

Масуд ГОЛШАНИ,
аспирант Белорусского национального
технического университета

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

Ольга Михайловна ВАЙТОВИЧ,
кандидат технических наук,
начальник мостового управления
ГП "БелдорНИИ"

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЛУБИНЫ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

PREDICTION OF CONCRETE CARBONATION DEPTH IN REINFORCED CONCRETE BRIDGE STRUCTURES

В статье приведена методика расчета глубины карбонизации бетона железобетонных мостовых конструкций. Представлен программный продукт для оценки коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций.

This article describes the procedure for calculation of the concrete carbonation depth in reinforced concrete bridge structures. The software product has been developed for determining the corrosion state of the steel reinforcement in reinforced concrete structures.

ВВЕДЕНИЕ

Коррозия стальной арматуры мостовых конструкций является основной причиной явно недостаточной долговечности железобетонных мостов. В серии работ, посвященных коррозионному состоянию железобетонных мостовых конструкций [1–5], показано, что основными причинами депассивации стальной арматуры с последующей ее коррозией является карбонизация бетона на всю толщину защитного слоя или накопление хлоридов в приарматурной зоне бетона сверх критической концентрации. И если накопление хлоридов в защитном слое бетона — несколько специфический процесс, требующий наличия (что не всегда имеет место) раствора солей-хлоридов на поверхности конструкций, то нейтрализация бетона защитного слоя — процесс неизбежный, обусловленный наличием в воздухе углекислого газа, а в поровой жидкости бетона — гидроокиси кальция. В связи с этим, в данной статье авторы уделяют особое внимание именно влиянию карбонизации бетона на коррозионное состояние стальной арматуры и возможности прогнозирования этого процесса.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Следует отметить обстоятельство подхода авторов работ [1–5] к оценке коррозионного процесса. Ими показана достаточно убедительная картина коррозии, заострена сама проблема, разработана система прогнозирования коррозии арматуры, базирующаяся на диффузионном характере переноса агрессивных ионов в теле бетона. Математический аппарат прогноза основывается на известных, подтвержденных практикой аналитических зависимостях.

Прогноз опирается на результаты, полученные в процессе обследования железобетонных конструкций на каком-то этапе эксплуатации автодорожных мостов: величины глубины карбонизации бетона, толщины защитного слоя бетона. А далее рекомендуется оценивать срок службы конструкции, рассматривая полученные данные как случайные факторы. Такая система прогноза весьма удобна, поскольку фактически учитывает уже реальные интегрированные эксплуатационные условия и косвенно —

структурные особенности бетона, оцениваемые диффузионными характеристиками для углекислого газа. Однако она нуждается в совершенствовании путем дополнения прогноза и на стадии изготовления конструкции.

Долговечность железобетона определяется как внешними (условия эксплуатации), так и внутренними (структура бетона) факторами. Закладывается она уже на стадиях проектирования состава бетона и реализации технологических приемов формования и твердения конструкции. Именно направленное структурообразование может и должно служить основой получения железобетонных конструкций заданной долговечности, а структурные особенности бетона — основой системы прогноза коррозионного состояния стальной арматуры.

Если реализовывать идею прогноза долговечности еще на стадии изготовления железобетонных конструкций, то необходимо получение соответствующих достоверных аналитических зависимостей для расчета на основе состава бетона не только морозостойкости и водонепроницаемости, но и предположительных диффузионных характеристик. Современные представления, развивающиеся в бетоноведении, позволяют это сделать. Но при этом нельзя ограничиваться традиционными влияющими факторами (основными из которых обычно являются водоцементное отношение и расход цемента), поскольку они постоянны и не изменяются во времени. Описать свойства бетона, изменяющиеся во времени, можно только с привлечением такого динамического параметра, как степень гидратации цемента. Именно степень гидратации вкпе с традиционными влияющими факторами определяет динамику изменения структуры цементного камня и бетона, а, следовательно, и их коррозионную стойкость.

Сама степень гидратации цемента находится в достаточно сложной, но поддающейся математическому описанию функциональной зависимости от множества факторов — свойств цемента, водосодержания цементного теста, вида и количества введенных химических добавок, условий и времени твердения и др. [6]. В свою очередь, знание степени гидратации цемента позволило получить аналитические зависимости для расчета эффективного коэффициента диффузии углекислого газа в бетоне [7].

