

**Плосконосов Владимир Николаевич**, канд. техн. наук, доцент,  
профессор кафедры ТБ и СМ, УО «БрГТУ», г. Брест

**Добрунова Валентина Михайловна**, старший преподаватель кафе-  
дры ТБ и СМ, УО «БрГТУ», г. Брест

**Замировский Александр Викторович**, студент, УО «БрГТУ», г. Брест

**Тур Виктор Владимирович**, доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой ТБ и СМ,  
УО «БрГТУ», г. Брест

## **МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ БЕТОНА В ХЛОРОСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ**

### **TEST METHODS FOR ASSESSMENT OF CLORIDE PERMABILITY OF THE CONCRETE ACCORDANCE WITH EUROPIAN STANDARDS**

#### **Аннотация**

*В статье в краткой форме представлены общие положения вероятного подхода к проектированию конструкций с заданным сроком службы в соответствии с требованиями Model Code Service Life Design (MC SLD). Рассмотрены и проанализированы опытные методы определения параметров проницаемости бетона в хлоросодержащих средах, являющиеся базисными переменными в расчетных моделях MC SLD.*

#### **Abstract**

*Article in general form presents probability approach to assessment of chloride ingress in concrete in accordance with Model Code Service Life Design (MC SLD). In short form article presents test methods for testing chloride ingress in concrete (diffusion test, migration test, indirect test based on resistivity and conductivity).*

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Действующие в настоящее время строительные нормы проектирования железобетонных конструкций, включая и базовый документ ТКП EN1990, содержат главным образом описательные правила и требования, направленные на достижение требуемой долговечности. Эти описательные правила, в частности, для бетона, включены

в сопутствующие стандарты в виде некоторых верхних или нижних пределов требуемых свойств материала. Так, например, СТБ EN206-1 регулирует требования долговечности для соответствующего класса бетона по прочности путем установления пределов максимального водоцементного отношения, минимального содержания цемента, минимальной толщины защитного слоя и т. д. Эти показатели в свою очередь нормируют в зависимости от условий эксплуатации для соответствующего класса экспозиции конструкции (X0, XC, XD, XF, XA). Кроме того, вводятся дополнительные правила, направленные на обеспечение так называемой «вторичной» защиты от агрессивных влияний окружающей среды.

Следует отметить, что объективное сравнение различных мероприятий и рекомендаций, направленных на достижение требуемой долговечности, равно как и проектирование на заданный срок службы по методу предельных состояний [9], является сложной, а в ряде случаев почти невыполнимой задачей.

Кроме того, необходимо обратить внимание на имеющееся противоречие: с одной стороны, пользуясь методами предельных состояний, конструкционные нормы (например ТКП EN1992-1) основаны на расчетных моделях сопротивлений и эффектов воздействий, позволяющих производить количественную оценку параметров надежности (индексов надежности, вероятностей отказа), а с другой – нормирование долговечности (в рамках тех же норм) базируется на описательных подходах.

Рост проблем, связанных с долговечностью и повреждениями железобетонных конструкций при их последующей эксплуатации, вызывает необходимость разработки не только основных описательных подходов к обеспечению долговечности на уровне проектирования заданных свойств бетона, но и к разработке новых расчетных методов в рамках традиционных процедур конструкционного проектирования с учетом количественного определения сроков службы конструкции, базируясь на единой основе метода предельных состояний [9].

Это означает, что количественные модели воздействий (воздействий и влияний окружающей среды) в рамках метода частных коэффициентов следует формулировать в вероятностной или полувероятностной постановке.

Как показано в [8], при разработке методов проектирования с учетом требуемого срока эксплуатации (службы) конструкции, следует рассматривать следующие основные этапы.

**Первым этапом** при формулировании положений расчетного подхода является установление модели деградационного процесса бетона при заданном воздействии окружающей среды, опираясь на физико-химические модели сопротивления, содержащие аналитические зависимости, описывающие с необходимой точностью (при установленной ошибке моделирования) процессы коррозии. По- существу, пользуясь терминологией ТКП EN 1990 [9], этот этап предполагает формирование модели сопротивления.

**Вторым этапом** является определение предельных состояний, которые требуют проверки при проектировании конструкции. Согласно [9] предельными состояниями долговечности, требующими проверки при проектировании, принято считать:

- состояние депассивации стальной арматуры в результате карбонизации бетона;
- состояние образования трещин, вызванное увеличением объема продуктов коррозии;
- состояние истощения несущей способности элемента из бетона в результате чрезмерной потери площади поперечного сечения арматуры при развитии коррозионных процессов либо потери сцепления арматуры с бетоном на приопорных участках.

**Третьим этапом** является расчет вероятности непревышения выделенных предельных состояний. Для этого в моделях сопротивления, сформулированных на первом этапе, используют базисные переменные, представленные соответствующей функцией распределения со своими статистическими параметрами (средним и стандартным отклонением). При рассчитанных значениях вероятностей отказа, связанных согласно [9] с соответствующими значениями индексов надежности  $\beta$ , выполняются проверки предельных состояний.

