
МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.093.004.

Д. А. ШЕСТОВИЦКИЙ^{1*}

^{1*} Каф. «Мосты», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Московский пр., 9, Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел./факс +7 (812) 572-6119, эл. почта kmost@pgups.edu

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ

Цель. Эта работа посвящена разработке модели прогнозирования срока службы мостов на основе моделирования процесса проникновения хлоридов в защитный слой железобетонных элементов мостов. **Методика.** В основе модели находится численное решение системы дифференциальных уравнений аналитической теории диффузии второго закона А. Фика. **Результаты.** Приведен пример расчета сроков депассивации защитного слоя железобетонных элементов мостов, эксплуатируемых в пяти климатических областях Украины. **Научная новизна.** Предложена модель прогнозирования срока службы железобетонных мостов, основанная на оценке времени хлоридизации защитного слоя с учетом различных факторов: температуры, влажности окружающей среды, напряженного состояния, связывающей способности и влагоемкости бетона. **Практическая значимость.** Разработанная модель может быть применена для прогноза долговечности на стадии проектирования.

Ключевые слова: железобетон; долговечность; хлоридизация; законы аналитической теории диффузии

Введение

В последние 20-25 лет проблема оценки эксплуатационной надежности и долговечности железобетонных мостов стала актуальной для многих стран. Приходится констатировать, что сейчас стремительно растет количество мостов разных лет постройки, надежность и безопасность которых с возрастом стремительно снижается. В этих условиях, для безаварийной эксплуатации и продления ресурса сооружений, нужны новые научные подходы к оценке и прогнозу технического состояния элементов мостов на всех стадиях жизненного цикла. Нужны алгоритмы, которые дали бы количественные критерии уровня надежности и прогноза ресурса элементов.

Бетонные конструкции подвержены влиянию углекислого газа, содержащегося в атмосфере, что приводит к карбонизации защитного слоя и коррозии арматуры. Характерной же особенностью эксплуатации железобетонных мостов является взаимодействие с хлоридными агрессивными средами, источником которых являются хлоридсодержащие антигололедные средства, применяемые с целью обеспечения безопасности движения транспорта на проезжей части при гололеде в зимний период, морской воздух (приморская зона), добавки-

ускорители твердения и противоморозные добавки (на основе хлорида натрия и кальция). В СНиПе по защите конструкций от коррозии, воздействие хлоридов на бетон описывается как средне и сильноагрессивное [1]. Агрессивное влияние хлоридов доказывается примерами внезапного разрушения конструкции, вследствие коррозии арматуры.

Так, например, обрушение пешеходного моста в 2000 году в городе Шарлотт (США) привело к травмированию более ста человек. Мост был построен в 1995 году, и его обрушение произошло в связи с появлением и развитием в арматуре «точечной» коррозии, вызванной воздействием хлоридов.

Другим примером может послужить обрушение путепровода на международной трассе округа Вашингтон Каунти в 2005 году. Разрушение путепровода было вызвано коррозией от влияния антигололедных средств.

В основе описания процесса проникновения хлорида в бетон лежит дифференциальное уравнение аналитической теории диффузии второго закона Адольфа Фика [3]. Решение этого уравнения является основой для большинства моделей прогнозирования времени накопления критической концентрации ионов хлоридов у поверхности арматуры в железобетонных мостовых конструкциях:

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$\text{П закон А. Фика: } \frac{dc}{dt} = D_{Cl} \frac{d^2c}{dx^2}, \quad (1)$$

$$X_C = 2\sqrt{D_{Cl}t_{Cl}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{c_s - c_{crit}}{c_s} \right), \quad (2)$$

$$t_{Cl} = \frac{X_c^2}{4 \cdot D_{Cl} \cdot \left(\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{c_s - c_{crit}}{c_s} \right) \right)^2}; \quad (3)$$

где X_C – толщина защитного слоя бетона, м; D_{Cl} – коэффициент диффузии хлоридов в бетоне, $\text{м}^2/\text{с}$; $\operatorname{erf}(\)$ – функция ошибок Гаусса, c_s и c_{crit} – концентрация хлоридов на поверхности бетона защитного слоя и критическая концентрация хлоридов на поверхности арматуры, % по массе цемента.

Аналитическое решение (1-3) нашло широчайшее применение в расчетах в виду своей простоты и удобства применения. Однако такой подход имеет явные недостатки, а именно:

- подход носит общий, поверхностный характер описания диффузии;
- из механизмов переноса вещества рассматривается только диффузия, без учета конвекции;
- коэффициент диффузии хлоридов в бетоне принимается как константа;
- не учитывается влияния температуры и влажности окружающей среды;
- не учитывается изменение скорости диффузии с возрастом бетона;
- не учитывается влияние напряженного состояния;
- не учитывается связывающая способность бетона.