Предлагается модель прогнозирования коррозионного состояния железобетона еще на стадии проектирования состава бетона (рис. 1), основывающаяся на классических представлениях деградации защитного слоя [8, 9]. Она базируется на концепции — долговечность железобетонных конструкций определяется продолжительностью пассивного состояния стальной арматуры. При активации стали и начале ее коррозии дальнейшая эксплуатация железобетона практически не поддается прогнозу и связана с определенным риском. Переход стальной арматуры из пассивного состояния в активное определяется временем достижения фронтом прокарбонизированного бетона поверхности арматуры (зависит от структурных особенностей бетона и эксплуатационных условий). Толщина защитного слоя бетона является решающим фактором, влияющим на продолжительность так называемого инкубационного периода коррозии.

ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ

Логическим завершением разработанной многофакторной математической модели прогнозирования коррозионного состояния железобетонных конструкций является создание инструмента для ее инженерной реализации. При ручном обчете многофакторных моделей (см. рис. 1) оперативный учет всех влияющих параметров весьма трудоемок, а зачастую и практически невозможен. Наиболее комфортные условия для расчетов предоставляет программный продукт (основные окна представлены на рис. 2). Он учитывает как внутренние влияющие факторы, определяемые структурными особенностями бетона (общая, гелевая и капиллярная пористость, эффективные коэффициенты диффузии углекислого газа, активирующих и ингибирующих коррозию стали ионов), так и внешние (температурно-влажностный режим и продолжительность эксплуатации, концентрация агрессивной среды).

После выбора компонентов бетонной смеси (см. рис. 2, этап I) реализуется многофакторное проектирование состава бетона (см. рис. 2, этап II) с учетом (кроме традиционных параметров) вида и количества



Рис. 1. Схема прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций

вводимых пластифицирующих добавок, добавок-ускорителей твердения и добавок, ингибирующих процесс коррозии стали. Затем переходят к реализации этапа III (см. рис. 2): вводят условия и длительность эксплуатации конструкций и в результате расчетов получают графики кинетики карбонизации бетона, накопления хлор-ионов

