

УДК 691.328
Бабицкий В.В.

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Коррозия стальной арматуры является основной причиной недостаточной долговечности железобетонных конструкций. Переход же стальной арматуры из пассивного состояния в активное с последующей ее коррозией – следствие карбонизация бетона на всю толщину защитного слоя или накопления хлор-ионов в приарматурной зоне бетона сверх критической концентрации.

Предлагается модель прогнозирования коррозионного состояния железобетона еще на стадии проектирования состава бетона. Она базируется на концепции, выдвинутой С.Н. Алексеевым, – 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 зависит от времени накопления в приарматурной зоне бетона такого количества хлор-ионов, которое превышает критическое значение (зависит от наличия ингибирующих процесс коррозии ионов, плотности бетона и условий эксплуатации) или от времени достижения фронтом прокарибонизированного бетона поверхности арматуры (зависит от структурных особенностей бетона и эксплуатационных условий). При этом критическая концентрация хлор-ионов дается не в связи с расходом цемента (обычно около 0,4 % от массы цемента), а от массы растворной части бетона (около 0,15 %), что, по-видимому, более объективно для случая поступления хлор-ионов в бетон конструкций извне, на стадии их эксплуатации.

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

И если реализовывать идею прогноза долговечности еще на стадии изготовления железобетонных конструкций, то необходимо предварительное получение 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 для этого нельзя ограничиваться традиционными влияющими факторами (основными из которых обычно являются водоцементное отношение и расход цемента), поскольку они не изменяются во времени. Описать свойства бетона, изменяющиеся во времени, можно только с привлечением такого динамичного параметра, как степень гидратации цемента. Именно степень гидратации, вместе с традиционными влияющими факторами, определяет динамику изменения структуры цементного камня и бетона, а, следовательно, и их проницаемость для углекислого газа и ионов хлора.

Сама степень гидратации цемента (α) находится в достаточно сложной, но поддающейся математическому описанию [1,2], функциональной зависимости от множества факторов – свойств цемента (минералогический состав, тонкость помола), водосодержания цементного теста, вида и количества введенных химических добавок, условий и времени твердения и др. А возможность прогноза величины α открывает и перспективу прогноза диффузионных характеристик на основе структурных особенностей цементного камня (бетона). Важнейшими структурными параметрами цементного камня, определяющими его многообразные свойства, являются гелевая (P_g) и капиллярная (P_c) пористость. Их величины могут быть рассчитаны по упрощенным зависимостям:

Например, гелевая пористость:

$$P_g = \frac{0,195 \cdot \alpha}{\left(\frac{B}{C}\right) + 0,328} \cdot 100, \% \quad (1)$$

цементного камня

бетона
$$\Pi_r^6 = \frac{0,195 \cdot \alpha \cdot \Pi}{10}, \%$$
 (2)

а капиллярная:

цементного камня
$$\Pi_k = \frac{\left(\frac{B}{\Pi}\right)_r - 0,369 \cdot \alpha}{\left(\frac{B}{\Pi}\right)_r + 0,328} \cdot 100, \%$$
 (3)

бетона
$$\Pi_k^6 = \frac{\Pi \cdot \left[0,98 \cdot \left(\frac{B}{\Pi}\right)_6 - 0,0094 - 0,369 \cdot \alpha \right]}{10}, \%$$
 (4)

Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне определяется капиллярной пористостью и объемом (V_k) цементного камня

$$D_{\text{эф}}^{\text{CO}_2} = \frac{0,165}{1,45 \cdot \left(\frac{1}{\Pi_k} + 3 \cdot \Pi_k\right)^{2,3}} \cdot \left(\sqrt[3]{V_k}\right)^2, \text{ см}^2/\text{с}. \quad (5)$$

Выражение (5) ориентировано на расчеты применительно к эксплуатации конструкций при относительной влажности 50-80 %.

А эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов зависит не только от структурных особенностей, но и от водосодержания цементного камня (бетона)

$$D_{\text{эф}}^{\text{Cl}} = \frac{6,5 \cdot 10^{-11} \cdot \omega_0^{2,5}}{1 + 3,3 \cdot \log \frac{1}{6,6 \cdot 10^{-10} \cdot \Pi_k \cdot \left[\sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{ц}}}{\rho_{\text{в}}} \cdot \left(\frac{B}{\Pi}\right)_r} - 1,2 \cdot \alpha \right]^2 - 8}}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (6)$$

где ω_0 — содержание влаги в цементном камне (бетоне), % по объему;

$\rho_{\text{ц}}, \rho_{\text{в}}$ — плотность цемента, воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Казалось бы, выражения (5) и (6) вполне достаточны для эффективного прогноза кинетики развития коррозионных процессов. Однако это не так, поскольку отсутствует текущая информация о содержании влаги в защитном слое железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных температурно-влажностных условиях. Отдельные тенденции влияния относительной влажности воздуха на коррозионные процессы в защитном слое бетона [3,4] показаны на рис. 1.

