

УДК 6

ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРОЗИИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*канд. техн. наук, доц. В.В. БАБИЦКИЙ
(Белорусский национальный технический университет)*

Проанализированы основные причины депассивации стальной арматуры железобетона. Приведены аналитические зависимости для оценки процессов, происходящих в защитном слое бетона. Представлена математическая модель для прогнозирования коррозии стальной арматуры железобетонных конструкций при воздействии углекислого газа и ионов хлора.

Коррозия стальной арматуры является одной из основных причин потери железобетонными конструкциями своей несущей способности. Фактически начало коррозии стали совпадает по времени с моментом потери защитным слоем бетона своих свойств по отношению к стальной арматуре. Эта потеря наиболее часто обусловлена карбонизацией бетона или накоплением хлор-ионов в приарматурной зоне бетона сверх критической концентрации.

Карбонизация бетона - явление, повсеместно сопровождающее эксплуатацию бетона. Там, где есть углекислый газ (а он есть везде) и благоприятные влажностные условия эксплуатации (относительная влажность воздуха в пределах 50 - 70 %), начинается процесс карбонизации бетона, причем тем более интенсивный, чем меньше плотность материала. Щелочность поровой жидкости в нейтрализованном слое (рН) снижается до значения менее 11,8, и бетон при контакте с арматурой теряет способность пассивировать сталь. Сталь переходит из пассивного состояния в активное, с последующей, практически неизбежной, коррозией. Скорость дальнейшей коррозии находится в многофункциональной зависимости от влияющих факторов и практически не поддается описанию. Вторая причина депассивации стальной арматуры - накопление хлор-ионов в приарматурной зоне бетона до критической величины. Ионы хлора попадают в бетон в виде добавок, с водой затворения или с заполнителем.

Но эти случаи мало интересны с точки зрения прогнозирования, поскольку достаточно просто обчисляются. Гораздо сложнее ситуация, когда хлор-ионы попадают в железобетонную конструкцию извне в процессе ее эксплуатации в условиях воздействия агрессивных сред.

Согласно воззрениям С.Н. Алексеева [1], весь период эксплуатации железобетона распадается на два принципиально различных этапа. На первом этапе защитный слой бетона постепенно теряет свои защитные свойства, но несущая способность конструкции не изменяется. Он получил наименование инкубационного этапа. На втором же этапе защитный слой теряет пассивирующие свойства по отношению к стали, начинается процесс коррозии арматуры: появляются продукты коррозии, которые способны мигрировать к поверхности конструкции, на гранях появляются ржавые пятна и отпечатки арматуры (это характерно при достаточной влажности бетона, низкой плотности и малой толщине защитного слоя), но чаще из-за растущего объема продуктов коррозии (его объем примерно в 2 раза больше объема исходного металла) на гранях изделия образуются трещины и отколы бетона. Сцепление арматуры с бетоном теряется и соответственно падает несущая способность конструкции. Специально проведенные нами исследования показали, что момент начала образования трещины соответствует коррозионным потерям стали около 100 - 150 мг/см².

Что же считать долговечностью железобетона? На наш взгляд, следует руководствоваться только соображениями С.Н. Алексеева:

«...плохая пригодность к ремонту обычных конструкций, арматура которых подвергается коррозии, опасность внезапного обрушения по этой причине предварительно напряженных являются серьезным основанием считать при проектировании их предельным состоянием момент потери пассивности арматуры...»;

- «...было бы неоправданным риском при проектировании допускать какую-то степень коррозии арматуры...».

Проблема прогноза коррозионного состояния железобетона в принципе не нова. В НИИЖБе под руководством С.Н. Алексеева была разработана система прогнозирования, согласно которой кинетика накопления хлор-ионов (либо кинетика карбонизации) определяется диффузионными характеристиками бетона [2]. В последнее время появилась несколько отличная система прогнозирования [3], основывающаяся на результатах исследований зарубежных ученых, Она характеризуется произведением коэффициентов, назначаемых в зависимости от пределов изменения влияющих факторов: температуры, влажности,

времени экспозиции, концентрации хлоридов и др. Следует признать, что данная система достаточно эффективна при выполнении инженерных расчетов, но у нее есть существенный недостаток - практически отсутствует учет влияния структурных особенностей эксплуатируемого бетона.

Ранее нами была разработана многофакторная модель прогноза степени гидратации цемента [4] и показано, что модель позволяет прогнозировать различные свойства бетона, включая и его структурные особенности. В связи с этим мы разделяем воззрения С.Н. Алексеева, поскольку они позволяют логично увязать в единое целое внешние (условия эксплуатации) и внутренние (структура бетона) факторы. Рассмотрим основные положения, которые лежат в основе предлагаемой системы прогнозирования.