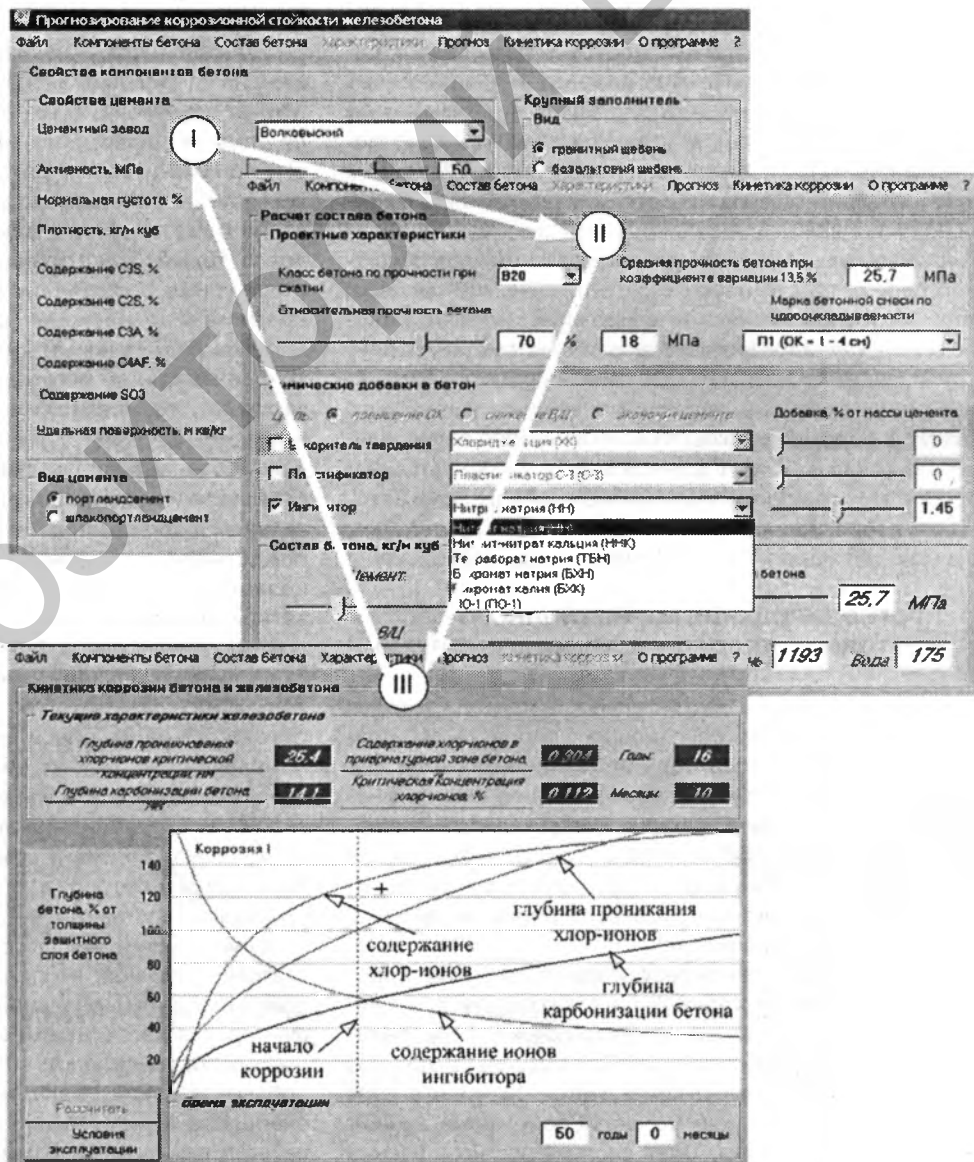


Рис. 2. Последовательность расчетов коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций

Таблица 1. Сравнительные величины глубины карбонизации бетона

Авторы	Расход цемента, кг	В/Ц	Глубина карбонизации бетона, мм	
			Фактическая	Расчетная
С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь (50 лет эксплуатации)	477	0,40	17,0	14,7
	410	0,45	19,0	20,1
	372	0,50	28,0	27,0
	344	0,55	33,5	33,2
	320	0,60	38,0	49,9
Л. А. Вандаловская, В. И. Бабушкин (1,5 года эксплуатации)	270	0,70	12,0	10,5
	300	0,60	10,0	7,5
	390	0,50	5,5	5,0
	516	0,40	2,0	2,6
	695	0,30	0,0	0,8
	386	0,55	6,5	6,5
	433	0,50	5,0	4,6
	492	0,45	4,5	3,4
	567	0,40	2,0	2,2
	665	0,35	0,0	1,3
	778	0,30	0,0	0,8

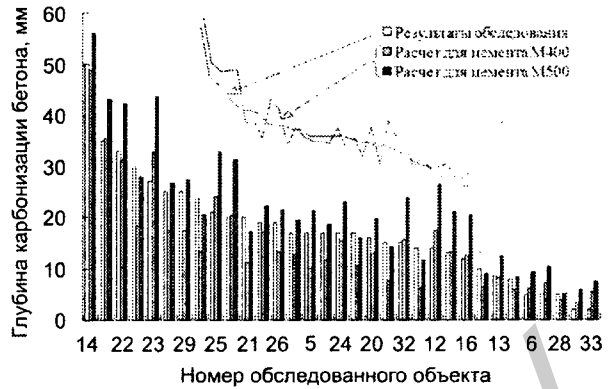


Рис. 3. Фактическая и расчетная глубина карбонизации бетона в железобетонных автодорожных мостах Республики Беларусь

в приарматурной зоне, а также изменения критической концентрации хлор-ионов. В конечном итоге рассчитывают длительность пассивного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций. И если она меньше заданного срока эксплуатации, то опять возвращаются к этапам I или II (см. рис. 2), изменяя свойства компонентов бетонной смеси и пересчитывая состав бетона.