Кроме этого, влажность цементного камня, а, следовательно, и бетона, играет исключительную роль и в других процессах, связанных с эксплуатацией бетонных и железобетонных конструкций. Общеизвестна, например, зависимость теплофизических характеристик ограждающих конструкций от относительной влажности воздуха в помещении. Усадочные деформации также в известной степени определяются влагосодержанием капиллярно-пористого материала, что может вызвать деградацию бетона защитного слоя [5].

Можно дать и другие примеры, однако и приведенные показывают необходимость разработки четкого механизма прогнозирования влажностных характеристик бетона в зависимости от параметров эксплуатационной среды. Величина сорбционной влажности бетона находится в весьма сложной зависимости как от относительной влажности воздуха, так и особенностей внутренней поверхности капиллярно-пористого пространства материала. Однако удобно было бы рассчитывать сорбционную влажность в связи с традиционными параметрами цементного камня. Компьютерный анализ экспериментально полученных и имеющихся в литературе данных позволил получить аналитическое выражение, описывающее процесс сорбции (U_0 в % от объема) цементного камня (бетона) при изменении относительной влажности воздуха (φ в долях единицы) от 0 до 1, как функцию структурных особенностей материала и относительного водосодержания цементного теста X

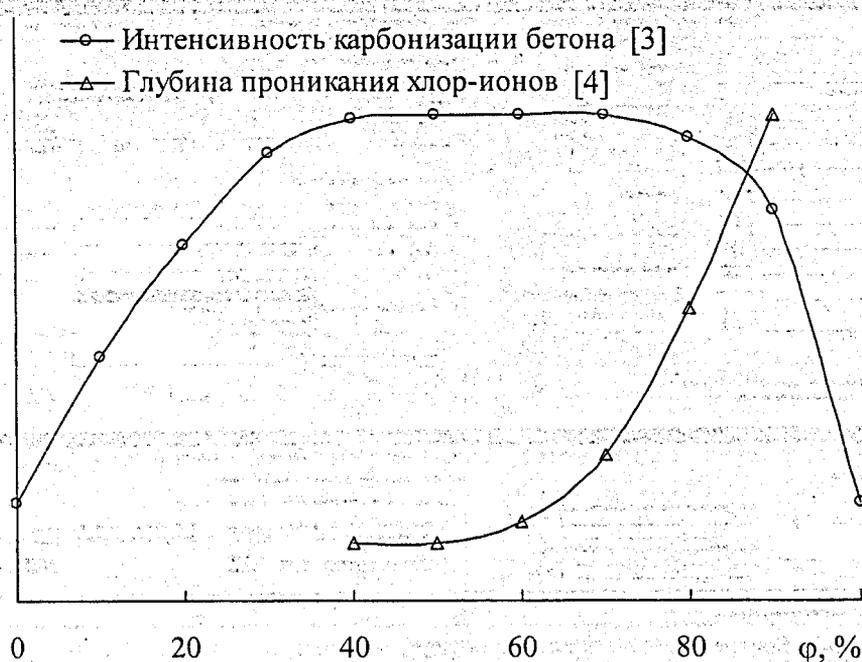


Рисунок 1 – Влияние относительной влажности воздуха (ϕ) на интенсивность коррозионных процессов в защитном слое железобетонных конструкций.

$$U_o = \left(\Pi_r - \frac{1,5}{(X + 0,3)^2} \right) \cdot \phi^{0,02\Pi_r} \cdot e^{0,1\phi} + \Pi_k \cdot \phi^5, \% \quad (7)$$

Поскольку $\omega_o = U_o$, то эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов рассчитывается по выражению (6) для любых условий эксплуатации железобетонных конструкций. Что касается зависимости интенсивности карбонизации бетона от влажностных условий эксплуатации, то, в принципе, для приведения величин, рассчитанных по (5) к условиям, отличным от 50-80 %, можно воспользоваться графиком на рис. 1. Но лучше реализовать идею, заложенную в [6], о зависимости соотношения диффузии углекислого газа в газовой (коэффициент диффузии D_r) и жидкой среде (D_o) от степени заполнения пор бетона водой W

$$\sqrt{\frac{D_r}{D_o} \cdot \frac{C_r}{C_o}} \leq \frac{W}{1 - W} \quad (8)$$

В (8) C_r – концентрация углекислого газа в воде, а C_o – в газовой среде. Величина W может быть определена как отношение текущего значения U_o к максимальному, получаемому при $\phi = 1$.