**Четвертым этапом** является установление типа предельного состояния, для которого выполняется проверка. Так, например, состояние депассивации арматуры обычно причисляют к предельным состояниям эксплуатационной пригодности, так как его реализация не оказывает непосредственного влияния на конструктивную безопасность. Тогда в соответствии с ТКП EN 1990 [9], индекс надежности может быть принят в пределах от 1,0 до 1,5. Вместе с тем пользователь или заказчик может предъявлять повышенные требования к индексу надежности, если в этом есть экономическая целесообразность. Для состояний, связанных с трещинообразованием и отслоением защитного слоя, собственно эксперт должен

принять решение о выборе предельного состояния. Например, если коррозионное трещинообразование и последующее отслаивание бетона развивается в пределах зоны длины анкеровки арматуры, это может привести к потере сцепления арматуры и хрупкому обрушению конструктивного элемента. В этом случае проверяемое состояние может быть отнесено к предельным состояниям несущей способности (ULS), а в других случаях – к предельным состояниям эксплуатационной пригодности (SLS).

### МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРРОЗИОННЫМ ПОВРЕЖДЕНИЯМ КОНСТРУКЦИИ ИЗ БЕТОНА ПРИ ДЕЙСТВИИ ХЛОРИДОВ

Как было показано ранее, при реализации первого этапа необходимо опираясь на законы, описывающие физико-химические явления развития коррозионного процесса, сформулировать модель сопротивления бетона. В случае хлоридной коррозии для бетонных элементов, работающих без трещин в эксплуатационной стадии, в Model Code Service Life Design [8] предложена следующая функция состояния депассивации арматуры:

$$p\{ \} = p_{dep} = p\{C_{crit} - C(a, t_{se}) \leq 0\} \leq p_{tag}, \quad (1)$$

где  $p\{ \}$  – вероятность наступления депассивации арматуры;

$C_{crit}$  – критическое содержание хлоридов (в % от весового содержания вяжущего);

$C(a, t_{se})$  – содержание хлоридов по глубине сечения бетона в момент времени  $t$  (в % от весового содержания вяжущего);

$a$  – толщина защитного слоя бетона, мм;

$t_{se}$  – расчетный срок службы конструкции, лет;

$p_{tag}$  – целевое значение вероятности отказа при проверках предельного состояния депассивации, которое может быть принято по табл. 1.

Критическая концентрация хлорид-ионов  $C_{crit}$  в функции состояния (1) определяется по модели, предложенной в [8], основанной на исследованиях [5-7]:

$$C_{crit} = C(x = a, t) = C_0 + (C_s, \Delta x - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,c} \cdot t}} \right) \right], \quad (2)$$

где  $C_{crit}$  – критическое содержание хлорид-ионов [wt-%/c];

$C(x, t)$  – содержание хлоридов в бетоне на глубине  $x$  (поверхность конструкции  $x = 0$  м) в момент времени  $t$  [wt-%/c];

**Рекомендуемые минимальные значения индексов надежности  $\beta$**   
**(для расчетного срока службы) согласно [8]**

Класс эксплуатации согласно EN206-1 и ТКП EN1992-1	Описание	Класс надежности по ТКП EN 1990	SLS	ULS
			депассивация	обрушение
XD	Хлоридная коррозия	RC1		$3,7(pf \approx 10^{-4})$
		RC2	$1,3(pf \approx 10^{-1})$	$4,2(pf \approx 10^{-5})$
		RC3		$4,4(pf \approx 10^{-6})$

Примечание. SLS – предельное состояние эксплуатационной пригодности;  
 ULS – предельное состояние несущей способности

$C_0$  – начальное содержание хлорид-ионов в бетоне [wt-%/c];

$C_{s,\Delta x}$  – содержание хлорид-ионов на глубине  $\Delta x$  в определенной временной точке  $t$  [wt-%/c];

$x$  – глубина с соответствующим содержанием  $C_{s,\Delta x}$  (мм);

$a$  – толщина защитного слоя бетона;

$\Delta x$  – глубина зоны конвекции (слой бетона, выше которого процесс проникновения хлоридов отличается от второго закона Фика), мм;

$D_{app,c}$  – фактический коэффициент диффузии через бетон [ $mm^2/год$ ];

$t$  – время, в годах;

$erf$  – функция ошибки.

Как отмечено в работе [4], большинство опытных наблюдений показывает, что транспорт (перенос) хлор-ионов в бетоне контролируется диффузией. Поэтому модель сопротивления (2) основывается на втором законе диффузии Фика. При этом следует принимать во внимание, что в реальных условиях поверхность бетона эксплуатируется в условиях, которые характеризуются увлажнением и испарением. Эту зону, располагаемую близко к поверхности, обычно определяют как «зону конвекции». Так как механизм переноса в этой зоне не контролируется главным образом процессом диффузии, применение подхода, основанного на втором законе Фика (законе диффузионных полей), не может рассматриваться для моделирования проникновения хлорид-ионов во внутрь зоны конвекции.

В связи с этим второй закон Фика применим вне зоны конвекции. При этом концентрацию хлоридов в расчетной модели (2) следует принимать на уровне поверхности слоя, отстоящего на расстоянии  $\Delta x$  от открытой наружной поверхности  $C_{s,\Delta x}$  (здесь  $\Delta x$  обозначает глубину слоя конвекции). С учетом принятого упрощения второй закон Фика можно считать хорошей аппроксимацией профиля распределения хлоридов на глубине  $x \geq \Delta x$ .