Цель исследования

Эта работа посвящена разработке модели прогнозирования срока службы мостов на основе моделирования процесса проникновения хлоридов в защитный слой железобетонных элементов мостов.

Механизм транспорта хлоридов в бетоне

Основными процессами переноса хлоридов в бетоне являются *диффузия* и *конвекция*.

Диффузия характеризуется переносом хлоридов через поровую влагу сквозь бетон за счет градиента концентрации, который существует между открытой поверхностью бетона и поровым раствором цементной матрицы в насыщенном бетоне. *Конвекция* же объясняется процессом капиллярной сорбции, когда вода перемещается из области насыщенного бетона в область частично насыщенного, тем самым перенося растворенные хлориды, которые добавляются к общей концентрации.

Определяющая система дифференциальных уравнений

При одновременном учете диффузии, конвекции и связывающей способности одномерное уравнение диффузии (1) примет вид:

$$\frac{dC_f}{dt} = \frac{D_{Cl}^*}{1 + (1/\omega_e) \cdot (\partial C_b / \partial C_f)} \frac{d^2 C_f}{dx^2} + \frac{D_h^*}{1 + (1/\omega_e) \cdot (\partial C_b / \partial C_f)} \frac{d}{dx} \left(C_f \frac{dh}{dx} \right), \quad (4)$$

где C_f – концентрация свободных хлоридов в бетоне, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_b – концентрация связанных хлоридов в бетоне, $\text{кг}/\text{м}^3$; h – относительная поровая влажность бетона; D_{Cl}^* и D_h^* – эффективные коэффициенты диффузии хлоридов и влаги в бетоне, $\text{м}^2/\text{с}$; ω_e – свободная поровая влага; $\partial C_b / \partial C_f$ – связывающая способность бетона.

В уравнении (4) при учете конвекции появляется неизвестная функция относительной поровой влажности, h , которая как и концентрация хлоридов изменяется по времени и глубине бетона и должна быть найдена из дифференциального уравнения, описывающего диффузию влаги в бетоне. Перемещение влаги в бетоне так же моделируется с помощью дифференциального уравнения аналитической теории диффузии закона А. Фика и может быть выражено через относительную поровую влажность следующим образом [3]:

$$\frac{\partial \omega_e}{\partial t} = \frac{\partial \omega_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = D_h^* \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где ω_e – свободная поровая влага; h – относи-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

тельная поровая влажность; D_h – эффективный коэффициент диффузии влаги в бетоне; $\partial\omega_e / \partial h$ – влагоемкость бетона.

Система дифференциальных уравнений (4-5) являются основой предложенной модели.

Эффективные коэффициенты диффузии

$$D_{Cl}^* \text{ и } D_h^*$$

Эффективные коэффициенты диффузии называются таковыми, потому что учитывают влияние различных факторов на скорость диффузии и находятся по следующим формулам:

$$D_{Cl}^* = f_1(T) \cdot f_2(W) \cdot f_3(t) \cdot f_4(\sigma) \cdot D_{Cl,0}, \quad (6)$$

$$D_h^* = g_1(T) \cdot g_2(W) \cdot g_3(t) \cdot D_{h,0}, \quad (7)$$

где $D_{Cl,0}$, $D_{h,0}$ – начальные коэффициенты диффузии хлоридов и влаги в бетоне, м²/с; $f_1(T)$, $g_1(T)$ – функции влияния температуры; $f_2(W)$, $g_2(W)$ – функции влияния влажности; $f_3(t)$, $g_3(t)$ – функции влияния времени; $f_4(\sigma)$ – функция влияния напряженного состояния.

Влияние температуры и влажности окружающей среды на проникновение хлоридов и влаги в бетон

Для проникновения хлоридов наиболее опасным является режим «увлажнения-просушки», который способствует наибольшей скорости диффузии и, в свою очередь, зависит от изменения климатических условий эксплуатации.

Для учета сезонных колебаний температуры и влажности, предполагается, что их функция в зависимости от времени подчиняется синусоидальному закону:

$$f_{T,W}(t) = \frac{\varphi_{\max} + \varphi_{\min}}{2} + \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2} \sin(2\pi t), \quad (8)$$

где φ_{\max} – максимальное среднее значение параметра (температуры, влажности), φ_{\min} – минимальное среднее значение параметра (температуры, влажности), t – время в годах.

