

УДК 691.328

ЭЛЕМЕНТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

ELEMENTS OF FORECASTING OF THE CORROSION CONDITION OF THE IRON FITTINGS OF FERRO-CONCRETE

Бабицкий В.В., д.т.н., проф. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск), **Семенюк С.Д.**, д.т.н., зав. каф. (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь)

Babitski V.V., doctor of technical sciences, professor (Belarusian National Technical University, Minsk), **Semenyuk S.D.**, doctor of technical sciences, professor (Belarusian-Russian University, Mogilev, the Republic of Belarus)

Представлено направление прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций при агрессивном воздействии углекислого газа и жидких сред, содержащих хлор-ионы.

The direction of forecasting of a corrosion condition of steel armature of ferro-concrete designs is presented at aggressive influence of carbonic gas and the liquid environments containing a chlorine-ions.

Ключевые слова:

Бетон, железобетонные конструкции, стальная арматура, коррозия.
Concrete, ferro-concrete designs, steel armature, corrosion.

Высокая щелочность поровой жидкости бетона и отсутствие в ней агрессивных ионов, ограниченность доступа кислорода создают ту благоприятную среду, в которой стальная арматура железобетона находится (и может находиться достаточно долго) в пассивном состоянии. Однако при определенных условиях сложившийся баланс нарушается, что вызывает переход стали в активное состояние с неизбежной последующей коррозией. Депассивация стали в бетоне может осуществляться по причинам карбонизации защитного слоя или накопления агрессивных ионов в приарматурной зоне бетона сверх определенного, так называемого критического, количества. В конечном итоге 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 формирования и твердения конструкции.

Для математического описания длительности инкубационного периода (периода пассивного состояния стальной арматуры) российские ученые [1,2,3] предложили аналитические зависимости, учитывающие эффективные коэффициенты диффузии (ЭКД) агрессивных веществ в защитном слое бетона, и которые по причине масштабов их применения и общей признанности можно назвать классическими.

В случае карбонизации бетона текущую глубину нейтрализации можно рассчитать по уравнению:

$$x_k = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \tau \cdot D_{CO_2}}{m_0 \cdot \frac{\Psi}{300}}}, \text{ см}, \quad (1)$$

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

τ – длительность эксплуатации конструкции, с;

D_{CO_2} – эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне, $\text{см}^2/\text{с}$;

m_0 – реакционная емкость бетона при расходе цемента $300 \text{ кг}/\text{м}^3$ (может быть принята равной 42 см^3 углекислого газа);

Ψ – расход цемента в 1 м^3 бетона, кг.

Если глубина карбонизации превышает толщину защитного слоя бетона, то возможна активация стальной арматуры.

При диффузионном характере накопления хлор-ионов в приарматурной зоне бетона концентрация раствора хлоридов в поровой жидкости бетона (C_x), может быть рассчитана по уравнению:

$$C_x = C_0 \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \frac{h}{2 \cdot \sqrt{D_{Cl} \cdot \tau}} \right), \%, \quad (2)$$

где C_0 – концентрация хлор-ионов в растворе во внешней среде, %;

h – глубина расположения слоя бетона, см;

D_{Cl} – эффективный коэффициент диффузии ионов хлора в бетоне, $\text{см}^2/\text{с}$.

В последующем по величине C_x рассчитывают содержание хлор-ионов в приарматурной зоне и если оно превышает критическое значение, то делают вывод о возможности депассивации стальной арматуры.

Зависимости (1) и (2) связывают кинетику деградации защитного слоя как с внутренними параметрами бетона, характеризуемыми ЭКД, так и внешними, и могут быть положены в основу разрабатываемой модели прогнозирования коррозионной стойкости железобетона. Однако их решению должен предвдаться расчет (а не длительное и дорогостоящее экспериментальное определение) количественных значений ЭКД углекислого газа и хлор-ионов в бетоне, что, к сожалению, не нашло должного отражения

в литературных источниках. Задача это может быть решена на основе прогнозирования структурных особенностей бетона: «...Конечной целью изучения структуры бетона является установление связи между характеристиками структуры и свойствами бетона (прочностью, деформативностью и долговечностью...)» [4].

И если реализовывать идею прогноза долговечности еще на стадии изготовления железобетонных конструкций, то необходимо на основе состава бетона получение аналитических зависимостей для расчета диффузионных характеристик с последующим прогнозированием коррозионного состояния стальной арматуры железобетона по выражениям (1) и (2). 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 постоянны и не изменяются во времени. Описать свойства бетона, изменяющиеся во времени, можно только с привлечением такого динамичного параметра, как степень гидратации цемента. Именно степень гидратации, вкуче с традиционными влияющими факторами, определяет динамику изменения структуры цементного камня и бетона, а, следовательно, и коррозионное состояние железобетона.