Вопрос с эксплуатируемыми конструкциями решается достаточно просто. Если, например, через несколько лет после начала эксплуатации конструкции определить защитную способность бетона, характеризующую глубиной карбонизации бетона, то можно установить и время полной потери защитным слоем способности пассивировать арматуру, т.е. долговечность железобетона определяется из выражения:

$$x = x_1 \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \tau}{c_1 \cdot \tau_1}}, \quad (1)$$

где x – глубина карбонизации бетона (см) в возрасте τ (лет) и при концентрации углекислого газа в воздухе c (%); x_1 – глубина карбонизации бетона (см) в возрасте τ_1 (лет) и при концентрации углекислого газа в воздухе c_1 (%).

В случае воздействия не углекислого газа, а раствора солей-хлоридов, при обследовании устанавливают глубину проникания хлор-ионов в тело бетона, а далее по зависимости (1) прогнозируют вероятную толщину, на которую проникнет агрессивный раствор. Такая система прогноза весьма удобна, поскольку уже косвенно учитывает все внешние влияющие факторы, т.е. эксплуатационный режим, но для проявления коррозионных процессов требует некоторого времени с момента начала эксплуатации.

Но нас гораздо больше интересует вопрос прогноза коррозионного состояния железобетонных конструкций, начиная с проектирования состава бетона и изготовления. Это дает возможность целенаправленно изменять структуру бетона, чтобы обеспечить защитную способность бетона в течение заданного срока эксплуатации (рис. 1). Все факторы, влияющие на долговечность железобетона, могут быть классифицированы как внутренние, влияющие на проницаемость бетона для агрессивных сред, и внешние, учитывающие особенности предполагаемых условий эксплуатации.

Исходные факторы (свойства компонентов смеси, требования к бетонной смеси по удобоукладываемости, класс бетона по прочности на сжатие, марки по морозостойкости и водонепроницаемости, наличие химических добавок, условия твердения) определяют состав бетона и степень гидратации цемента. Как мы уже отмечали, степень гидратации цемента позволяет рассчитать практически все основные свойства бетона (структурные особенности, прочность, морозостойкость, проницаемость, деформативные характеристики и др.). Аналогично, с учетом степени гидратации цемента, можно прогнозировать такие специфические свойства бетона, как эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов D и углекислого газа D' . Таким образом, задача учета внутренних факторов может быть решена.

Внешние факторы могут быть учтены следующим образом.

В случае карбонизации бетона текущую глубину нейтрализации x_x (см) можно рассчитать по выражению:

$$x_x = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \tau \cdot D'}{m_o \cdot \frac{C}{300}}}, \quad (2)$$

где c – концентрация углекислого газа в воздухе, доли единицы по объему; τ – длительность эксплуатации конструкции, с; m_o – реакционная емкость бетона при расходе цемента 300, кг/м³ (может быть принята равной 42 см³ углекислого газа); C – расход цемента в 1 м³ бетона, кг.

При диффузионном характере накопления хлор-ионов в приарматурной зоне бетона его кинетику можно определить по концентрации раствора хлоридов в поровой жидкости бетона (C_x в %), которая может быть рассчитана по выражению:

$$C_x = C_o \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \frac{h}{2 \cdot \sqrt{D \cdot \tau}} \right), \quad (3)$$

где C_o – концентрация хлор-ионов в растворе во внешней среде, %; h – глубина расположения слоя бетона, см; τ – время, с.