В результате все зависимости, описывающие как процессы структурообразования цементного камня (бетона), так и коррозионные, увязываются в единую модель, учитывающие и влажностные условия эксплуатации железобетонных конструкций.

Логическим завершением разработанной многофакторной математической модели прогнозирования коррозионного состояния железобетонных конструкций, включающей как приведенные аналитические выражения, так и иные, является создание инструмента для ее инженерной реализации. При ручном обсчете многофакторных моделей оперативный учет всех влияющих параметров весьма трудоемок, а зачастую и практически невозможен. Наиболее комфортные условия для расчетов предоставляет программный продукт (рис. 2), являющийся элементом разработанного на кафедре «Строительные материалы и изделия» БНТУ вычислительного комплекса «Технолог» (ВКТ). Программа учитывает как внутренние влияющие факторы, определяемые структурными особенностями бетона (диффузионные характеристики, вид и количество ингибитора коррозии стали), так и внешние (температурно-влажностный режим и продолжительность и характер эксплуатации, концентрация агрессивных сред) – рис.2в. Итогом расчетов являются графики (а также табличная информация), на которых отражаются моменты начала коррозии стальной арматуры по причине карбонизации защитного слоя или накопления хлор-ионов сверх критического количества (рис.2г и рис. 2д).

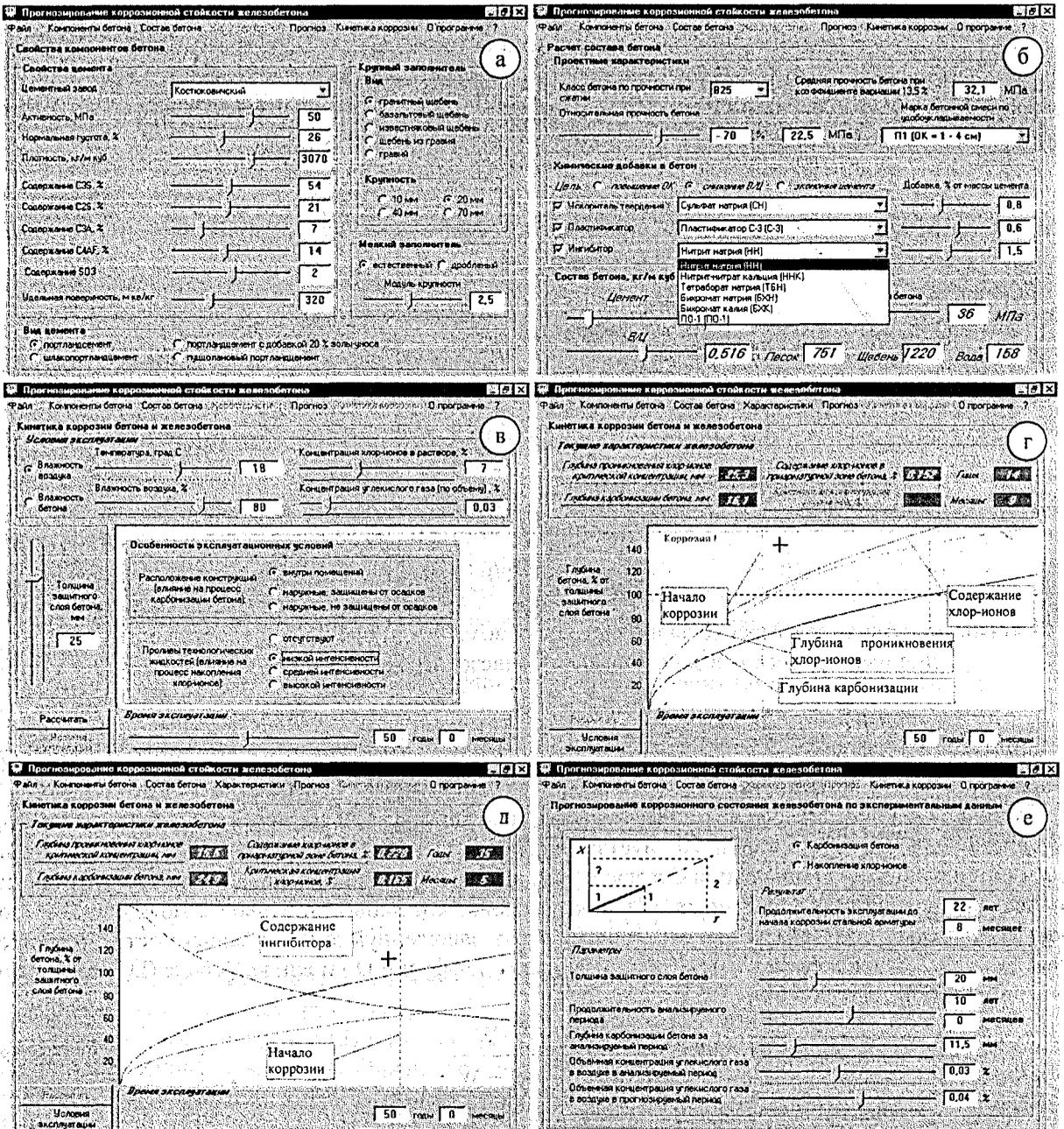


Рисунок 2 – Основные окна программы «ВКТ-Коррозия»