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. [5]. Не утомляя читателя теоретическими выкладками, анализом проведенных экспериментов, представим конечные выражения для расчета необходимых параметров бетона.

Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа предлагается рассчитывать по:

$$D_{CO_2} = \frac{k_{цCO_2} \cdot \Pi_k^2}{\sqrt[3]{V_k^2}}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (3)$$

где $k_{цCO_2}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на диффузионную проницаемость бетона (для портландцемента может быть принят равным 0,025 см²/с);

Π_k – капиллярная пористость бетона, д. ед.;

V_k – объем цементного камня в 1м³ бетона, д. ед.

Реакционная емкость бетона может быть рассчитана не по $m_0 \cdot \frac{\Pi}{300}$, как в

(1), а по выражению:

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

где $k_{цто}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на реакционную емкость бетона (для портландцемента может быть принят равным $0,205 \text{ см}^3/\text{кг}$);
 α – степень гидратации цемента, д. ед.;
 η – содержание инертных минеральных добавок в вяжущем, д. ед.
 Эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов может быть рассчитан по:

$$D_{Cl} = \frac{k_{бCl} \cdot (100 \cdot \omega_m)^{2,5}}{1 + 0,875 \cdot (W - 2)}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (5)$$

где $k_{бCl}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида бетона на эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов (для тяжелого бетона на щебне может быть принят равным $1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$);
 ω_m – влажность (по массе) бетона защитного слоя, д. ед.;
 W – марка бетона по водонепроницаемости.

И, наконец, как было установлено, критическое количество хлор-ионов, вызывающее переход стали из пассивного состояния в активное, также зависит от структурных особенностей бетона (а не принимается постоянным и равным $0,4 \%$ от массы цемента) и может быть рассчитано для бетона без добавки ингибитора коррозии стали по:

$$Cl_{ц}^{кр} = \sqrt[3]{\frac{k_{цCl}}{\Pi_k}}, \text{ \%}, \quad (6)$$

где $k_{цCl}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида цемента на критическое количество хлор-ионов (для портландцемента может быть принят равным $0,0335$),
 а для бетона с добавкой по:

$$Cl_{ц}^{кри} = Cl_{ц}^{кри} + k_i \cdot D_i, \text{ \%}, \quad (7)$$

где k_i – безразмерный коэффициент, учитывающий эффективность добавки ингибитора коррозии стали;
 D_i – содержание добавки ингибитора в приарматурной зоне бетона, %.

Полученные (и иные) выражения использованы для разработки элементов (обобщенная модель прогнозирования пока еще далека от идеала, поэтому речь идет именно об элементах!) прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетона на стадии проектирования состава бетона.

Структурная схема расчетов представлена на рис. 1. Она представляет собой как бы симбиоз «технологических» и «эксплуатационных» влияющих факторов.

В «технологические» включены факторы, определяющие структурные особенности бетона: вид (портландцемент, шлакопортландцемент,

пуццолановый портландцемент), свойства (активность, нормальная плотность, плотность, минералогический состав и др.) и расход вяжущего; вид, свойства (крупность, содержание пылевидных и глинистых включений и др.) и расходы мелкого и крупного заполнителей; вид (ускорители твердения, пластификаторы, ингибиторы коррозии стали) и дозировки химических добавок. Состав бетона определяется свойствами компонентов бетонной смеси, маркой бетонной смеси по удобоукладываемости, классом бетона по прочности на сжатие, марками бетона по морозостойкости и водонепроницаемости, условиями твердения изделий (нормальное или тепловлажностная обработка), отпускной прочностью. Указанные и иные факторы позволяют рассчитать структурные особенности цементного камня и бетона и в конечном счете ЭКД углекислого газа и хлор-ионов (а также ионов, ингибирующих коррозию стали), реакционную емкость бетона и критическое количество хлор-ионов (без или с добавкой ингибитора коррозии стали).