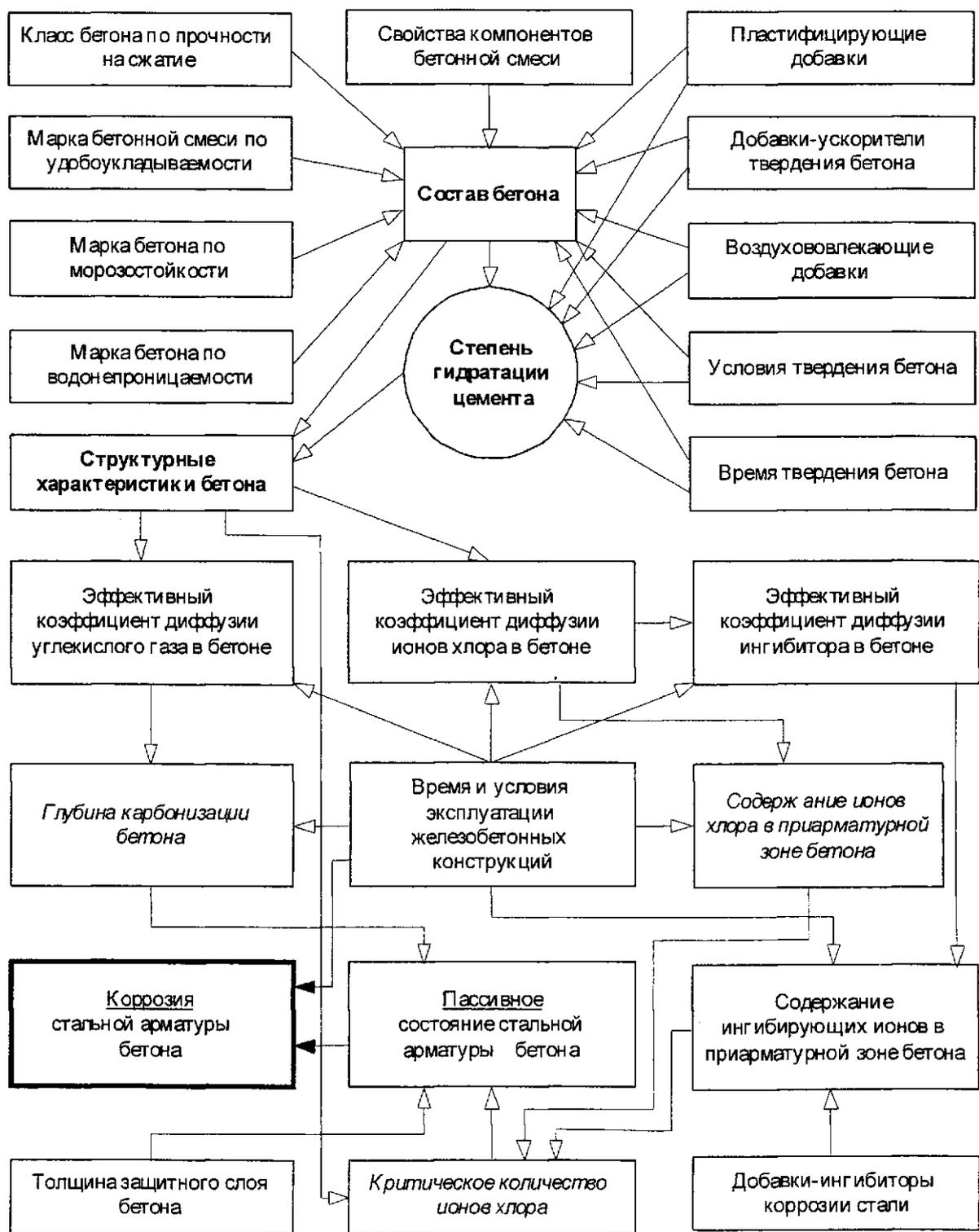


Рис. 1. Структурная схема расчета долговечности железобетонных конструкций

При воздействии солей-хлоридов решающую роль играет так называемая их критическая концентрация. Обычно полагают, что 0,4 % (от массы цемента) хлоридов в пересчете на ионы хлора является достаточно гарантированной границей пассивного состояния стальной арматуры. На наш взгляд, назначение критической концентрации хлор-ионов в единицах массы цемента является не совсем удачной для уже готовой конструкции. На стадии изготовления изделия это вполне приемлемо, поскольку в технологии бетона принято дозировать добавки в долях именно от массы вяжущего. Но в затвердевшем бетоне, с уже достаточно стабилизированными процессами гидратации, количество вяжущего не играет существенной роли, а все определяется структурой бетона, его проницаемостью для агрессивных ионов и депассиватора, каковым является кислород воздуха.

Например, имеется две аналогичных конструкции, но с различным исходным расходом цемента - 200 и 600 кг на 1 м³ бетона. В их приарматурную зону проникли хлор-ионы в количестве 0,4 % от массы цемента, т.е. формально накоплена критическая концентрация. Но для первой конструкции содержание хлор-ионов будет в три раза меньше, чем для второй, а с точки зрения депассивации стали ситуации считаются идентичными. Конечно, можно рассуждать о химическом связывании хлор-ионов в гидро хлор алюминаты кальция, и это связывание тем выше, чем больше цемента. Но к тому же следует подчеркнуть, что процессы гидратации цемента практически закончены и связывание ионов хлора в оштутимых количествах маловероятно. К этому следует добавить и то, что расход цемента не всегда известен. В связи с этим необходимо, вероятно, оперировать таким удобным (при экспериментальном определении хлоридов в бетоне действующих конструкций) параметром, как количество хлор-ионов в долях от массы растворной части бетона. В этом случае исключается инертный объем в виде крупного заполнителя, а оценка производится фактически от объема (или массы) среды (растворной части), именно которая и накапливает ионы хлора.