Согласно [4], влияние температуры и влажности на значение начального коэффициента диффузии хлоридов в бетоне ($D_{Cl,0}$) учитывается дополнением в виде двух функций:

Влияние температуры:

$$f_1(T) = e^{\left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]}, \quad (9)$$

Влияние влажности:

$$f_2(W) = \left[1 + \frac{(1-w)^4}{(1-w_{ref})^4} \right]^{-1}, \quad (10)$$

где E – энергия активации для хлоридной диффузии, кДж/моль; R – газовая константа, $8,314 \times 10^{-3}$ кДж/К·моль; T – температура окружающей среды, К; T_{ref} – исходная температура при которой был измерен коэффициент диффузии, К; w – влажность окружающей среды; w_{ref} – влажность при которой коэффициент диффузии достигает своего среднего значения.

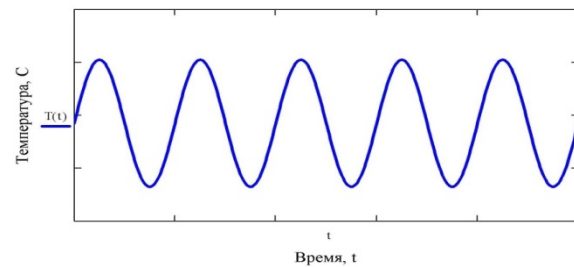


Рис. 1. Изменение температуры по синусоидальному закону

Энергия активации для хлоридной диффузии, E , зависит от водоцементного отношения (табл. 1).

Таблица 1

Энергия активации для хлоридной диффузии

В/Ц	E , кДж/моль
0,4	41,8±4,0
0,5	44,6±4,3
0,6	32,0±2,4

Функция $g_1(T)$, учитывающая влияние температуры на коэффициент диффузии влаги $D_{h,0}$, находится аналогично формуле (9), энергия активации, E , находится в пределах [22,5...39] кДж/моль [5].

Влияние влажности определяется по формуле:

$$g_2(W) = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + [(1-w)/(1-w_{ref})]^n}, \quad (11)$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

где w – влажность окружающей среды; w_{ref} – влажность, при которой коэффициент диффузии достигает своего среднего значения; α_0 и n – коэффициенты, которые находятся в пределах $[0,025; 0,1]$ и $[6; 16]$ соответственно.

Зависимость диффузии от времени эксплуатации

Коэффициенты диффузии хлоридов и влаги в бетоне ($D_{Cl,0}$, $D_{h,0}$), часто рассматривается как параметр, независимый от времени. В работе [6] коэффициент диффузии хлоридов описывается как степенная функция времени. Лабораторные испытания [7], [8] показали, что зависимость коэффициента диффузии от времени подчиняется линейному закону в двойной логарифмической системе координат. Это означает, что функция влияния на коэффициент диффузии, $D_{Cl,0}$, может быть записана в виде степенной функции:

$$f_3(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^m, \quad (12)$$

где t_0 – время определения коэффициента диффузии, с; m – коэффициент, определяемый экспериментальным путем, t – время эксплуатации, с.

Влияние времени на коэффициент диффузии влаги, $D_{h,0}$, описывается функцией:

$$g_3(t) = 0,3 + \sqrt{\frac{13}{t_e}}, \quad (13)$$

где t_e – представляет эквивалентный период гидратации.

Влияние напряженного состояния бетона на диффузию хлоридов

В работах [9, 10] выдвигается гипотеза об ускорении и замедлении диффузии хлоридов в бетоне в зависимости от типа напряженного состояния (сжатие или растяжение). Там же проведены экспериментальные исследования по определению влияния напряженного состояния на коэффициент диффузии хлоридов в бетоне и выведена зависимость:

$$f_4(\sigma) = \left[1 + A_{c(t)} \cdot \left(\frac{\sigma_{c(t)}}{f_{c(t)}}\right)\right]^2, \quad (14)$$

где $\sigma_{c(t)}$ – номинальное значение напряжения при сжатии (растяжении), МПа; $f_{c(t)}$ – предельное значение напряжения при сжатии (растяжении), МПа; $A_{c(t)}$ – экспериментальные коэффициенты, принимающие значения $-0,0236$ и $0,0496$ в зависимости от напряженного состояния (сжатия или растяжения).