Коэффициент диффузии хлоридов в бетон, принимаемый в модели (2), может быть определен согласно [8] из выражения:

$$D_{app,c} = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A_t, \quad (3)$$

где  $k_e$  – коэффициент, учитывающий влияние окружающей среды, определяемый по формуле:

$$k_e = \exp \left[ b_e \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right], \quad (4)$$

здесь:

$b_e$  – коэффициент регрессии [K];

$T_{ref}$  – стандартная температура при испытании [K];

$T_{real}$  – фактическая температура конструкционного элемента или окружающего воздуха [K];

$D_{RCM,0}$  – коэффициент миграции хлоридов (диффузионной проницаемости) [мм<sup>2</sup>/а];

$k_t$  – коэффициент переноса;

$A(t)$  – коэффициент, определяющий «возраст» бетона:

$$A(t) = \left( \frac{t_0}{t} \right)^\alpha, \quad (5)$$

$\alpha$  – степенной коэффициент, учитывающий возраст бетона определяемый согласно [8];

$t_0$  – время отнесения согласно [8].

В соответствии с указаниями, приведенными в [8], коэффициент диффузионной проницаемости  $D_{app,c}$  следует в общем случае определять опытным путем. Определенное значение  $D_{app,c}$  является постоянным средним значением, характеризующим период от начала эксплуатации до момента обследования, когда получают

профиль распространения хлоридов. Профили распространения хлоридов могут быть получены либо по результатам обследования существующей конструкции, либо путем испытания образцов, которые хранились в аналогичных условиях, что и эксплуатирующаяся конструкция. В связи с тем что определение  $D_{app,c}$  на опытных образцах (при проектировании новых конструкций) требует значительных временных и экономических затрат, в основном применяют эмпирическую модель, представленную выше выражением (3).

Следует отметить, что в последние годы разработаны и применяются ускоренные методы определения коэффициента  $D_{app,c}$ . Вместе с тем в работе [4] отмечается, что результаты, получаемые на экспресс-методах (ускоренных методах) должны всегда калиброваться на данных, полученных в натуральных условиях. По этой причине при разработке Model Code Service Life Design [8] были собраны и обобщены несколько сотен профилей распространения хлоридов, полученных из различных информационных источников, которые были разделены на отдельные группы данных. Далее эти профили рассматривались отдельно (данные, полученные на цементном камне с различными типами вяжущего, водоцементного отношения; при различных условиях эксплуатации – хлориды из воздушной среды, жидкой и т. д.)

Коэффициент миграции (коэффициент проницаемости) хлоридов  $D_{RCM,0}$  является базовым параметром, описывающим свойство материала с точки зрения развития хлоридной коррозии, а следовательно, и формирования соответствующей модели. При расчете проектного срока службы норма [8] рекомендует пользоваться данными, содержащимися в различных литературных источниках, в частности, в проекте этой нормы (табл. 2).

Следует отметить, что для бетонов с низкими значениями водоцементного (или водовяжущего) отношения при использовании гиперпластификаторов данные, приведенные в литературе, полностью отсутствуют. В связи с этим нормы [8] рекомендуют определять значение  $D_{RCM,0}$  опытным путем, используя, например, ускоренные методы (в частности, NT Build 492).

Прежде чем перейти к анализу методов, применяемых для опытного определения значений  $D_{RCM,0}$ , следует рассмотреть еще один важный, на наш взгляд, вопрос, связанный с применением модели (2). Как было показано выше, модель разработана для оценки проницаемости бетона в элементе, работающим без трещин. Скорость развития коррозионных процессов в области

Значение  $D_{RCM,0}$  для различных бетонных смесей согласно [8]

$D_{RCM,0}$ , м <sup>2</sup> /с	w/ceqv <sup>1)</sup>					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
ТКП цемента						
CEM I 42,5R	n*d <sup>2)</sup>	8,9*10 <sup>-12</sup>	10*10 <sup>-12</sup>	15,8*10 <sup>-12</sup>	19,7*10 <sup>-12</sup>	25*10 <sup>-12</sup>
CEM I 42,5 + FA(k=0,5)	n*d <sup>2)</sup>	5,6*10 <sup>-12</sup>	6,9*10 <sup>-12</sup>	9*10 <sup>-12</sup>	10,9*10 <sup>-12</sup>	14,9*10 <sup>-12</sup>
CEM I 42,5 + SF(k=2,0)	8,9*10 <sup>-12</sup>	4,8*10 <sup>-12</sup>	n*d <sup>21)</sup>	n*d <sup>21)</sup>	5,3*10 <sup>-12</sup>	n*d <sup>21)</sup>
CEM III/B 42,5	n*d <sup>2)</sup>	1,4*10 <sup>-12</sup>	1,9*10 <sup>-12</sup>	2,8*10 <sup>-12</sup>	3,0*10 <sup>-12</sup>	3,4; *10 <sup>-12</sup>

Примечания: <sup>1)</sup> эквивалентное содержание цемента означает, что для бетонов содержащих золу-унос (FA) или микрокремнезем (SF) выражено водо-вяжущим (или водо-твердым) отношением. Данные приведены для содержания (К): золы-уноса 5% по массе цемента, микрокремнезема – 22 % по массе цемента;

<sup>2)</sup> нет данных.