Таблица 2. Результаты обследования мостов

№ пп	Год постройки	Вид бетона	Способ определения прочности бетона на сжатие	Прочность бетона на сжатие, МПа
1	1962	Монолитный	ГПНВ-5	40,0
2	1963–1965	Сборный	Склерометр Шмидта	Не менее 32,1
3	1955	Сборный	ГПНВ-5	32,1
4	1956	Сборный	ГПНВ-5	38,5
5	1960–1963	Сборный	Испытание образцов	40,4
6	1988–1989	Сборный	Склерометр Шмидта	44,9
7	1970	Сборный	Склерометр Шмидта	51,3
8	1978	Сборный	ГПНВ-5	Не менее 42,2
9	1966	Сборный	ГПНВ-5	Не менее 43,7
10	1969	Монолитный	ГПНВ-5	Не менее 33,6
11	1961	Сборный	ГПНВ-5	Не менее 40,5
12	1969	Сборный	Испытание образцов	32,1
13	1974	Сборный	ГПНВ-5	Не менее 43,6
14	1957	Монолитный	ГПНВ-5	17,3
15	1970	Сборный	ГПНВ-5	Не менее 59,5
16	1975	Сборный	ГПНВ-5	Не менее 34,6
17	1970	Сборный	ГПНВ-5	42,2
18	1959-1960	Сборный	ГПНВ-5	38,5
19	1972	Сборный	Склерометр Шмидта	19,2
20	1984	Сборный	ГПНВ-5	32,1
21	1972	Сборный	Склерометр Шмидта	Не менее 39,7
22	1954	Сборный	ГПНВ-5	Не менее 25,6
23	1951–1952	Монолитный	Склерометр Шмидта	25,9
24	1977–1979	Сборный	Склерометр Шмидта	Не менее 33,3
25	1973	Сборный	Склерометр Шмидта	Не менее 26,9
26	1958–1959	Сборный	ГПНВ-5	38,5
27	1965–1966	Сборный	Склерометр Шмидта	Не менее 57,7
28	1991	Сборный	Склерометр Шмидта	Не менее 57,7
29	1968–1969	Сборный	ГПНВ-5	32,1
30	1954–1955	Сборный	ГПНВ-5	Не менее 44,9
31	1962–1963	Сборный	Склерометр Шмидта	Не менее 76,9
32	1975	Сборный	Склерометр Шмидта	Не менее 32,1
33	1977–1985	Сборный	ГПНВ-5	Не менее 57,7

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ

Оценим достоверность расчетов глубины карбонизации бетона, осуществляемых по предлагаемой схеме. Необходимо отметить, что обычно описываемые в литературе данные (как, впрочем, и ниже приведенные) не содержат исчерпывающих сведений о свойствах компонентов бетона, об условиях твердения и о других, важных для прогноза параметрах, что снижает надежность сопоставления.

В таблице 1 представлены фактические значения глубины карбонизации бетона, приведенные из литературных источников, и рассчитанные по предложенной модели прогноза. Нетрудно убедиться в том, что расчет дает вполне приемлемые с практической точки зрения результаты.

В ГП "БелдорНИИ" проведены достаточно обширные натурные исследования прочности бетона на сжатие (таблица 2) и глубины карбонизации бетона (рис. 3) в железобетонных конструкциях автодорожных мостов Республики Беларусь. На рис. 3 нанесены также результаты расчета глубины карбонизации бетона по описанному выше программному продукту. К сожалению, результаты обследования мостов не дают информации о материалах, использованных при строительстве и составах бетона. В связи с чем авторы статьи по прочностным характеристикам (см. таблицу 2) рассчитывали составы бетона для цементов марок 400 и 500, а затем оценивали глубину карбонизации бетона. Следует

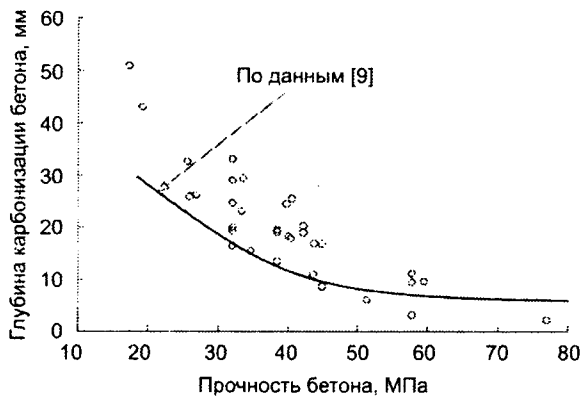


Рис. 4. Зависимость фактической глубины карбонизации бетона от его прочности

отметить, что результаты достаточно удовлетворительны, что подтверждается и статистическими выкладками. Так, коэффициент вариации отклонений расчетных данных от фактических составил 26 %, что, по мнению авторов, вполне приемлемо для практических расчетов. Имеющие место отклонения легко объясняются тем, что много факторов, заложенных в программную модель, попросту не учтены, например, вид цемента, концентрация углекислого газа, влажностное состояние бетона, атмосферные осадки и др.