Связывающая способность и влагоемкость бетона

В бетоне хлориды могут находиться в двух состояниях: свободном и связанном

$$C_t = C_b + w_e \cdot C_f \quad (15)$$

Свободные хлориды (C_f), растворяются в поровой влаге (w_e) и диффундируют дальше в бетон. Хлориды, которые физически адсорбируются на поверхности пор, химически создают малорастворимые соединения с продуктами гидратации цемента, называют связанными (C_b). Они не принимают участия в диффузии хлоридов и не являются опасными для арматуры, в отличие от свободных хлоридов. Связывающая способность бетона определяется как производная от концентрации связанных хлоридов по концентрации свободных хлоридов ($\delta C_b / \delta C_f$).

Для нахождения связывающей способности бетона нужно установить взаимосвязь между связанными и свободными хлоридами.

Среди различных исследований три закона, три типа изотерм адсорбции, устанавливающих взаимосвязь между свободными и связанными хлоридами, применяются наиболее часто (см. рис. 9):

1. Линейный закон:

$$C_b = \alpha \cdot C_f \rightarrow \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \alpha; \quad (16)$$

2. Закон Френдлиха:

$$C_b = \alpha_f \cdot C_f^{\beta_f} \rightarrow \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \alpha_f \cdot \beta_f \cdot C_f^{\beta_f-1}; \quad (17)$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

3. Закон Лангмюра:

$$C_b = \frac{\alpha_l \cdot C_f}{1 + \beta_l \cdot C_f} \rightarrow \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\alpha_l}{(1 + \beta_l \cdot C_f)^2}; \quad (18)$$

где $\alpha, \alpha_f, \beta_f, \alpha_l, \beta_l$ – связывающие константы, определенные эмпирическим путем регрессионного анализа. Значения связывающих констант зависят от содержания три кальциевого алюмината C_3A в цементе, отвечающего за связывающую способность цемента. Для среднего значения $C_3A = 8 \%$, $\alpha = 0,147$, $\alpha_f = 0,256$, $\beta_f = 0,397$, $\alpha_l = 0,1185$, $\beta_l = 0,090$.

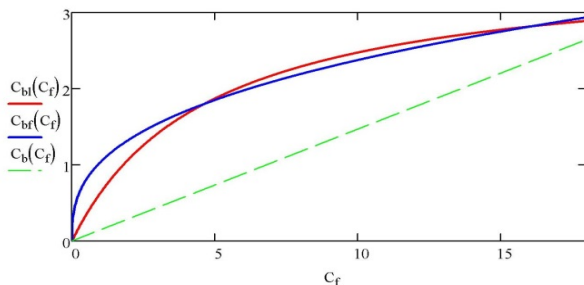


Рис. 2. Изотермы сорбции, построенные по линейному закону (■), закону Фрейндлиха (■) и закону Лангмюра (■)

Влагоемкость бетона ($\delta\omega_e / \delta h$) позволяет установить взаимосвязь между свободной поровой влагой (ω_e) и относительной поровой влажностью (h). Влагоемкость определяется согласно модели Браунера – Скальны – Бодора (*BSB model*) [11].

При учете связывающей способности ($\delta C_b / \delta C_f$) и влагоемкости бетона ($\delta\omega_e / \delta h$) уравнения (4-5) становятся нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных.

Следует отметить, что дифференциальные уравнения в частных производных представляют собой одну из наиболее сложных и одновременно интересных задач вычислительной математики. Решения линейных уравнений в частных производных, как правило, получаются вполне предсказуемыми, и их часто можно решить аналитически. Нелинейные уравнения, напротив, могут демонстрировать самые неожиданные решения, решить их аналитически практически невозможно.

Численное решение системы дифференциальных уравнений

Для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений (4-5) выбран метод конечных разностей в явной форме. На каждом шаге пространственно-временной схемы эффективные коэффициенты диффузии $D_{Cl,0}$ и $D_{h,0}$, функции концентрации свободных хлоридов (C_f) и функции относительной поровой влажности (h) находятся заново, после чего схема проверяется на устойчивость по критерию Куранта, для избежания «разболтки» системы. В программном комплексе Mathcad автором была написана программа, позволяющая выполнять все шаги алгоритма автоматически.

Эта модель позволяет определять время, через которое на определенной глубине (величина защитного слоя) концентрация хлоридов достигнет критического значения (время до начала коррозии арматуры), учитывая при этом, влияние температуры, влажности и времени, напряженного состояния, связывающей способности и влагоемкости бетона, и автоматически строить график распределения концентрации хлоридов по глубине в каждый момент времени (рис. 6), а так же поверхность изменения концентрации хлоридов (рис. 9 и 10).