трещин, пересекающих арматуру, существенным образом зависит от условий микроклимата на поверхности бетона и собственно положения бетонной поверхности. Безусловно, что в более жестких условиях находятся горизонтальные бетонные поверхности, имеющих трещины в тех случаях, когда хлориды воздействуют через верхнюю поверхность (поврежденную трещинами). Для срока службы более 10 лет при частых воздействиях хлорид-ионов (например, плиты в перекрытиях паркингов в районах, где используют антиобледенители) необходимо применять специальные меры для исключения быстрого проникновения хлоридов к арматуре (например, защитные покрытия, облицовки и т. д.). В случае вертикальных поверхностей и горизонтальных поверхностей, на которые хлорид-ионы воздействуют с нижней стороны, при условии что толщина защитного слоя не менее 50 мм, водоцементное отношение менее 0,5 и ширина раскрытия трещин не превышает 0,3 мм, расчетный срок службы (не менее 50 лет) обеспечивается без дополнительных защитных мер.

Следует отметить, что в настоящее время в УО «БрГТУ» достаточно активно разрабатывают имитационные модели структуры бетонного композита, которые в скором времени позволят выполнить вероятностное моделирование процессов диффузии хлорид-ионов. Вместе с тем как для верификации предлагаемой расчетной имитационной модели диффузионной проницаемости, так и корректировки данных, применяемых при предварительных расчетах по модели (2), требуется проведение опытных исследований.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФфуЗИОННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ИОНОВ ХЛОРА В ЦЕМЕНТНОМ БЕТОНЕ

### Общие положения

Известно, что после насыщения капиллярно-пористой структуры цементного камня бетона водой со временем устанавливается равновесие между жидкой фазой и минералами цементного камня. Установившееся равновесие вследствие поступления в пористую структуру цементного бетона ионов из внешней среды из-за адсорбции их на твердой фазе цементного камня и происходящих химических реакций нарушается.

В исследованиях коррозионного разрушения цементного бетона при действии химически активных по отношению к цементному камню ионов жидкой среды одним из основных факторов, определяющих скорость разрушения, является скорость подвода активных компонентов среды к фронту коррозии и скорость химических реакций. Скорость подвода активных компонентов среды в свою очередь зависит от многих параметров как среды, так и структуры бетона. Массоперенос воды и находящихся в ней ионов, их диффузионная проницаемость в поровой структуре цементного камня и бетона при отсутствии внешнего давления происходит вследствие градиента концентраций и измеряется коэффициентом диффузии. В общем виде диффузия определяется суммарной скоростью следующих процессов:

- внешней диффузией (скоростью подвода активных по отношению к цементному камню ионов внешней среды);
- внутренней диффузией ионов в порах и капиллярах цементного камня;
- скоростью химической реакции, которая в свою очередь определяется скоростью самой медленной реакции с образованием продуктов различной растворимости.

При исследовании диффузионных процессов необходимо смоделировать лабораторный эксперимент, в максимальной степени соответствующий реальной системе. В частности, принятая методика по исследованию диффузионной проницаемости цементного бетона для ионов хлора должна позволить с максимальной точностью оценить проницаемость бетонов различных составов и структуры и рассчитать, пользуясь, например, моделью (2), период, в течение которого в защитный слой бетона железобетонных конструкций проникают ионы хлора, вызывающие коррозию

арматурной стали. Это, в свою очередь, позволит просчитать исходные характеристики бетона, обеспечивающие надежную эксплуатацию железобетонных конструкций в расчетные сроки. Известно, что коэффициент диффузии ионов хлора в воде составляет около  $1,6 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с. Для бетона же можно говорить только об эффективной диффузии с учетом величины и характера пористости структуры цементного камня. Величина эффективного коэффициента диффузии ионов в структуре цементного бетона зависит от параметра капиллярной пористости, среднего сечения и извилистости пор, влиянием поверхности твердой фазы на движение ионов за счет адсорбционных процессов. В частности, эффективный коэффициент диффузии хлорид-ионов; согласно исследований [1, 2] для цементного раствора составов 1 : 2; 1 : 2,5 и 1 : 3,5 (цемент:песок по массе) и различных В/Ц составил от  $0,52 \cdot 10^{-7}$  до  $1,95 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с при пятипроцентной концентрации хлористого натрия во внешней среде.

Как было отмечено выше, влияние пластифицирующих добавок типа С-3, СИКА и т. п. на диффузионную проницаемость хлорид-ионов в структуре цементного бетона исследовано недостаточно. Вероятно, их влияние должно быть очень значительным, поскольку высокомолекулярные поверхностно-активные соединения, адсорбируясь на внутренней поверхности пор цементного камня и поверхности заполнителей, изменяют и эффективный коэффициент диффузии. Поверхностно-активные вещества (ПАВ), адсорбируясь полярными группами на поверхности твердой фазы цементного теста бетонной смеси, создают мономолекулярный слой двойного действия. С одной стороны, ПАВ является гидродинамической «смазкой» на поверхности зерен цемента, замедляющих скорость реакции его гидратации. С другой стороны, ПАВ могут быть полифункциональны: нерастворимы в воде, гидрофобизируют поверхность цементного камня бетона [1, 2]. С учетом параметров цементного бетона и свойств ПАВ должен быть выбран метод испытания их диффузионной проницаемости ионов внешней среды в структуру бетона, в наибольшей степени соответствующий реальным условиям эксплуатации конструкции.

#### **Методы исследования диффузионной проницаемости**

В последнее десятилетие, учитывая важность проблемы долговечности железобетона, предложено более десяти различных методов испытания проницаемости бетона в хлоросодержащих средах, обобщенных международным комитетом RILEM TC-178 TMC [4].

