

при уменьшенном на (100 – 150 кг) расходе цемента на 1 м<sup>3</sup>. Это позволяет существенно снизить стоимость 1 м<sup>3</sup> бетона.

Таблица 1  
Зависимость теплопроводности бетона от объемного веса

Физико-механические и тепло-физические показатели	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4	Состав 5
Плотность кг/м <sup>3</sup>	180	220	230	275	310
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,07	0,08	0,095	0,1	0,11

**Выводы и перспективы дальнейшего исследования в данном направлении.** Установлены зависимости плотности и теплопроводности пенополистиролбетона от количественного и качественного состава пенообразователя, определены оптимальные соотношения прочностных и теплофизических характеристик исследуемого материала.

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП II -3 – 79.Строительная теплотехника /Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. -32с.
2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М.: Технопроект, 1998. – с.768.
3. Ярмаковский В.Н., Хаймов И.С. Модифицированный полистиролбетон // Наука и технология в промышленности. 2001.№2.
4. Симонов М.З. Основы технологии легких бетонов. М.: Стройиздат.1973. – С.584.
5. Опекунов В.В. Конструкционно – теплоизоляционные бетоны. – К.: Академперіодика, 2002. – 270с.
6. В.Г. Довжик, В.Н. Россовский. Технология и свойства полистиролбетона для стеновых конструкций / Бетон и железобетон,№2,1997, с 5-9.

УДК 69.059.2

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕТОНА ЗАЩИТНОГО СЛОЯ РЕМОНТНОЙ СИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

*Савицкий А.Н., магистр, Пилинько А.Н., д.т.н., проф.,  
Савицкий Н.В.\*, д.т.н., проф.*

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта,*

*\*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры*

**Актуальность проблемы и постановка задачи исследования.** В настоящее время перспективным направлением при проектировании ремонтных систем является использование концепции совместимости [1-3].

“Совместимость” - равновесие физических, химических, электрохимических и деформационных характеристик между ремонтным материалом и бетоном ремонтируемой конструкции, обеспечивающее способность конструкции после ремонта сопротивляться напряжениям, вызванным действием объемных деформаций, химическими и электрохимическими воздействиями без отказов и повреждений в течении регламентируемого срока службы.

*Электрохимическая совместимость* ремонтного материала обеспечивает условия недопущения развития процесса коррозии арматуры.

В практике проектирования ремонтных систем отсутствуют количественные зависимости для прогнозирования срока службы бетона защитного слоя, поэтому разработка методов проектирования параметров бетона защитного слоя является актуальной задачей.

**Цель** настоящей работы – разработка количественной методики проектирования параметров бетона защитного слоя ремонтной системы по критерию электрохимической совместимости, что обеспечивает условия недопущения развития процесса коррозии арматуры.

Под коррозией металлов понимается процесс их разрушения, вызванный химическим или электрохимическим воздействием среды. Коррозия арматуры в бетоне – электрохимический процесс, для протекания которого необходимы следующие условия [4]:

- 1) наличие разности потенциалов между отдельными участками поверхности металла, т.е. электрохимическая неоднородность;
- 2) наличие электрохимической связи между участками;
- 3) активное состояние поверхности на анодных участках где металл растворяется по реакции:  $n\text{H}_2\text{O} + \text{Me} - \text{Me}^+ - n\text{H}_2\text{O} + e$ ;
- 4) наличие деполяризатора ( $\text{O}_2$ ) для ассимиляции избыточных электронов:  $4e + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} - 4\text{OH}$ ;

Опасность коррозии арматуры наступает при нейтрализации бетона кислыми газами и воздействии ионов-активаторов.

Коррозия арматуры в бетоне, как правило, лимитируется третьим условием. Отсутствие ее объясняется пассивностью стали в щелочной среде, т.е. неспособностью к растворению по приведенной реакции. Все известные случаи коррозии арматуры связаны с тем, что ее поверхность остается активной вследствие ряда причин или не полностью пассивируется при изготовлении конструкции, либо теряет пассивность в процессе эксплуатации.