Блок-схема предложенной модели

Блок-схема модели проникновения хлоридов в защитный слой железобетонных элементов мостовых конструкций с учетом формул (1-18) показана на рис. 3.

Пример прогнозирования сроков деградации железобетонных элементов мостов

Для примера выбрана железобетонная конструкция пролетного строения моста, которая эксплуатируется в пяти областях Украины с различным типом климата (рис. 4), имеет разное водоцементное отношение бетона, а так же разную толщину защитного слоя (табл. 2).

Толщина защитного слоя $h = 30, 40, 50$ мм.

Поверхностная концентрация хлоридов $C_0 = 3,5$ кг/м³.

Критическая концентрация хлоридов для начала коррозии на поверхности арматуры $C_{кр} = 0,9$ кг/м³.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Водоцементное отношение бетона – 0,4; 0,5; 0,6.

Таблица 2

Значение максимальной и минимальной средней температуры и влажности окружающей среды региона

Климатическая область	Температура, min, °C	Температура, max, °C	Влажность, min, %	Влажность, max, %
Черниговская	-7,1	18,7	69	89
Ивано-Франковская	-5,1	17,9	73	85
Херсонская	-3,2	23	60	83
Луганская	-5,9	21,7	59	85
Севастопольская	3,1	22	69	79



Рис. 4. Области с различным типом климата

Результаты приведены в табл. 3 и 4, а также на рис. 5-11.

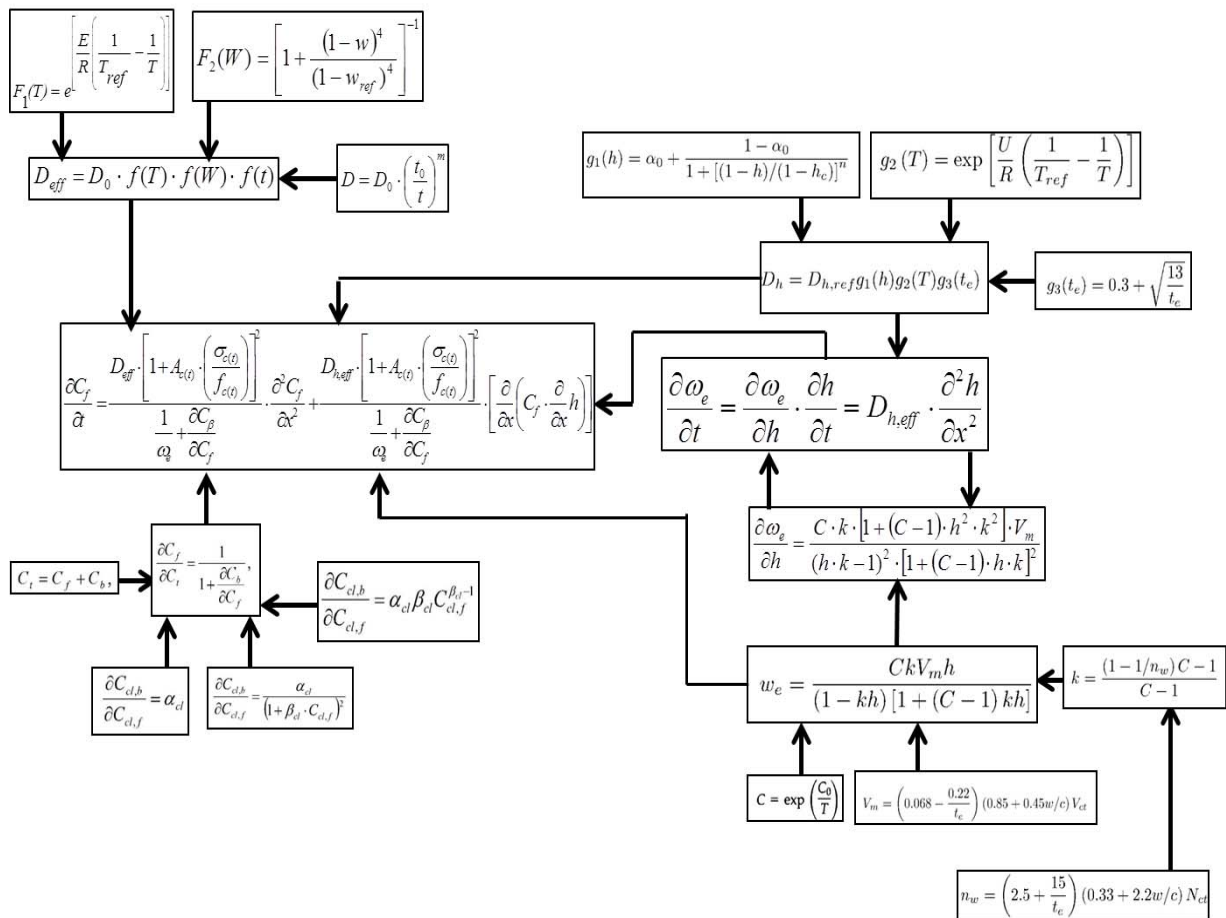


Рис. 3. Блок-схема предложенной модели

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблиця 3

Время накопления хлоридов до критического значения, $C_{кр}$ (с учетом связывающей способности)