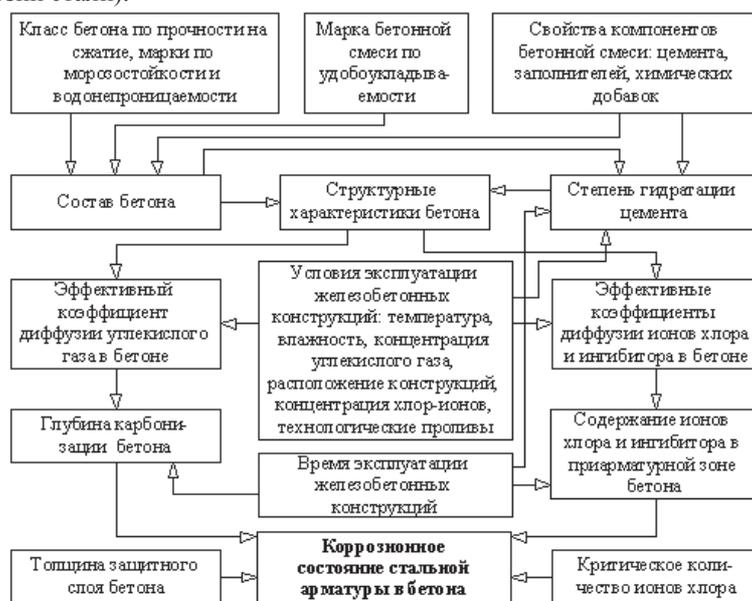


Рис. 1. Схема прогнозирования коррозионного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций

В свою очередь, к «эксплуатационным» факторам можно отнести толщину защитного слоя бетона, время и температурно-влажностные условия эксплуатации, концентрацию углекислого газа в воздухе и хлор-ионов в растворе на поверхности железобетонной конструкции, воздействие атмосферных осадков, возможные проливы разной интенсивности технологических жидкостей, содержащих хлор-ионы. Совокупность этих

«технологических» и «эксплуатационных» факторов, изменяющихся в процессе эксплуатации железобетона, и определяет длительность пассивного состояния стальной арматуры.

Логическим завершением разработанной многофакторной математической модели прогнозирования коррозионного состояния железобетонных конструкций 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 (основные окна представлены на рис. 2), являющийся элементом разработанного на кафедре «Технология бетона и строительных материалы» Белорусского национального технического университета вычислительного комплекса «Технолог» (ВКТ). Интерфейс «ВКТ–Коррозия» разработан таким образом, чтобы исключить необходимость ручного ввода исходной числовой информации посредством клавиатуры. Для введения информации предназначены только слайдеры и комбинированные окна, что в значительной степени исключает возможные ошибки, а также дает возможность пользователю визуально оценивать пределы влияющих факторов и целенаправленно на них воздействовать. В соответствии с описанной расчетной схемой (рис. 1) оператор (предпочтительно инженер-технолог) выбирает компоненты бетонной смеси (поз. I на рис. 2), затем проектирует состав бетона (поз. II на рис. 2). Пластифицирующая добавка может быть использована по трем направлениям: для повышения подвижности бетонной смеси при неизменном (в сопоставлении с составом без добавки) составе бетонной смеси; для повышения физико-механических характеристик и долговечности бетона и для экономии вяжущего. Далее вводятся особенности условий эксплуатации железобетонной конструкции и дается команда на осуществление расчета. Информация выдается в виде графиков, наглядно показывающих оператору развитие процесса (поз. III на рис. 2). Перемещение указателя по рисунку (символ «+» на рис. 2) сопровождается появлением цифровых записей в соответствующих окнах (содержание в приарматурной зоне бетона хлор-ионов и остаточное содержание ионов, ингибирующих процесс коррозии стали), глубина проникновения хлор-ионов, соответствующих критическому количеству, в тело бетона, а также глубина карбонизации бетона).

Если расчетный срок эксплуатации соответствует проектному, то информация может быть распечатана на бумажном носителе. В противном случае оператор имеет возможность изменить условия эксплуатации, а также откорректировать состав бетона (поз. IV на рис. 2) либо, в крайнем случае, исходные характеристики компонентов бетонной смеси (поз. V на рис. 2).

В математическую модель (и, соответственно, в программный продукт) включен и прогноз, осуществляемый по результатам обследования конструкций уже на определенной стадии эксплуатации (на рис. 2 и 3 не

показано). Для этого необходимы экспериментально полученные данные о реальной глубине карбонизации бетона либо толщине бетона, на которой количество хлор-ионов достигло критической величины.