Эти методы можно условно разделить на три группы: прямые диффузионные испытания, основанные на погружении опытных образцов в хлоросодержащую среду (англ. Immersion test); ускоренные миграционные испытания во внешнем электрическом поле (англ. Rapid migration test); непрямые испытания, основанные на определении удельного сопротивления или проводимости бетона (англ. Resistivity test). По результатам анализа, выполненного специалистами комитета [4], представляющие каждую из этих групп, были предложены для нормализации и включены в проекты европейских стандартов (EN 13396, NT BUILD 492, NT BUILD 433). В национальных стандартах различных стран делается попытка обобщить и проанализировать многочисленные методики и принять единую, в наибольшей степени отражающую реальные параметры среды и структуры бетона.

В частности, действующий в настоящее время национальный стандарт Российской Федерации по защите бетонных и железобетонных конструкций [3] основан на аналогии между диффузионным потоком вещества и электрическим током в бетоне. В опытах используются стандартные образцы размером  $40 \times 40 \times 160$  мм с установленными в них стальными электродами с подключением их к источнику постоянного тока с определенными параметрами с последующим определением этих параметров и в водной вытяжке из цементного камня исследуемого состава бетона. Эффективный коэффициент диффузии хлоридов в бетоне ( $D_c$ ) рассчитывается по формуле:

$$D_c = D_w \cdot \varphi_{eff}, \quad (6)$$

где  $D_w$  – коэффициент диффузии ионов хлора в воде, принимаемый равным  $0,00123 \text{ см}^2/\text{с}$ ;

$\varphi_{eff}$  – эффективная сквозная пористость бетона, рассчитанная как отношение удельного электрического сопротивления вытяжки из цементного камня исследуемого бетона к удельному электрическому сопротивлению бетона.

Эта методика в настоящее время внесена в межгосударственный (страны СНГ) стандарт по защите бетонных и железобетонных конструкций от коррозии (ГОСТ 31383-2008). В частности, в основу этой методики положены исследования, выполненные в ФГУП НИЦ «Строительство» [3]. Однако нужно отметить относительную сложность исполнения, требующего определения электрического сопротивления как самого исследуемого бетона, так и водных вытяжек из него.

Достаточно распространена упрощенная методика исследования диффузионной проницаемости бетона путем послойного химического анализа содержания ионов хлора в водных вытяжках после 3, 6, 9 и 12 месяцев выдерживания бетонных образцов в растворе хлорида натрия.

Расчет выполняется по формуле, которая по существу представляет собой упрощенную запись замкнутого решения дифференциального уравнения для 2-го закона Фика:

$$Q = \frac{2c}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{D \cdot \tau}, \quad (7)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии, см<sup>2</sup>/с;

$c$  – разность концентраций хлоридов на поверхности и в центре образца;

$\tau$  – время испытания, с;

$Q$  – количество проникших в бетона хлорид-ионов, рассчитанных суммарным содержанием хлоридов в отдельных слоях бетона.

Однако и эта методика требует очень длительного срока испытания при недостаточной точности показателей.

Оригинальная и достаточно простая в исполнении методика предложена ООО «Интел-Групп» (г. Москва). Эффективный коэффициент диффузии ионов хлора определяется при испытании бетонных образцов-стаканов со стенками и дном толщиной 20 мм. Наружный диаметр и высота стакана принимается равным 100 мм. Перед испытанием дно и наружная поверхность стенки на высоту 20 мм изолируются для обеспечения диффузии ионов только в горизонтальном направлении через стенки стакана. В стакан заливается 5 %-ный раствор хлористого натрия, и он помещается в эксикатор с дистиллированной водой, уровень которой находится на уровне внутреннего раствора. Периодически из внутреннего и внешнего раствора отбираются пробы для химического анализа содержания ионов хлора. По результатам измерения концентрации хлор-ионов в стакане и в эксикаторе рассчитывается эффективный коэффициент диффузии (120...150 сут.). Недостаток данной методики и подобных ей также заключается в длительности эксперимента, сложности выдерживания в течение длительного срока постоянства температурного режима, а также вследствие незначительной толщины стенок

стакана можно проводить испытания только мелкозернистых бетонов. При этом конструкция опытного образца такова, что может получать начальные дефекты в результате развития усадочных деформаций в связанных условиях.

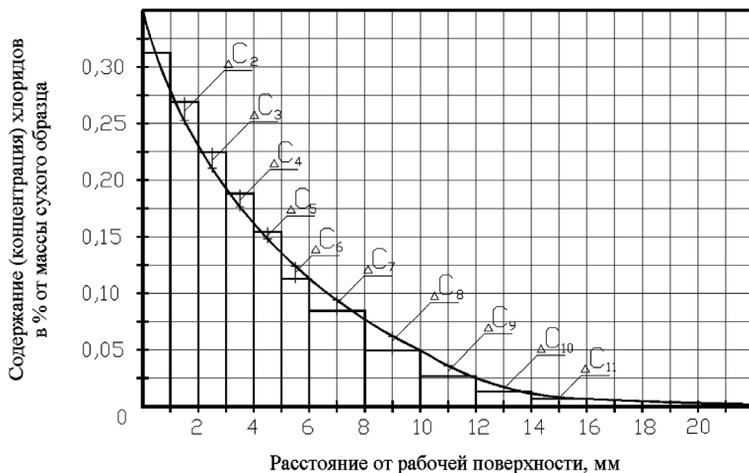
За рубежом также используется большое разнообразие методик для исследования диффузионной проницаемости хлор-ионов в цементном бетоне.