Пассивность определяется как состояние повышенной коррозионной устойчивости металла вследствие образования беспористого слоя продуктов реакции, например оксида, препятствующего непосредственному взаимодействию металла и электролита. Это состояние возникает при потенциалах выше некоторого определенного значения, которое зависит от природы и состава электролита, особенно от значения рН (выше 12...12,5). Однако рН среды не может однозначно характеризовать состояние стали в бетоне, так как в нем могут находиться активизирующие ионы (хлорид-ионы, сульфат-ионы и др.). Такое действие ионо-активаторов объясняется их способностью, адсорбируясь на поверхности стали, вытеснять кислород, участвующий в образовании пассивирующей пленки.

Кинетику разрушения бетона в газовых средах необходимо учитывать при прогнозе долговечности железобетонных конструкций по признаку сохранности арматуры. Как было показано, арматура может корродировать в агрессивной среде, если защитный слой бетона полностью разрушен, ширина раскрытия трещин превышает допустимую, если бетон нейтрализован или оказался проницаемым для солей-активаторов (в частности, хлоридов). Все эти варианты встречаются в практике эксплуатации конструкций в агрессивной газовой среде.

В зависимости от свойств образующихся солей газы разделяют на три группы. К первой относят газы, образующие нерастворимые или малорастворимые соли кальция (двуокись углерода, фтористый водород, фосфорный ангидрид, пары щавелевой кислоты, фтористый кремний). Железобетонные конструкции повреждаются при действии этих газов вследствие коррозии арматуры после нейтрализации защитного слоя бетона.

Вторую группу составляют газы, образующие слаборастворимые кальциевые соли, которые в свою очередь образуют кристаллогидраты (сернистый и серный ангидриды, сероводород, сероуглерод). Железобетонные конструкции в этом случае повреждаются вследствие коррозии арматуры после нейтрализации защитного слоя. При высокой влажности помимо этого наблюдается послойное разрушение бетона, вызванное внутренними напряжениями при росте кристаллогидратов.

В третью группу входят газы, образующие хорошо растворимые гигроскопические соли. При повышенной влажности воздуха эти соли, поглощая водяной пар, образуют растворы. Последние в результате капиллярного всасывания и диффузии в жидкой фазе способны проникать в глубь бетона. Вследствие растворения кальциевых солей или их кристаллизации постепенно разрушается поверхностный слой бетона. Соли могут быть агрессивными, способными уже в малой концентрации вызвать коррозию стали еще до нейтрализации защитного слоя бетона (хлористый водород, хлор, двуокись хлора, пары брома, йода, монохлоруксусной кислоты), или нейтральными по отношению к арматуре (оксиды азота, пары азотной кислоты и др.).

В агрессивной воздушной среде количественно преобладает  $\text{CO}_2$ , его концентрация в 100...1000 раз превышает концентрацию других кислых газов, поэтому взаимодействие бетона с углекислым газом (карбонизация) является ведущим процессом его нейтрализации.

Как указывалось, коррозия арматуры в бетоне может возникнуть при наличии защитного слоя бетона: а) при уменьшении щелочности окружающего арматуру электролита до рН, равного или меньше 12 при карбонизации или коррозии бетона; б) при активирующем действии хлорид-ионов.

Длительность защитного действия бетона в атмосфере газов первой и второй групп определяют по уравнениям диффузии в газовой фазе бетона. В общем случае кинетику нейтрализации следует рассчитывать с учетом переменной по сечению проницаемости бетона.

Рассмотрим методику прогнозирования длительности защитного

действия бетона на примере карбонизации бетона. Расчетная схема процесса нейтрализации бетона кислотными газами и возникновения опасности коррозии арматуры при воздействии ионов-активаторов приведена на рис. 1.

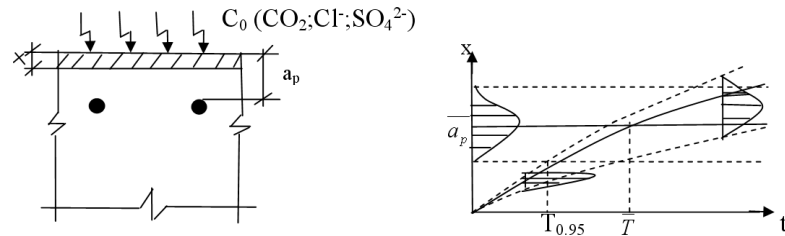


Рис. 1. Расчетная схема процесса нейтрализации бетона кислотными газами и возникновения опасности коррозии арматуры при воздействии ионов-активаторов

Расчетные формулы для определения сроков карбонизации бетона основаны на следующих допущениях [5]:

- падение концентрации  $\text{CO}_2$  в порах бетона принимается линейным;
- у поверхности бетона концентрация  $\text{CO}_2$  соответствует концентрации его в окружающем воздухе, а в зоне химической реакции равна нулю;
- градиент концентрации  $\text{CO}_2$  для небольших отрезков времени является постоянной величиной.

