

## ЗОНЫ КОНВЕКЦИИ И ДИФФУЗИИ В КРИВЫХ ПРОНИКНОВЕНИЯ ХЛОРИДОВ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Рассмотрены зоны конвекции и диффузии хлоридов при проникновении хлоридов в железобетонную конструкцию. Многие экспериментальные кривые проникновения хлоридов имеют зону конвекции во внешних 10 мм, где сходжение между кривой и функцией ошибки плохое. Показано, что размер зоны конвекции составляет 5–18 мм и больше для пролетных строений по сравнению с колоннами.

**Н**аибольшую опасность для железобетонных конструкций транспортных сооружений представляют хлориды, входящие в состав солей-антиобледенителей, применяющихся на дорогах в зимнее время.

Проникновение хлоридов в железобетонные конструкции управляется множеством химических и физических процессов: диффузия ионов, капиллярное всасывание, конвекция, а также химическое и физическое связывание хлоридов.

Транспортировка хлоридов в бетоне происходит преимущественно тремя различными способами [1]: проникновение растворов солей, капиллярное всасывание и перемещение свободных ионов хлоридов. Все эти процессы возможны при определенном уровне влажности поровой системы бетона. Доминирующим является перемещение свободных ионов хлора, которое зависит, например, от пористости и влажности.

При проникновении хлоридов в бетон можно выделить зону конвекции хлоридов в поверхностном слое бетона и зону диффузии хлоридов в более глубоких слоях. Глубина зоны конвекции зависит от влажности цементного камня.

Содержание хлоридов в бетоне определяют путем аналитического решения уравнения диффузии, при некоторых аппроксимациях принимается, что диффузия происходит в полубесконечном материале при постоянном коэффициенте диффузии, с постоянными поверхностными условиями:

$$C_x = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{F2}t}} \right], \quad (1)$$

где  $C_x$  – содержание хлоридов на некоторой глубине, % от веса цемента;  $C_s$  – поверхностное содержание хлоридов, % от веса цемента;  $\operatorname{erf}$  – функция ошибок Гаусса;  $x$  – глубина проникновения хлоридов, м;  $t$  – время воздействия, с;  $D_{F2}$  – коэффициент диффузии хлоридов,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Для оценки экспериментальных кривых проникновения хлоридов может использоваться решение второго закона Фика с учетом интеграла вероятности ошибок. По экспериментальным кривым проникновения хлоридов можно определить:

$D_{F2}$  – фактический коэффициент диффузии, который описывает форму кривой проникновения хлоридов. Коэффициент диффузии отражает скорость проникновения хлоридов в бетон;

$C_{sa}$  – фактическое поверхностное содержание хлоридов, которое описывает граничные условия для кривой проникновения хлоридов. Поверхностное содержание

хлоридов отражает величину потенциала движения в процессе диффузии.

Однако обследования показывают, что не всегда максимальное содержание хлоридов бывает в наружном слое, а находится на некоторой глубине (обычно 5–10 мм). Зачастую профили проникновения хлоридов имеют зону конвекции во внешних 5–10 мм. Это связано с условиями эксплуатации [2]. При омывании бетона дождями хлориды могут удаляться из наружного слоя дождевой водой. При испарении хлоридных растворов из бетона зона испарения воды может находиться не на поверхности, а на некоторой глубине. В этом случае слой с максимальным содержанием хлоридов будет располагаться не на поверхности, а несколько глубже. При карбонизации поверхностного слоя разрушаются оксихлориды и гидроксиды алюмината, понижается сорбция хлоридов карбонизированными продуктами цементного камня [2]. Глубина зоны конвекции зависит от качества бетона, условий воздействия и времени осуществления выборки.

Поэтому при помощи  $D_{F2}$  и  $C_{sa}$  не всегда можно корректно описать проникновение хлоридов.

В [3] предложено для описания формы кривой использовать четыре параметра вместо двух. Зона конвекции описана глубиной конвекции,  $x_c$ , которая определена как глубина, на которой профиль проникновения хлоридов не соответствует функции ошибки. Зона диффузии описана фактическим коэффициентом диффузии  $D_{F2}$  и поверхностным содержанием хлоридов  $C_{sc}$  (рисунок 1).