В частности, применяется метод AASHTO T-277. Согласно этому методу проницаемость бетона оценивается по косвенному параметру – количество электричества в Кулонах, прошедшего через бетонный образец за 6 часов при разности потенциалов постоянного тока 50 вольт.

Метод, включенный в EN 13396, распространяется на испытания сопротивления проницаемости хлоридами ремонтных материалов и систем, используемых для защиты бетона от агрессивного воздействия. Этот метод позволяет получить распределение содержания хлоридов на различных уровнях по глубине образца после различной продолжительности хранения в агрессивной среде, но не дает никаких параметров транспортных процессов переноса хлорид-ионов. Следует отметить, что метод требует значительных временных затрат (как минимум около полугода) для выполнения полного испытания. Согласно [4] испытания выполняют на бетонных образцах диаметром не менее 100 мм и высотой не менее 60 мм, погружаемых в 3 %-ный раствор NaCl. Измерение содержания хлоридов выполняют на трех уровнях по высоте образца (0~2; 4~6; 8~10 мм) после 28 суток, 3 месяцев и 6 месяцев хранения.

Метод NT BUILD 443 (Immersion test) основан на явлении естественной (природной) диффузии хлор-ионов при очень высоком градиенте концентрации. При проведении опытов определяют значения коэффициентов диффузии в нестационарном состоянии  $D_{nssd}$  и полное поверхностное содержание хлоридов  $C_s$  при построении кривой измеренного профиля распространения хлоридов и последующего решения функции ошибок замкнутого решения второго закона Фика (Fick's second law). По значениям  $D_{nssd}$  и  $C_s$  определяют параметр проницаемости  $K_{cr}$ . Следует отметить, что опыт является достаточно трудоемким и требует значительных временных затрат (более 35 дней). Испытание выполняется на трех образцах диаметром не менее 75 мм и высотой не менее 60 мм, у которых рабочая поверхность шлифуется, а оставшиеся – покрывают эпоксидным слоем. Образцы, предварительно хранившиеся по методике [4],

погружают в раствор NaCl с концентрацией 165 г/л на 35 дней. Далее выполняют шлифы по глубине образца и строят профили проникновения хлорид-ионов, по которым определяют коэффициент диффузии в нестационарных условиях  $D_{nssd}$ , полное содержание хлоридов  $C_s$  и параметр проницаемости  $K_{cr}$ .



**Рисунок 1.** Пример построения регрессивной кривой, описывающей профиль распределения хлоридов по глубине элемента согласно [4]

Фактические значения коэффициентов диффузии в нестационарном состоянии (нестационарных коэффициентов диффузии) определяют из замкнутого решения дифференциального уравнения, описывающего второй закон Фика в виде:

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{nssd} \cdot t}} \right), \quad (8)$$

где  $D_{nssd}$  – фактическое значение нестационарного коэффициента диффузии,  $m^2/c$ ;

$x$  – средняя глубина образца, на которой производили отбор проб;

$t$  – время погружения, сек;

$C(x, t)$  – содержание (концентрация) хлоридов на глубине  $x$ , в % по массе сухой пробы;

$C_s$  – фактическое содержание хлоридов на рабочей поверхности, в % по массе образца;

$C_i$  – начальное содержание хлоридов на рабочей поверхности, % по массе образца;  
 $\text{erf}$  – функция ошибки, определяемая по выражению:

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} \cdot du. \quad (9)$$

Значение параметров проницаемости для условия  $C_s > C_r > C_i$  (при  $C_r = 0,05$  % по массе сухого образца) рассчитывают по формуле:

$$K_{cr} = 2\sqrt{D_{nssd}} \cdot \text{erf}^{-1} \left( \frac{C_s - C_r}{C_s - C_i} \right). \quad (10)$$

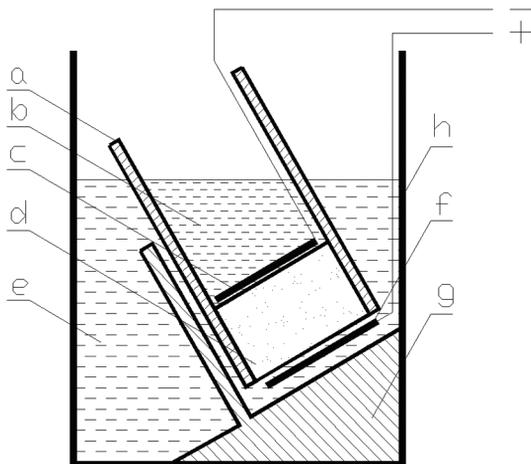
Метод, содержащийся в NT BUILD 492 (Rapid migration test) является ускоренным миграционным методом испытания проницаемости во внешнем электрическом поле. Посущество, методика подготовки образцов и обработки результатов не отличается от изложенной NT BUILD 443. По полученным профилям проникновения хлорид-ионов определяют коэффициент диффузии в нестационарных условиях  $D_{ussm}$ . Метод является относительно простым и не требует затрат времени (результат получают в течении 24 часов).

В УО «БрГТУ» для исследования диффузионной проницаемости ионов хлора в различных цементных составов из всех выше перечисленных были апробированы два метода: длительный метод испытания ООО «Интел Групп», где диффузия ионов хлора происходит только при градиенте концентрации ионов, и второй – ускоренный метод, позаимствованный из европейских норм, NT BUILD 492.