Сделанные допущения позволяют использовать для расчетов уравнение первого закона Фика:

$$dm = \frac{DA(C_0 - C)}{x} dt \quad (1)$$

где  $dm$  – количество углекислого газа, диффундировавшего через поверхность бетона за время  $dt$ ;

$D$  – эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в карбонизированном бетоне;

$A$  – площадь поверхности бетона, через которую диффундирует углекислый газ;

$C_0, C$  – концентрация углекислого газа соответственно у поверхности бетона и в зоне поглощения;  $x$  – толщина карбонизированного слоя бетона.

За бесконечно малый промежуток времени  $dt$  элементарное количество углекислого газа, поглощенного бетоном:

$$dm = m_0 \cdot A dx \quad (2)$$

где  $dm$  – количество углекислого газа, поглощенного единицей объема бетона, или объемная концентрация связанного  $\text{CO}_2$ . Объединением (1) и (2), получается:

$$m_0 \cdot A dx = \frac{DA(C_0 - C)}{x} dt. \quad (3)$$

После разделения переменных и интегрирования уравнения (3):

$$\frac{x^2}{2} = \frac{D(C_0 - C)}{m_0} t, \quad (4)$$

При  $C=0$  получается зависимость для определения времени карбонизации бетона [5]:

$$t = \frac{m_0 x^2}{2DC_0}. \quad (5)$$

Величина  $m_0$  называется реакционной емкостью (способностью) бетона:

$$m_0 = V_{CO_2} / V_{CC}, \quad (6)$$

где  $V_{CO_2}$  – объем газообразной углекислоты при нормальных температуре и давлении, поглощенной единицей объема карбонизированного бетона  $V_{CC}$ .

Для определения реакционной способности бетона  $m_0$  вычисляется объем 1 г  $CO_2$ . Из соотношения объема 1 моль углекислого газа (22,4 дм<sup>3</sup>/моль) и его массы – 44 моль (12 + 16·2) находится объем 1 г  $CO_2$ : 22,4/ 44 = 0,51 дм<sup>3</sup>.

При карбонизации бетона единицей его объема поглощается  $m_0$  объемов  $CO_2$ .

$$m_0 = C \cdot k \cdot 0,51, \quad (7)$$

где  $C$  – расход цемента, кг/м<sup>3</sup> или г/дм<sup>3</sup> бетона;

$k$  – массовая доля связанной  $CO_2$  в цементе.

При известном содержании основных оксидов в цементе в пересчете на  $CaO$  в относительных величинах по массе (по данным химического анализа цемента) –  $p$  и степени нейтрализации бетона  $f$ , равной отношению количества основных оксидов, прореагировавших с газом, к общему их количеству в цементе, с учетом эквивалентного отношения  $CO_2/CaO = 44/56$ , выражение (7) запишется в виде ( $k = fp \cdot CO_2/CaO$ ):

$$m_0 = f_p C \cdot 0,51(44/56) = 0,4f_p C, \quad (8)$$

Для приближенных расчетов величины  $p$  и  $f$  можно принять равными 0,6 каждая [5]. Тогда реакционная емкость бетона оказывается пропорциональной лишь расходу цемента в бетоне:

$$m_0 = 0,4 \cdot 0,6 \cdot 0,6 C = 0,144 C \quad (9)$$

Другой характеристикой, определяющей карбонизацию бетона и его

проницаемость, является элективный коэффициент диффузии. Его значение зависит от структуры бетона - размера и количества пор, их формы и извилистости. Эти параметры определяются видом цемента, водоцементным отношением, составом бетона и другими технологическими факторами. Существенно влияют на коэффициент диффузии температура и влажность среды. При снижении температуры наблюдается уменьшение коэффициента диффузии.

Более сложный характер на скорость карбонизации оказывает влажность. При отсутствии влаги в порах бетона проницаемость его максимальная, но при этом практически не происходит взаимодействие  $\text{CO}_2$  и  $\text{CaO}$  цементного камня. При полном водонасыщении практически прекращается доступ  $\text{CO}_2$  в бетон. Поэтому наибольшая скорость карбонизации наблюдается при влажности окружающего воздуха  $\varphi = 50 \dots 75\%$ .