Севастопольская	16,7	7,2	2,7	41,8	17,4	6,3	88,9	38,2	12,9
Луганская	28,6	12,1	4,1	72,9	30,6	9,4	138,3	66,5	20,3
Херсонская	25,7	10,1	3,9	65,6	27,3	8,9	127,7	59,4	19,0
Ивано-Франковская	15,9	7,1	2,3	39,9	17,1	5,4	85,3	36,9	11,1
Черниговская	13,8	7,7	2,5	35,1	15,2	5,9	76,5	32,4	12,1
Климатическая область	Время, лет								
	0,40	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6
	В/Ц			В/Ц			В/Ц		
	30 мм			40 мм			50 мм		
	Толщина защитного слоя								

Таблиця 4

Время накопления хлоридов до критического значения, $C_{кр}$ (без учета связывающей способности)

Севастопольская	6,6	3,1	1,6	16	7,2	2,9	33,4	14,7	5,5
Луганская	10,1	5,2	2,0	27,9	12,5	4,2	59,4	26	8,3
Херсонская	9,8	4,6	1,9	24,8	10,9	4,1	52,9	23,1	7,8
Ивано-Франковская	6,7	3,2	1,5	16,2	7,6	2,5	33,9	15,4	4,9
Черниговская	5,8	3,5	1,6	14,4	6,7	2,7	30,3	13,6	5,4
Климатическая область	Время, лет								
	0,40	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6
	В/Ц			В/Ц			В/Ц		
	30 мм			40 мм			50 мм		
	Толщина защитного слоя								

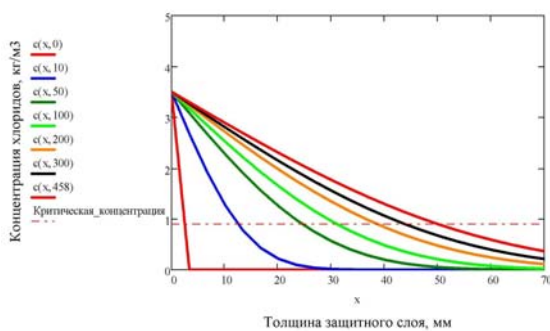


Рис. 5. Изменение концентрации хлоридов в бетоне защитного слоя в разные моменты времени в Севастопольском регионе

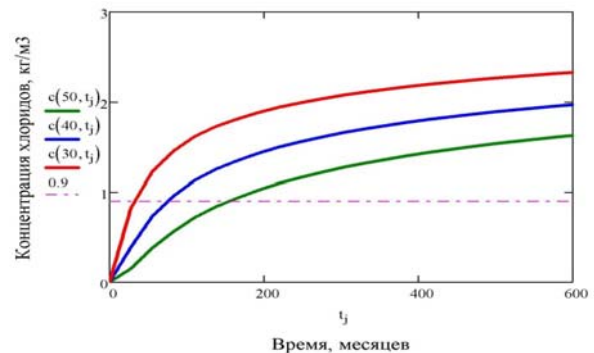


Рис. 6. Графики изменения концентрации хлоридов на глубине защитного слоя во времени (l_z) – 50 мм, (■) – 40 мм, (■) – 30 мм) при В/Ц=0,6)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

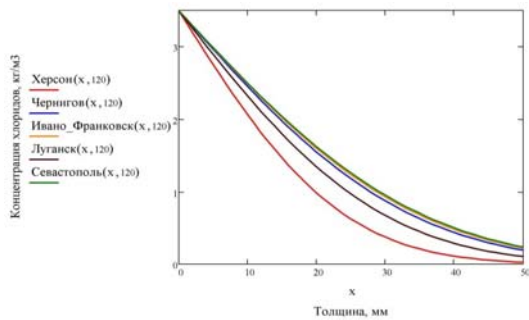


Рис. 7. Графіки розподілу концентрації хлоридів в бетоні через 120 місяців для п'яти кліматических областей