В методику ООО «Интел Групп» внесли с целью упрощения изготовления экспериментальных образцов изменения. Вместо стаканов круглого сечения были использованы стаканы квадратного сечения с внешними размерами  $100 \times 100 \times 100$  мм со стенками также толщиной 20 мм и внутренним размером стакана  $60 \times 60 \times 80$  мм. Дно и стенки на высоту также изолировали парафином. В стакан заливался однонормальный раствор хлористого натрия, и он помещался в эксикатор с дистиллированной водой. Химический анализ внутреннего и внешнего растворов на содержание ионов хлора выполнялся через 28 и 60 суток. Опыты продолжаются до достижения стационарной диффузии.

Параллельно с вышеприведенными длительными сроками исследования диффузионной проницаемости ионов хлора в различных

составах цементных образцов для тех же составов выполнялись исследования по ускоренной методике BUILD 492. Этот метод позволяет получить данные по диффузии ионов хлора за 24 часа испытания за счет ускорения диффузии в поле постоянного тока (рис. 2).



**Рисунок 2.** Установка для ускоренного испытания миграции хлоридов:

- a – труба из ПВХ; b – электролит в катодной зоне (1-нормальный раствор NaCl);
- c – анод; d – образец; e – раствор хлористого натрия; f – катод;
- g – пластиковая опора; h – пластиковая емкость

Исследуемые образцы из цементных материалов диаметром 100 мм и высотой 200 мм до производства испытания выдерживались в среде со 100 %-ной влажностью воздуха. Далее образец после 28 суток твердения распиливался на три части толщиной каждый по 6,6 см. Два образца снова возвращались во влажную среду для продолжения твердения и испытания их в возрасте 3 и 6 мес. Третий образец герметично заделывался в трубу из ПВХ с внутренним диаметром 106 мм и высотой 200 мм. В образовавшийся сверху стакан, как и при длительных опытах, заливался однонормальный раствор хлористого натрия. Далее образец в трубе и с раствором помещался в эксикатор с раствором гидроксида натрия (катодная жидкость). Поле постоянного тока создавалось путем подключения круглых электродов из нержавеющей стали к источнику постоянного тока с напряжением на электродах 10... 12 вольт. Через 24 часа нахождения исследуемых образцов под напряжением они извлекались

из трубы и разрезались на три равных части толщиной по 2,2 см каждый. Образцы дробились до фракции 0,16 мм и заливались дистиллированной водой для получения вытяжки. Через сутки вода отфильтровывалась, и в ней определялась концентрация хлор-ионов. По трем точкам (три образца) строилась регрессивная кривая содержания ионов хлора по толщине образца от анодной к катодной зоне. В настоящее время получены результаты диффузии ионов хлора для различных составов цементных образцов при твердении их в течение 28 и 60 суток во влажных условиях среды.

Расчет фактического значения нестационарного коэффициента миграции (переноса) хлорид-ионов выполняют согласно [4] по формуле:

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t}, \quad (11)$$

$$\text{при } E = \frac{U - 2}{L} \text{ и } \alpha = \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{2C_d}{C_0} \right), \quad z = 1.$$

Учитывая, что константа Фарадея  $F = 6,948 \cdot 10^4 \text{ J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$ , газовая постоянная  $R = 8,314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ , а значение обратной функции ошибки при  $C_d \sim 0,07\text{N}$  (для обычного портландцементного бетона) и  $C_0 \sim 2\text{N}$  равна  $\operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{2 \cdot 0,07}{2} \right) = 1,28$ , может быть принята упрощенная форма записи (11):

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2) \cdot t} \left( x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L \cdot x_d}{U - 2}} \right), \quad (12)$$

где  $U$  – абсолютное значение приложенного напряжения, В;

$E$  – средняя температура в начале и конце опыта в анодной зоне, °С;

$L$  – толщина образца, мм;

$x_d$  – глубина проникновения хлорид-ионов, мм;

$t$  – продолжительность испытания, в часах.

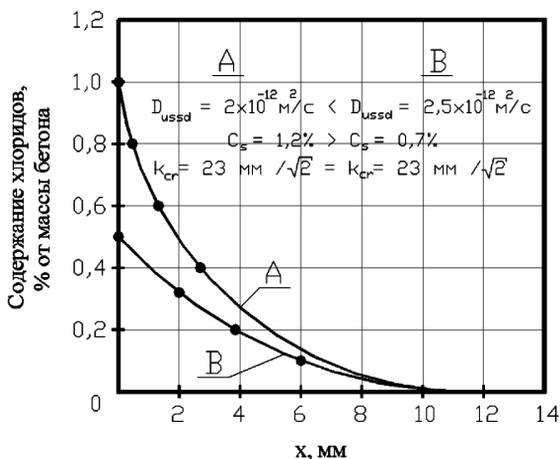
#### Некоторые замечания, относящиеся к интерпретации результатов испытаний

Методика NT BUILD 443 (Immersion test) позволяет получить связанные значения  $D_{nssd}$  и  $C_s$  через построение кривых измеренных профилей распространения хлоридов с использованием замкнутого решения дифференциального уравнения, описывающего второй закон Фика  $\left( \frac{\partial C}{\partial e} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)$  с учетом допущения о постоянной связывающей