Эффективный коэффициент диффузии для бетона на портландцементе при расходе цемента  $300 \dots 500 \text{ кг/м}^3$  и  $\text{В/Ц} = 0,4 \dots 0,6$  и влажности воздуха  $\varphi = 60\%$  аппроксимируется зависимостью [6]:

$$D = [10^{-4} \cdot 10 \exp(B/\text{Ц} - 0.4)/0.27] f(\varphi) f(t^0) \quad (10)$$

где  $f(\varphi), f(t^0)$  - коэффициенты учитывающие влияние влажности и температуры на коэффициент диффузии:

$$f(t^0) = 1 + 0.026(t^0\text{C} - 20), \quad (11)$$

где  $t^0\text{C}$  - температура.

**Пример.** Определить срок службы защитного слоя бетона ремонтной системы толщиной 10 мм. Конструкция изготовлена из бетона с расходом портландцемента  $300 \text{ кг/м}^3$  при  $\text{В/Ц} = 0,5$  и эксплуатируется в среде с концентрацией углекислого газа  $\text{C}_0 = 0,03\%$  при относительной влажности воздуха  $\varphi = 60\%$

**Решение.** По формуле (10) определяем значение эффективного коэффициента диффузии:

$$D = 10^{-4} \cdot 10^{(B/\text{Ц} - 0.4)/0.27} = 10^{-4} \cdot 10^{(0.5 - 0.4)/0.27} = 2,34 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Используя зависимость (9), находим реакциюную емкость бетона:

$$m_0 = 0,144\text{Ц} = 0,144 \cdot 300 = 43,2 \text{ кг/м}^3.$$

Срок службы защитного слоя бетона вычисляем по формуле (5):

$$t = \frac{m_0 x^2}{2DC_0} = \frac{43,2 \cdot 1^2}{2 \cdot 2,34 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0003 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 9,75 \text{ год}.$$

Пассивная пленка на поверхности стальной арматуры может быть разрушена не только в результате понижения рН контактирующего с ней бетона, но и воздействием ионов хлора.

При воздействии газов третьей группы, а также растворов, содержащих хлориды, вопрос о длительности защитного действия бетона решается следующим образом. Определяют критическое содержание соли в бетоне, при котором наступает депассивация стали. Например, для хлористых солей это количество равно примерно 0,2% хлорид-ионов массы растворной (цементно-песчаной) части бетона. Затем рассчитывают диффузию солей в жидкой фазе бетона, имея в виду, более быстрое их проникание, по сравнению с перемещением фронта нейтрализации, а также возможное послойное разрушение бетона.

Длительность периода, в течение которого у поверхности арматуры накопится соль в количестве, способном вызвать коррозию (критическая концентрация), можно определить, используя второй закон Фика [5]:

$$\frac{dC}{dt} = -D \frac{d^2C}{dx^2}, \quad (12)$$

где  $t$  – время диффузии, с;

$D$  – эффективный коэффициент диффузии,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;

$C$  – концентрация хлорид-ионов, г/л;

$x$  – глубина диффузии, см.

Граничные условия для полубесконечного тела следующие:

$t$	$0 < x < \infty$	$x = 0$
0	$C = C_0$	$C = C_0$
$> 0$	$C = f(x, t)$	$C = C_0$
$\infty$	$C = C_0$	$C = C_0$

т.е. принимается, что концентрация хлоридов на поверхности постоянна и равняется  $C_0$ .

Решение уравнения (12) при указанных граничных условиях имеет вид:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \text{erf}z, \quad (13)$$

или

$$C = C_0(1 - \text{erf}z) \quad (14)$$

где

$$z = \frac{x}{2\sqrt{D\tau}}, \quad (15)$$

$\text{erf}z$  – интеграл вероятностей:

$$\text{erf}z = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt, \quad (16)$$

Интеграл вероятностей можно определить, используя табличные значения из справочной литературы или формулу:

$$\operatorname{erf}z = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n z^{2n+1}}{n!(2n+1)}. \quad (17)$$