Наши исследования и данные других авторов показывают, что критическое содержание хлор-ионов гарантированно составляет около 0,15 % от массы растворной части бетона. При наличии ингибирующих добавок в бетоне критическая концентрация хлор-ионов $Cl_{кр}^n$ повышается и может быть рассчитана (в % от массы растворной части бетона) по выражению:

$$Cl_{кр}^n = Cl_{кр} + K_{эф} \cdot C_{ингч}, \tag{8}$$

где $Cl_{кр}$ – критическая концентрация хлор-ионов, % от массы растворной части бетона без добавки ингибитора (может быть принята 0,15 %); $C_{ингч}$ – количество ингибитора в бетоне, % от массы растворной части бетона; $K_{эф}$ – коэффициент эффективности ингибитора (может быть принят по таблице).

Коэффициент эффективности действия ингибитора

Ингибитор	$K_{эф}$	Ингибитор	$K_{эф}$
Нитрит натрия	1,33	Бихромат натрия	1,10
Нитрит-нитрат кальция	0,49	Бихромат калия	0,98
Тетраборат натрия	1,02	ПО-1	2,00

Текущее количество ингибитора (в % от массы растворной части бетона) может быть определено следующим образом:

$$C_{ингч} = \frac{C_{ин} \cdot \mathcal{U}}{\rho_b - \mathcal{U}} \cdot 100, \tag{9}$$

где $C_{ин}$ – количество ингибитора в бетоне, % от массы цемента; \mathcal{U} – расход крупного заполнителя в 1 м³ бетона, кг; ρ_b – плотность бетона, кг/м³.

Кинетику накопления хлор-ионов в бетоне также удобно оценивать не по их концентрации в поровой жидкости C_x , а также в долях от растворной части. И переход от концентрации хлоридов в поровой жидкости бетона к количеству (в %) от массы растворной части бетона может быть осуществлен так:

$$Cl_x = 0,02 \cdot C_x \cdot \omega_b. \tag{10}$$

В выражении (10) ω_b представляет собой влагосодержание бетона по массе (в %), которое зависит от структурных особенностей бетона и внешних условий эксплуатации, характеризующих относительную влажность воздуха. Эта характеристика бетона также может быть рассчитана. Например, И.Б. Заседателев [6], обработав изотермы сорбции бетона, получил следующую зависимость: при достаточной точности (расхождение не превышает 5 %) они могут быть приведены к двум прямым.

$$\text{При } 0 < \varphi \leq 0,8 \quad u = \Theta \cdot [0,0006 - (B/C - 0,3) \cdot 0,00094]. \quad (11)$$

$$\text{При } 0,8 < \varphi \leq 1,0 \quad u = (\Theta - 46,5) \cdot [0,000391 - (B/C - 0,3) \cdot 0,00041]. \quad (12)$$

Согласно выражениям (11) и (12) кинетика сорбции бетона определяется водоцементным отношением бетонной смеси (B/C), что косвенно характеризует структуру бетона, и потенциалом массопереноса (Θ), который, в свою очередь, связан с относительной влажностью воздуха (φ в долях единицы):

$$\Theta = 16,5 + 60 \cdot \varphi^2 \cdot \sqrt{-\lg(1 - \varphi)^2}. \quad (13)$$

И.Б. Заседателев полагает, что формула, несмотря на ее приближенность, справедлива при относительной влажности воздуха более 0,3.

Таким образом, систематизированы зависимости, которые при наличии данных о диффузионной проницаемости бетона в тех либо иных эксплуатационных условиях позволяют прогнозировать длительность пассивного состояния стальной арматуры железобетонных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев С.Н. Коррозия арматуры и повышение защитного действия бетона // Бетон и железобетон. - 1986.-№7.-С. 3 - 4.
2. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузев; Под общ. ред. В.М. Москвина. -М.: Стройиздат, 1980. - 563 с.
3. Леонович С.Н. Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: Сб. тр. VII Междунар. науч.-метод. семинара / Под ред. Н.П. Блещика, А.А. Борисевича, Т.М. Пецольда. - Брест: БГТУ, 2001. - С, 432 - 434.
4. Бабицкий В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: Сб. тр. VII Междунар. науч.-метод. семинара / Под ред. Н.П. Блещика, А.А. Борисевича, Т.М. Пецольда. - Брест: БГТУ, 2001.- С. 211 -215.
5. Алгоритмы и программы на Бейсике: Учеб. пособие для студентов пед. ин-тов по физ.-мат. спец. / Я.Т. Гринчишин, В.И. Ефимов, А.Н. Ломакович. - М.: Просвещение, 1988. - 160 с.
6. Заседателев И.Б., Петров-Денисов В.Г. Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений. - М.: Стройиздат, 1973. - 168 с.