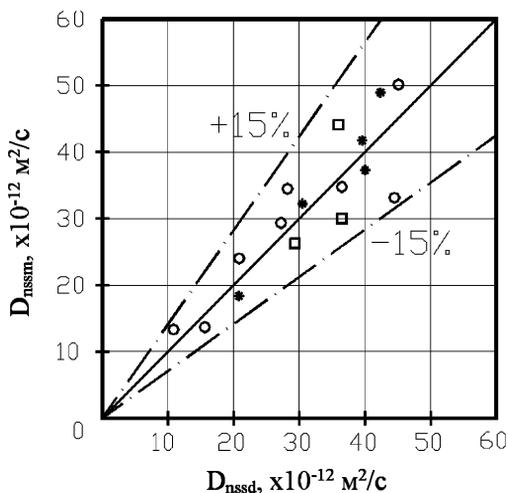
способности хлорид-ионов. В фактических условиях связывающая способность хлоридов нелинейно зависит от свободной концентрации хлор-ионов и, кроме того, зависит от вида цемента [6, 7].

Полное содержание хлоридов является суммой свободных хлор-ионов в поровом растворе и связанных хлоридов на поверхности гидратов. Поэтому в общем случае значение  $C_s$  зависит от пористости и вида вяжущего. Даже в подобных условиях экспозиции бетоны, полученные с использованием различных цементов, могут давать различные значения  $C_s$ .

Как показано в [5, 7], значение коэффициента диффузии  $D_{nssd}$  связано со значением  $C_s$  кривыми, полученными на основе профилей распределения хлоридов, и поэтому само по себе не может отражать фактическое сопротивление бетона проникновению хлорид-ионов. Для правильной интерпретации результатов опытов оба значения  $D_{nssd}$  и  $C_s$  должны рассматриваться совместно. Параметр проницаемости  $K_{cr}$  сочетает в себе совместное влияние  $D_{nssd}$  и  $C_s$  и поэтому лучше способствует сравнению результатов. Пример, позаимствованный из [4], показанный на рис. 3, содержит графики для двух бетонов, приготовленных из разных смесей (А и В). Образцы группы А показали меньшее значение  $D_{nssd}$  и большее значение  $C_s$ , чем образцы группы В, но обе группы образцов имеют одинаковое значение параметра проницаемости  $K_{cr}$ . Следует подчеркнуть, что параметр  $K_{cr}$  с размерностью мм/год<sup>0,5</sup> главным образом применим для сравнения, но необязательно обозначает фактическую глубину проникновения хлорид-ионов за период год<sup>0,5</sup>.



**Рисунок 3.**  
Пример взаимосвязи  $D_{nssd}$  и  $C_s$  согласно [4]



**Рисунок 4.**  
Взаимосвязь между параметрами  $D_{nssd}$  и  $D_{nssm}$  согласно [4] (значение  $D_{nssd}$  определено для 35 дней)

В ускоренном методе NT BUILD 492 [4] значение коэффициента миграции  $D_{nssm}$  также получают при допущении постоянного значения связывающей способности хлоридов [5]. В отличие от метода NT BUILD 433 это допущение в лучшей степени реализуется в ускоренных испытаниях во внешнем электрическом поле, имеющих достаточно короткий период (до 24 часов). Такие условия испытаний ведут к снижению количества связанных хлоридов, особенно физически связанных ионов. Поэтому параметр  $D_{nssm}$  довольно объективно в отличие от метода NT BUILD 433, как и некоторые другие [5–7], показывает, что эти два коэффициента являются вполне сопоставимыми и могут быть связаны, например, как это показано на рис. 4. С учетом погрешностей измерений в опытных методах можно заключить, что оба метода позволяют подобным образом оценить транспортные процессы при переносе хлорид ионов в структуре бетона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены положения вероятностной расчетной модели сопротивления бетонного композита проникновению хлорид-ионов для состояния депассивации стальной арматуры. Показано, что базовым параметром расчетной модели является коэффициент диффузионной проницаемости.

2. Рассмотрены различные экспериментальные методы, применяемые для определения диффузионной проницаемости бетона

при действии хлорид-ионов, апробация которых осуществляется в УО «БрГТУ».

**Список использованных источников**

1. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин [и др.]. – М. : Стройиздат, 1980. – 535 с.
2. Ковалев, Я.Н. Физико-химические основы технологии строительных материалов / Я.Н. Ковалев. – Минск : Новое знание, 2012. – 284 с.
3. Патент РФ №2269777 «Способ определения диффузионной проницаемости бетона», авторы: Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Федоров Д.Ю. 10.02.2006.
4. Resistanse of concrete to chloride ingress – From Laboratory tests to in-field performance – Report, project № GRD1-202-71808-CHLORTEST – January 2003 – December 2005. – 273 p.
5. Byfors, K. Chloride-initiated Reinforcement Corrosion – Chloride Bending, Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), Stockholm, CBI Report 1:90, 1990.
6. Tang, L. Precision of the Nordic Test Methods for Measuring the Chloride Diffusion/Migration Coefficient of Concrete / L. Tang, H.E. Surenson // Materials and Structures, 342001 – P. 479–485.
7. Tang, L. Engineering Expression of the ClinCon model for prediction of the free and total chloride ingress in submerged marine concrete / L. Tang.// Cem. and Concr. Research, 2005 – P. 117–128.
8. Model Code Service Life Design – fib, 2007 – 173 p.
9. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций : ТКП EN 1990-2011. – Введ. 01.07.12. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2011. – 74 с.

*Статья поступила в редколлегию 04.12.2013*