В математическую модель (и, соответственно, в программный продукт) включен и прогноз, осуществляемый по результатам обследования конструкций уже на определенной стадии эксплуатации (рис. 2е). Для этого необходимы экспериментально полученные данные о реальной глубине карбонизации бетона либо толщине бетона, на которой концентрация хлор-ионов достигла критической величины.

Органичной частью программы является многофакторный метод проектирования состава бетона с учетом (кроме традиционных параметров) вида и количества вводимых пластифицирующих добавок, добавок-ускорителей твердения и добавок, ингибирующих процесс коррозии стали (рис.2б).

Оценим достоверность расчетов, осуществляемых с помощью «ВКТ-Коррозия». Для этого сопоставим их с некоторыми фактическими данными, почерпнутыми из отдельных литературных источников:

В таблице 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.

Таблица – Сравнительные величины глубины карбонизации бетона.

Авторы	Расход цемента, кг	В/Ц	Глубина карбонизации бетона, мм	
			Фактическая	Расчет
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

Сопоставим также результаты расчета с результатами обследования моста в Ярославской области, описанными в [7]. На момент обследования, проведенного через 23 года после начала эксплуатации, установлено, что средняя толщина бетона защитного слоя составила 28 мм, а с обеспеченностью 95 % – 24 мм. Содержание хлор-ионов в слое толщиной 10 мм составляет 0,6 %, глубина карбонизации бетона – 18,5 мм.

К сожалению, в примере отсутствуют технические характеристики бетона конструкций и условия их эксплуатации (вероятно потому, что они и не нужны для используемой в [7] системы прогноза). Для грубой оценки предположим, что при изготовлении конструкций использован бетон класса В30, а концентрация хлор-ионов во внешней среде составляет около 5 %.

В результате расчетов получаем, что на момент обследования содержание хлор-ионов в приарматурной зоне должно составить около 0,14 % от массы растворной части бетона. Коррозию арматуры по причине накопления ионов хлора сверх критической концентрации следует ожидать через 28 лет после начала эксплуатации для толщины бетона защитного слоя 28 мм или через 21 год для толщины 24 мм. Глубина карбонизации бетона к возрасту 23 года должна составить 17,3 мм. Сравнительный анализ показывает, что значения, прогнозируемые на стадии проектирования состава бетона, и фактические, полученные в результате обследования моста, достаточно близки.

Таким образом, предлагаемая модель прогнозирования долговечности железобетонных конструкций на стадии их изготовления, на наш взгляд, достаточно достоверна. А разработанный на ее основе программный продукт может быть удобным инструментом для направленного модифицирования состава бетона с целью изготовления железобетонных конструкций с заданной долговечностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блещик Н.П., Протько Н.С., Рыскин М.Н. Математические модели кинетики гидратации цемента. Международная конференция «Инженерные проблемы современного бетона и железобетона». – Минск, 1997 – с. 25-36.
2. Бабицкий В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: Сборник трудов VII Международного научно-методического семинара / Под ред. Блещика Н.П., Борисевича А.А., Пецольда Т.М. – Брест, БГТУ, 2001 – с. 211-215.
3. Zbigniew Scislawski. Korozja i ochrona zbrojenia. – Warszawa, 1972.
4. Шевяков В.П. Проектирование защиты строительных конструкций химических предприятий от коррозии. – М.: Стройиздат, 1984. – 168 с.
5. Никитин В.И., Ракецкий В.М., Лапко А., Прусел И.А. Гидротермическое воздействие на цилиндрические стенки железобетонных силосов. В кн. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: Сборник трудов VII Международного научно-методического семинара / Под ред. Блещика Н.П., Борисевича А.А., Пецольда Т.М. – Брест, БГТУ, 2001 – 550 с.
6. Гусев Б.В., Степанова В.Ф., Чернышук Г.В. Модель расчета коррозионной стойкости бетона при воздействии агрессивной углекислоты воздуха // Бетон и железобетон. – 1999. – № 1. – С. 27-28.
7. Васильев А.И. Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автодорожных мостов в условиях коррозии арматуры. // Бетон и железобетон. – 2003. – № 2. – С. 17-20.