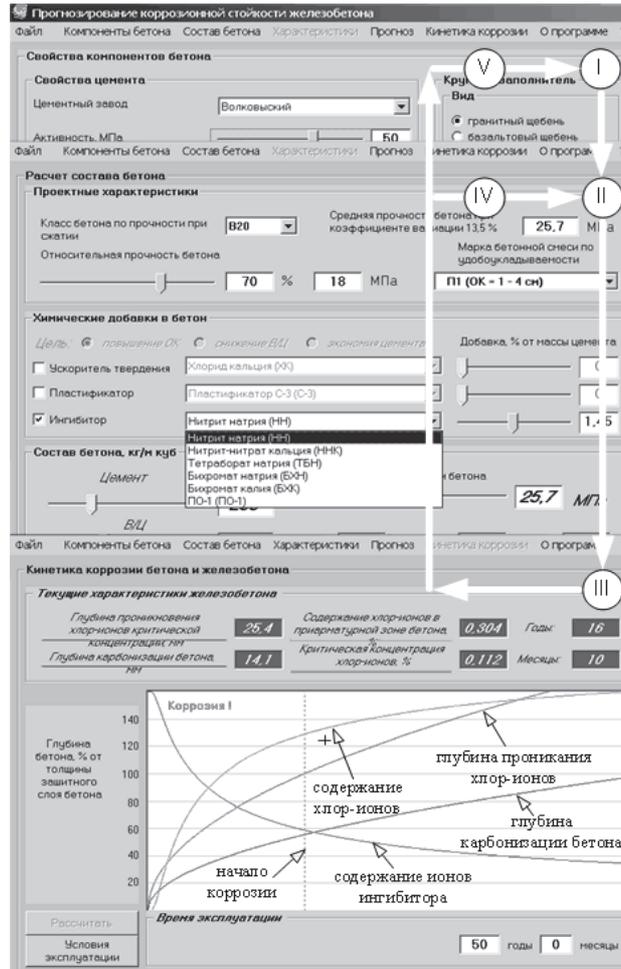


Рис. 2. Основные окна программного продукта

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

В ГП «БелДорНИИ» Республики Беларусь проведены достаточно обширные натурные исследования прочности бетона на сжатие и глубины карбонизации бетона в железобетонных конструкциях автодорожных мостов

страны, построенных в период с 1954 по 1989 гг. К сожалению, результаты обследования мостов не дают полной информации о материалах, использованных при их строительстве, и составах бетона. Поэтому необходимые для прогноза данные были получены косвенным путем. Возраст постройки, предполагаемые условия твердения позволили по прочности на момент обследования рассчитать прочность бетона к началу эксплуатации железобетона. По этому параметру и предполагаемым удобоукладываемости бетонной смеси и марке цемента проведены расчеты состава бетона. А далее, в соответствии с описанной выше последовательностью, проведены расчеты глубины карбонизации бетона (рис. 3).

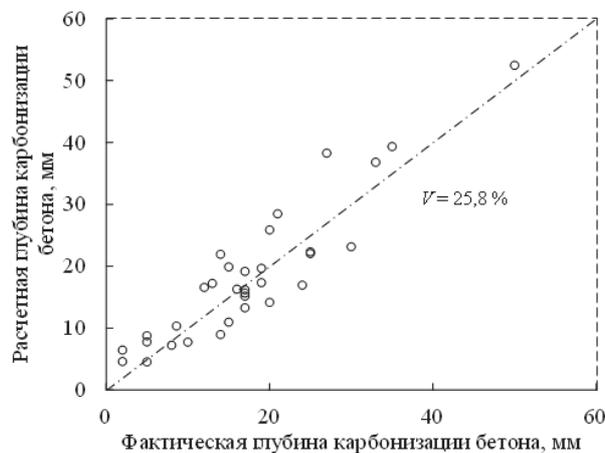


Рис. 3. Соотношение фактических и расчетных значений карбонизации бетона мостовых железобетонных конструкций

Можно констатировать, что результаты достаточно удовлетворительны, что подтверждается и статистическими выкладками – коэффициент вариации отклонений расчетных данных от фактических составил 25,8 %, что, на наш взгляд, вполне приемлемо для практических расчетов. Имеющие место отклонения легко объясняются тем, что много факторов, заложенных в программу, попросту не могли быть учтены, например, вид цемента, концентрация углекислого газа, влажностное состояние бетона, атмосферные осадки и др.

Сопоставим также результаты расчета с результатами обследования моста в Ярославской области, описанными в [6]. 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, но для приближенной оценки можно предположить, что при изготовлении конструкций использован бетон класса В30, а концентрация хлор-ионов во внешней среде составляла около 5 %. В результате расчетов по программному продукту получено, 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 критического количества следует ожидать через 28 лет после начала эксплуатации для толщины бетона защитного слоя 28 мм или через 21 год для толщины 24 мм. А 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, предлагаемые элементы прогнозирования долговечности железобетонных конструкций на стадии их изготовления, на наш взгляд, достаточно достоверны. А разработанный на их основе программный продукт может быть удобным инструментом для направленной оптимизации состава бетона с целью изготовления железобетонных конструкций с заданной долговечностью.

1. Алексеев С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной производственной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
2. 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.
3. Алексеев С.Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.
4. Горчаков Г.И., Иванов И.А. О комплексной характеристике структуры бетона // Бетон и железобетон. – 1980. – № 1. – С.22.
5. Бабицкий В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – №1. – С. 76-79.
6. Васильев А.И. Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автомобильных мостов в условиях коррозии арматуры // Бетон и железобетон. – 2003. – № 2. – С. 17-20.