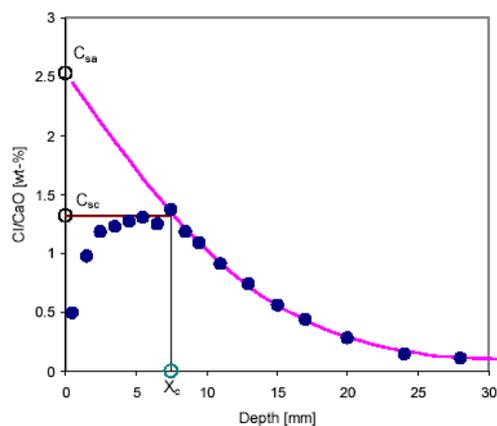


Рисунок 1 – Зоны конвекции и диффузии в кривых проникновения хлоридов в железобетон [3]

Диффузионные свойства цементного камня зависят от времени, то есть параметры, полученные по кривым проникновения хлоридов, изменяются со временем. Таким образом, фактический коэффициент диффузии

$D_{F2}$  уменьшается со временем, а фактическое поверхностное содержание хлоридов  $C_{sa}$  увеличивается со временем. На глубине зоны конвекции  $x_c$  поверхностное содержание хлоридов в зоне диффузии  $C_{sc}$  также увеличивается со временем.

В работе [4] даны результаты обследования семи шоссейных мостов из бетона марки М400 с содержанием цемента 300–360 кг/м<sup>3</sup> и В/Ц 0,45–0,50. Возраст конструкций составляет 25–35 лет. Полученные результаты определения содержания хлоридов показаны на рисунке 2.

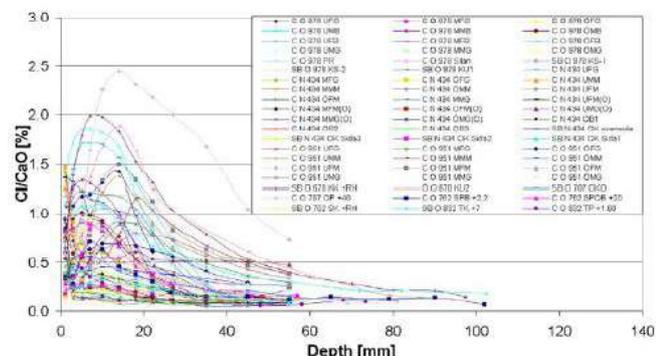


Рисунок 2 – Профили проникновения хлоридов: первый индекс показывает кривую для колонн (С), стороны балки (SB) или другой части конструкции (О); второй – для какого моста построены кривые; третий – название кривой

Кривые проникновения хлоридов для различных мостов были оценены решением второго закона Фика с учетом интеграла вероятности ошибок. Кривая была построена таким образом, что коэффициент корреляции, то есть параметр, который описывает, насколько хорошо кривая соответствует функции ошибки, превышает 0,980. Также определялась внешняя зона конвекции, на которой кривая отклоняется от функции ошибки, и внутренняя зона диффузии (таблица 1).

Таблица 1 – Фактические коэффициент диффузии  $D_{F2}$  и поверхностное содержание хлоридов  $C_{sa}$ , величина зоны конвекции  $x_c$  и поверхностное содержание хлоридов для зоны диффузии  $C_{sc}$

Мост	$D_{F2}$ , м <sup>2</sup> /с	$C_{sa}$ , Cl/Cao, %	$x_c$ , мм	$C_{sc}$ , Cl/Cao, %
O 670	7.80e-13	2,361	7	1,987
O 670	7.81e-13	2,415	14	1,886
O 762	2.69e-13	0,889	7	0,712
O 762	2.16e-13	1,375	10	0,883
O 762	3.05e-13	1,085	5	0,822
O 832	1.92e-13	0,454	5	0,437
O 832	1.08e-12	1,132	3	1,086
O 707	9.98e-13	0,571	5	0,569
O 707	3.93e-13	0,919	14	0,571
O 978	5.70e-13	1,641	14	0,958
O 978	3.40e-13	1,983	14	1,025
O 978	5.08e-13	2,337	18	1,179
N 434	4.22e-12	0,478	3	0,477
N 434	9.19e-13	0,301	5	0,271
N 434	1.02e-12	0,374	10	0,335