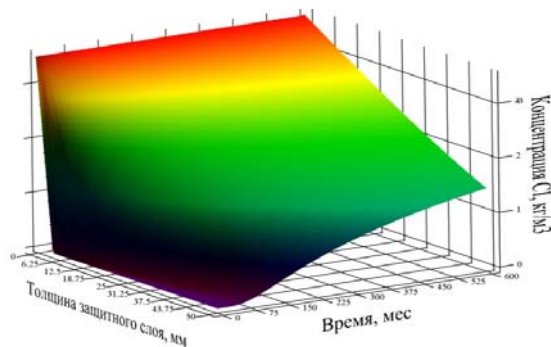


Рис. 8. Поверхня зміни концентрації хлоридів по товщині захисного шару та часу в Севастопольській області

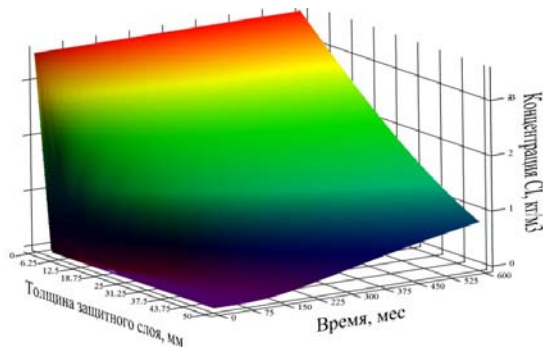


Рис. 9. Поверхня зміни концентрації хлоридів по товщині захисного шару та часу в Херсонській області

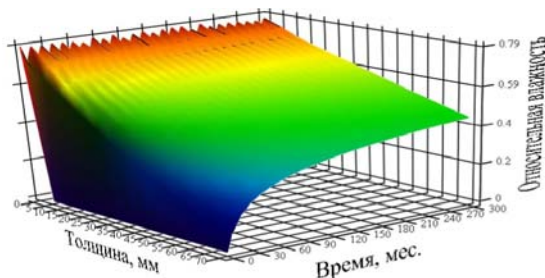


Рис. 10. Поверхня зміни вологості по товщині захисного шару та часу в Севастопольській області

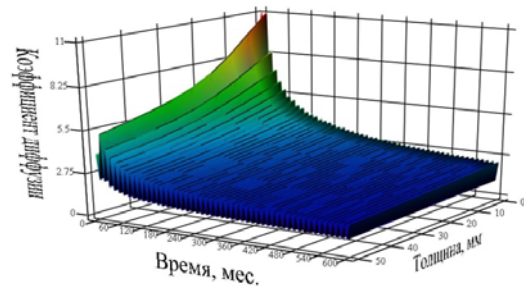


Рис. 11. Поверхня зміни ефективного коефіцієнта дифузії хлоридів в бетоні по товщині захисного шару та часу, $\text{мм}^2/\text{мес}$

При значенні часу $t = 458,2$ місяців концентрація, C , на глибині 50 мм досягає критичного значення, $C_{кр}$

Выводы

Большинство моделей прогнозирования сроков депассивации защитного слоя, основанных на решении дифференциального уравнения первого закона А. Фика в явном виде, не содержат функций влияния температуры и влажности, а так же функций влияния времени эксплуатации, напряженного состояния, связывающей способности бетона на скорость прохождения фронта депассивации.

Коефициент диффузии хлоридов в бетоне остается константой, даже при введении коэффициентов, учитывающих эти воздействия. Численное решение позволяет учитывать изменение коэффициента диффузии по толщине защитного слоя и времени.

В этой статье предлагается модель прогноза времени деградации защитного слоя до наступления процесса коррозии арматуры с учетом влияния температуры, влажности, времени эксплуатации, напряженного состояния, связывающей способности и влагоемкости бетона. Рассматриваются два механизма транспорта: диффузия и конвекция. Эта модель может быть применена для прогноза долговечности мостов на стадии проектирования.

Модель дает возможность строить поверхность изменения концентрации хлоридов по глубине и времени.

По результатам исследований и расчетов по предложенной модели, можно сделать вывод,

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

что параметрами, оказывающими воздействие на скорость проникновения хлоридов, являются водоцементное отношение бетона, толщина защитного слоя, климатические условия, а также связывающая способность бетона.

