. Розенталя [3], приведенными на рисунках 7, 8.



Рисунок 7 – Зависимость глубины карбонизации бетона от его прочности на сжатие (по данным С.Н. Алексеева и Н.К. Розенталя)

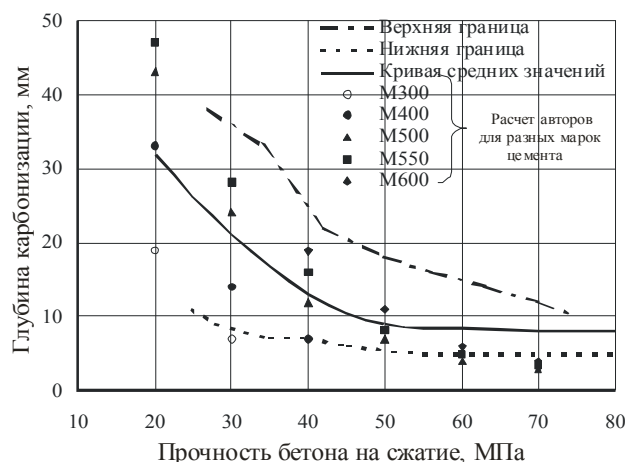


Рисунок 8 – Зависимость глубины карбонизации бетона от его прочности на сжатие по данным С.Н. Алексеева и Н.К. Розенталя (результаты обработки графика на рисунке 6)

Полученные результаты прогноза полностью соответствуют области экспериментальных значений, и это подтверждает достоверность предложенной системы расчетов.

Заключение. Рассмотрена существующая модель карбонизации бетона, выполнена ее оценка.

По результатам обследования железобетонных конструкций различных типов по глубине предложена новая модель карбонизации бетона.

На базе выполненных аналитических расчетов и экспериментальных исследований предложена расчетная схема глубины карбонизации бетона.

На основании полученной расчетной схемы разработан расчетно-графический метод, позволяющий прогнозировать карбонизацию бетона и состояние стальной арматуры как на стадии проектирования конструкций, так и в реально эксплуатируемых железобетонных конструкциях.

Выполненное сравнение расчетных значений с экспериментальными результатами обследования конструкций показало, что прогнозные результаты полностью соответствуют области экспериментальных значений.

Список литературы

- 1 Мелер, А. Постройки и оборудование для содержания крупного рогатого скота / А. Мелер, С. Хейниг; пер. с нем. Е.А. Девша, В.В. Афанасьева. – М.: Колос, 1974. – 560 с.
- 2 Долговечность железобетона в агрессивных средах // Совм. изд. СССР – ЧССР – ФРГ / С. Н. Алексеев [и др.] – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.
- 3 Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – М.: Стройиздат, 1978. – 205 с.
- 4 Кудрявцев, И.А. Исследование карбонизации железобетонной конструкции с длительным сроком эксплуатации / И. А. Кудрявцев, В. П. Богданов // Материалы, технологии, инструменты. – 2000. – Т. 5. № 3. – С. 97–100.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Васильев, А.А. Опыт использования рН- и карбометрии при определении состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы XI междунар. науч.-метод. межвуз. семинара – Брест, 2004. – Ч. I. – С. 228–232

- 8 Васильев, А.А. Об оценке карбонизации железобетонных конструкций по зависимости распределения карбонатной составляющей от глубины бетона / А.А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2005. – № 1. – С. 37–41.
- 9 Васильев, А.А. Опыт использования рН- и карбометрии для оценки состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А.А. Васильев // Научно-технические проблемы современного железобетона: материалы Всеукраинской науч.-техн. конф. – Сумы, 2005. – Т. 2. – С. 110–117.
- 10 Васильев, А.А. Оценка и прогнозирование состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций на основе методов рН- и карбометрии / А.А. Васильев, В.П. Богданов // Материалы, технологии, инструменты. – 2006. – Т.11, №1. – С. 110–116.
- 11 Бабицкий, В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: автореф. дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук: 05.23.05. / В.В. Бабицкий. – Минск, 2005. – 48 с.
- 12 Бабицкий, В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В.В. Бабицкий // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – №1. – С.76–79.
- 13 Хованский, Г.С. Основы номографии / Г.С. Хованский. – М.: Наука, 1976. – 352 с.

Получено 11.01.2006

V.V. Babitsky, A.A. Vasilyev. Grapho-analytical method of concrete carbonization forecasting.

The existing model of concrete carbonization was considered and evaluated. On the basis of examination of numerous ferro-concrete constructions along the depth we offer a different carbonization model according to which concrete neutralization reaction takes place in a wide layer, carbonization degree changes linearly from limited in the surface layer to minimal in the construction depth, and reinforcement corrosion begins much earlier. On the basis of analytical calculations and experimental investigations we offer the scheme of concrete carbonization depth forecasting. For practical realization of offered complicated model we developed computing graphic method based on obtained nomogram system (connecting concrete class according to its strength and its structural peculiarities and its protecting properties relatively to steel reinforcement) which allows to forecast concrete carbonization and steel reinforcement condition both on the construction design stage and in really exploited ferro-concrete constructions.

We also compared calculated value with experimental results of construction examinations.

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2006. № 1-2(12-13)

УДК 624.012.35

А. А. ВАСИЛЬЕВ, научный сотрудник; С. В. ДЗИРКО, младший научный сотрудник; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ рН- И КАРБОМЕТРИИ

Приведены результаты изучения коррозионного поведения основных типов железобетонных конструкций (ЖБК) в контакте с атмосферой для различных сроков и условий эксплуатации методами рН- и карбометрии. Определена степень коррозионного состояния арматуры в зависимости от физико-химических показателей бетона конструкций. Разработаны критерии оценки состояния ЖБК для различных атмосферных условий эксплуатации. Установлены зависимости между физико-химическими показателями бетона и параметром времени эксплуатации железобетонных конструкций. На основании установленных зависимостей получены аналитические выражения для прогнозирования изменения показателей рН (водородного показателя водной вытяжки цементного камня) и КС (карбонатной составляющей) во времени для различных условий эксплуатации. Разработана методика оценки и прогнозирования состояния бетонных и железобетонных конструкций на основе использования методов рН- и карбометрии, что является новым направлением в области неразрушающего контроля конструкций, выполненных из тяжелого бетона.

Железобетонные конструкции составляют основную долю конструкций капитальных зданий и сооружений, поэтому от их состояния зависят эксплуатационная надежность и дол-