Величина зоны конвекции больше для пролетных конструкций по сравнению с колоннами, т. е. механизмы воздействия хлоридов различны для колонн и пролетных конструкций. Параметры, полученные по кри-

Получено 08.11.2017

**A. V. Stepanova.** Convection and diffusion zones in chloride penetrations profiles in reinforced concrete structures.

Zones of convection and diffusion of chlorides at penetration of chlorides into a reinforced concrete structures are considered. Many experimental chloride penetrations profiles have a convection zone in external layer of concrete where the fit between the profile and error-function is bad. It is shown that the size of a convection zone is 5–18 mm and larger for flying structures in comparison with columns.

вым проникновения хлоридов, приведены со средними значениями и стандартными отклонениями ( $SD$ ), в таблицах 2 ( $D_{F2}$  и  $C_{sa}$ ) и 3 ( $x_c$  и  $C_{sc}$ ).  $D_{F2}$  описывает форму кривой,  $C_{sa}$  описывает потенциал движения хлоридов.

Видно, что больше различий в значениях  $D_{F2}$ ,  $C_{sa}$ ,  $x_c$ , и  $C_{sc}$  между разными мостами, чем между колоннами и пролетными конструкциями одного моста.

Таблица 2 – Средние значения и стандартные отклонения ( $SD$ ) для параметров  $D_{F2}$  и  $C_{sa}$ , полученные по кривым проникновения хлоридов для мостов O 978 и N 434

Мост	$D_{F2}$ , м <sup>2</sup> /с		$C_{sa}$ , Cl/Cao, %	
	Средний	$SD$	Среднее	$SD$
O 978 Колонны	3.34e-13	1.07e-13	1,60	1,17
O 978 Пролетные конструкции	4.73e-13	1.19e-13	1,99	0,35
N 434 Колонны	1.20e-12	1.30e-12	0,41	0,33
N 434 Пролетные конструкции	2.05e-12	1.88e-12	0,38	0,09

Таблица 3 – Средние значения и стандартные отклонения ( $SD$ ) для параметров  $x_c$  и  $C_{sc}$  оцененные по кривым проникновения хлоридов для мостов O 978 и N 434

Мост	$x_c$ , мм		$C_{sc}$ , Cl/Cao, %	
	Средние	$SD$	Средние	$SD$
O 978 Колонны	6,29	4,23	1,01	0,45
O 978 Пролетные конструкции	15,33	2,31	1,05	0,11
N 434 Колонны	3,12	1,11	0,41	0,31
N 434 Пролетные конструкции	6,00	3,61	0,36	0,11

**Выводы.** При проникновении хлоридов в железобетонную конструкцию можно выделить две зоны: зону конвекции хлоридов в поверхностном слое бетона и зону диффузии хлоридов в более глубоких слоях. Многие экспериментальные кривые проникновения хлоридов имеют зону конвекции во внешних 10 мм, где схождение между кривой и функцией ошибки плохое. Глубина зоны конвекции зависит от качества бетона, условий воздействия и времени осуществления выборки и колеблется в пределах 5–18 мм.

Для оценки экспериментальных кривых проникновения хлоридов с использованием решения второго закона Фика с учетом интеграла вероятности ошибок необходимо учитывать зону диффузии.

#### Список литературы

- 1 **Basheer, L.** Assessment of the durability of concrete from its permeation properties / L. Basheer, J. Kropp, D. J. Cleland // Construction and Building Materials. – No. 15. – 2001. – P. 93–103.
- 2 **Розенталь, Н. К.** Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / Н. К. Розенталь, НИИЖБ. – М., 2004. – 432 с.
- 3 **Nilsson, L.-O.** Chloride ingress data from field exposure in a Swedish road environment / L.-O. Nilsson, A. Andersen, T. Luping, P. Utgenannt // Department of Buildings Materials, Chalmers University of Technology. – Göteborg, 2000.
- 4 **Lindvall, A.** Chloride ingress data from Danish and Swedish road bridges exposed to splash from de-icing salt / A. Lindvall, A. Andersen, L.-O. Nilsson // Proceedings of 2<sup>nd</sup> International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete. – Paris, 2000. – P. 85–103.