В дальнейшем требуется создание модели коррозии арматуры в бетоне с последующим разрушением защитного слоя для получения полного срока службы железобетонных элементов мостовых конструкций

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пухонто, Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений: (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен): монография [Текст] / Л. М. Пухонто. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 424 стр. с илл.
2. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии [Текст]. – Введ. 1986-01-01. – Госстрой СССР. – М: ЦИТП, 1986.
3. Brunauer, S. Adsorption in nonporous solids [Текст] / S. Brunauer, J. Skalny, E. Bodor // Journal of Colloid Interface Science, 1969, 30, 546–552.
4. Maage, M. Chloride penetration in high performance concrete exposed to marine environment [Текст] / M. Maage, S. Helland, J. E. Carlsen // Proc of RILEM international Workshop on Durability of High Performance Concrete, Wien, February 14-15 1994. – P. 194-207.
5. Mangat, P. S. Prediction of long term chloride concentration in concrete [Текст] / P. S. Mangat, B. T. Molloy // Materials and, Vol. 27. – P. 338-346.
6. Martin-Perez, B. Numerical solution of mass transport equations in concrete structures [Текст] / B. Martin-Perez, S. Pantazopoulou, M. Thomas, // Computers and Structures, 2001, 79. – P. 1251-1264.
7. Papadakis, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress [Текст] / V. G. Papadakis // Cement and Concrete Research, 2000, 30(3). – P. 1215-1223.
8. Saetta, A. Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete [Текст] / A. Saetta, R. Scotta, R. Vitaliani // ACI Materials Journal, 1993, 90(5). – P. 441-451.
9. Takewaka, K. Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments [Текст] / K. Takewaka, S. Mastumoto // ACI SP 109-17, American Concrete Institute, 1988. – P. 381-400.
10. Tingcheng, Yan Durability of Pre-stressed Concrete Structure Suffering from Chloride Ions' Invasion [Текст] / Yan Tingcheng, Lu Chunhua, Wu Zhiren, Liu Ronggui // International Journal of Nonlinear Science, 2008, Vol.5. – P. 184-192.
11. Xi, Y. Moisture diffusion in cementitious materials adsorption [Текст] / Y. Xi, Z. Bazant, H. Jennings // Advanced Cement Based Materials, 1994, 1(6). – P. 324-325

Д. О. ШЕСТОВИЦЬКИЙ^{1*}

^{1*} Каф. «Мости», Петербургський державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра І, Московський пр., 9, Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел./факс +7 (812) 572-6119, ел. пошта kmost@pgups.edu

ПРОГНОЗУВАННЯ СТРОКУ СЛУЖБИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТІВ

Мета. Ця робота присвячена розробці моделі прогнозування строку служби мостів на основі моделювання процесу проникнення хлоридів у захисний шар залізобетонних елементів мостів. **Методика.** В основі моделі знаходиться чисельне рішення системи диференціальних рівнянь аналітичної теорії дифузії другого закону А. Фіка. **Результати.** Наведено приклад розрахунку термінів депасивації захисного шару залізобетонних елементів мостів, що експлуатуються в п'яти кліматичних областях України. **Наукова новизна.** Запропоновано модель прогнозування строку служби залізобетонних мостів, засновану на оцінці часу хлоридизації захисного шару із урахуванням різних факторів: температури, вологості навколишнього середовища, напруженого стану, в'язучої здатності і вологоємності бетону. **Практична значимість.** Розроблена модель може бути застосована для прогнозу довговічності на стадії проектування.

Ключові слова: залізобетон; довговічність; хлоридизація; закони аналітичної теорії дифузії

D. SHESTOVITSKY^{1*}

^{1*} Dept. of Bridges, Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, Russia, 190031, tel./fax +7 (812) 572 61 19, e-mail kmost@pgups.edu

SERVICE LIFE PREDICTION OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES.

Purpose. The present article is concerned with the development of service life prediction models of bridges, based on the process modeling of chlorides penetration into the protective layer of reinforced concrete bridge components. **Methodology.** The base of the model is a numerical solution of differential equation system of the analytic theory of Fick's diffusion second law. **Findings.** The example to be provided shows the depassivation deadlines' calculation for protective layer of reinforced concrete bridge components which are being exploited in 5 climatic areas of Ukraine. **Originality.** A model of working life prediction of reinforced concrete bridges has been offered, which is based on an assessment of chloridization time of protective layer, with allowance for large amount of factors: temperature, environmental humidity, state of tension, binding capacity and moisture capacity of concrete. **Practical value.** The developed model can be applied practically for the service life prediction at the design stage.

Keywords: reinforced concrete; durability; chloridization; laws of diffusion analytic theory

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. А. І. Лантухом-Ляценко (Україна).

Поступила в редколлегию 24.11.2013.

Принята к печати 29.11.2013.