Коснемся также вопроса корреляции прочности бетона и глубины карбонизации бетона, построенной по данным обследования (рис. 4). Как известно, на их взаимосвязи основывается назначение классов по условиям эксплуатации конструкций. К сожалению, тесная взаимосвязь отсутствует, хотя тенденция увеличения интенсивности карбонизации бетона со снижением его прочностных характеристик налицо.

Для сопоставления фактических величин карбонизации с расчетными воспользуемся также данными, приведенными и систематизированными в [10]. На фактические данные глубины карбонизации бетона защитного слоя автодорожных мостов и путепроводов, взятые авторами работы [10] из отчетов "БелдорНИИ" для бетона с водоцементным отношением от 0,4 до 0,5 при расходе цемента от 380 до 420 кг/м³, авторами [10] наложены результаты расчетов (для усредненных величин В/Ц и расхода цемента) по различным моделям,

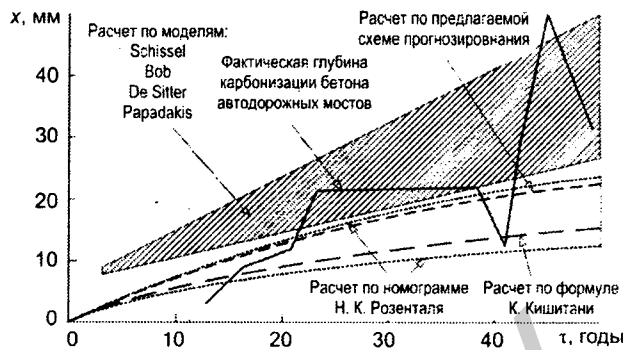


Рис. 5. Глубина карбонизации бетона (x) с водоцементным отношением 0,44 и расходом цемента 400 кг/м³ в зависимости от времени эксплуатации (t)

предложенным зарубежными исследователями (рис. 5). Авторы данной статьи дополнительно на рис. 5 привели результаты расчетов по общеизвестной формуле К. Кишитани и номограмме, предложенной Н. К. Розенталем [9], а также по предлагаемой методике прогнозирования (см. рис. 1). Обобщенный анализ позволяет сделать вывод, что ни одна из моделей не дает возможности с высокой достоверностью рассчитывать глубину карбонизации бетона на всем периоде эксплуатации, что легко объясняется множеством не учитываемых при прогнозе факторов. Отчасти можно констатировать, что для больших сроков эксплуатации фактические данные представляются несколько завышенными и не вписываются в классические представления о зависимости глубины карбонизации от корня квадратного из времени. В целом же расчет по программному продукту достаточно достоверен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика прогнозирования долговечности железобетонных мостовых конструкций на стадии их изготовления вполне достоверна. А разработанный на ее основе программный продукт может быть, по мнению авторов, удобным инструментом для направленного модифицирования состава бетона с целью изготовления железобетонных конструкций с заданной долговечностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, А. И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автодорожных мостов / А. И. Васильев // Бетон и железобетон. — 2000. — № 2. — С. 20–23.
2. Васильев, А. И. Прогноз коррозии арматуры железобетонных мостовых конструкций при карбонизации защитного слоя / А. И. Васильев // Бетон и железобетон. — 2001. — № 3. — С. 16–20.
3. 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.
4. 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.
5. Васильев, А. И. Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автодорожных мостов в условиях коррозии арматуры / А. И. Васильев // Бетон и железобетон. — 2003. — № 2. — С. 17–20.
6. Бабицкий, В. В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В. В. Бабицкий // Материалы, технологии, инструменты. — 2005. — № 1. — С. 76–79.
7. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона / В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. — 2005. — № 2. — С. 33–38.
8. Алексеев, С. Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. — М.: Стройиздат, 1990. — 320 с.
9. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной производственной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. — М.: Стройиздат, 1976. — 205 с.
10. Расчет срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сб. науч. ст. / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы; редкол.: Т. М. Пецольд (отв. ред.) [и др.] / О. Ю. Чернякевич, С. Н. Леонович. — Гродно: ГрГУ, 2010. — С. 369–375.

Статья поступила в редакцию 30.03.2011.