Вычисления по формуле (17) довольно громоздки, так как требуется удерживать значительное количество членов ряда. Поэтому для практических расчетов рекомендуется зависимость:

$$\operatorname{erf}z = 2P(z\sqrt{2}) - 1, \quad (18)$$

где  $P$  – функция нормального распределения, определяется по справочным таблицам или приближенно по формуле:

$$P(z\sqrt{2}) = 1 - y(z\sqrt{2})(b_1x + b_2x^2 + b_3x^3), \quad (19)$$

$$y(z\sqrt{2}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2},$$

$$x = 1/(1 + pz\sqrt{2}),$$

$$p = 0,33267; b_1 = 0,4361836; b_2 = -0,1201676; b_3 = 0,937298.$$

Для расчета сроков службы необходимо располагать данными о критической концентрации хлорид-ионов в жидкой фазе бетона, при которой развивается коррозия арматуры. На основании анализа имеющихся данных можно полагать, что коррозия стали в насыщенном растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  начинается развиваться при концентрации хлорид-ионов 0,03...0,05%.

Срок службы бетона при известных параметрах среды и бетона

$$C_u = C_0(1 - \operatorname{erf}z), \quad (20)$$

где  $C_u$  – критическая концентрация хлорид-ионов;

$z$  – определяется по (15) при  $x = a_p, a_p$  – защитный слой бетона.

Уравнение (20) относительно  $t$  решается методом последовательных приближений.

**Выводы.** Разработана количественная методика проектирования бетона защитного слоя ремонтной системы по критерию недопущения коррозии арматуры в результате нейтрализации бетона защитного слоя или воздействия ионов –активаторов. Приведен пример расчета долговечности бетона защитного слоя ремонтной системы.

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савицкий Н.В. Методология проектирования систем для ремонта железобетонных конструкций // Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж / Матеріали наук.-практ. конф. (м. Донецьк, 9-12 червня 2003 р.) – Донецьк: УАМК, 2003.- С. 296-299.
2. Савицкий Н.В., Пшинько А.Н., Савицкий А.Н. Теоретические основы и



- практические результаты разработки технологий ремонта железобетонных и каменных конструкций / Строительные материалы и изделия, №3 (17), 2003.- С. 31-33.
3. Пшинько А.Н., Савицкий Н.В., Савицкий А.Н. Методология количественного проектирования систем для ремонта железобетонных конструкций // Новини науки Придніпров'я.- 2002, №6.- С. 12-18.
  4. Савицкий А.Н., Пшинько А.Н., Савицкий Н.В. Постановка задач по обеспечению долговечности арматуры железобетонных конструкций в агрессивных средах// Сб. научн. Тр. ПГАСА. Вып.11.- Дн-ск: ПГАСА, 2000.- С.84-86.
  5. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. – М.: Стройиздат, 1976. - 205 с.
  6. Савицкий Н.В. Основы расчета надежности железобетонных конструкций в агрессивных средах // Дисс...д.т.н.-Дн-ск: ДИСИ - НИИЖБ, 1994.- 400 с.

УДК 624.072.2

**ОБЪЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ В КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ  
МОНОЛИТНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ С ЛИСТОВОЙ  
ГОФРИРОВАННОЙ АРМАТУРОЙ**

*И.В. Санников, к.т.н., с.н.с.,*

*Открытое акционерное общество "Украинский зональный научно-исследовательский и проектный институт по гражданскому строительству" – ОАО "КиевЗНИИЭП", Киев*

**Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими задачами.** При построении детерминировано-стохастических численных моделей монолитной железобетонной плиты с листовой гофрированной арматурой и их конструктивных реализаций необходимо идентифицировать величины, оптимизировать параметры конструктивных элементов. Оптимизируемый объект (модель или конструкция) описывается совокупностью переменных, обеспечивающей появление объекта на множестве случайных реализаций.

**Анализ публикаций.** Задача идентификации величин численных моделей и получения оптимальных конструкций решается методом «пространства состояний» или «фазовым методом», описанным, в частности, Хогом и Аророй [1]. Суть метода вытекает из самой схемы построения модели или, в общем случае, из технологии проектирования. В задачах [2,3,4,5,6,7, 8,9,10,11, 12, 13] выбирают величины  $b_1, b_2, \dots, b_k$ , называемые переменными проектирования (в векторной форме  $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_k]^T$ ). На переменные проектирования накладывают физически или экономически обусловленные ограничения (размер, вес, стоимость), а к самой конструкции предъявляют функционально или технологически обусловленные требования, что вместе определяет множество допустимых значений  $\mathbf{r}$  ( $\mathbf{b} \in \mathbf{r}$ ). При