

- данный вид грузов перевозится не только внутри Узбекистана, но и за его пределами;
- в структуре перевозимых грузов основную часть составляют нечесаное хлопковое волокно, пряжа, химические вещества, мучные изделия и сахар;
- экспортно-импортные операции тарно-штучных грузов осуществляются преимущественно в северном направлении через станцию Сары-Агач – Арысь, где поток разделяется на два направления: к областям России, расположенным в ее западной и восточной частях;
- часть экспортных грузов сдается по станции Сары-Агач Казахстану ввиду того, что он вошел в единый Таможенный союз с Россией;
- основными станциями погрузки тарно-штучных грузов являются: Чукурсай, Ташкент-товарная, Бухара, Хамза, Янги-юль, Аблык (ЛЦ Ангрэн), а выгрузки: Чукурсай, Ташкент-товарная, Бухара, Хамза и Сергили;

- организация вагонопотоков с мест погрузки требует изучения и впоследствии совершенствования с целью увеличения скоростей доставки грузов получателям;
- необходимо исследовать технологию доставки тарно-штучных грузов, следующих в местном сообщении на экспорт и поступающих по импорту.

Библиографический список

1. **Официальный сайт** Государственного комитета Республики Узбекистан по статистике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stat.uz>.
2. **Оптимизация** продвижения контейнеропотоков в логистической цепи на направлении Республика Казахстан – Российская Федерация : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. С. Абдикеримов. – Москва : МИИТ, – 2009. – 24 с.

УДК 624.21.093.004

Э. С. Карапетов, Д. А. Шестовицкий

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ С УЧЕТОМ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ БЕТОНА ЗАЩИТНОГО СЛОЯ

Рассмотрена проблема стремительного роста количества находящихся в аварийном состоянии железобетонных мостов во многих странах. Особое внимание уделено необходимости создания моделей и методик прогнозирования срока службы железобетонных мостов с учетом различных факторов и влияний. Предложена модель, основанная на оценке времени хлоридизации защитного слоя с учетом многочисленных факторов: температуры, влажности окружающей среды, напряженного состояния, связывающей способности и влагоемкости бетона.

железобетон, долговечность, хлоридизация, законы диффузии А. Фика, нелинейные дифференциальные уравнения, связывающая способность, влагоемкость.

Введение

В последние 20–25 лет проблема оценки эксплуатационной надежности и долговеч-

ности железобетонных мостов стала актуальной для многих стран. Приходится констатировать, что сейчас стремительно растет количество мостовых сооружений разных

лет постройки, физическое состояние которых вызывает опасение. Для безаварийной эксплуатации и продления ресурса сооружений нужны новые научные подходы к оценке и прогнозу технического состояния элементов мостов на всех стадиях их жизненного цикла. Нужны алгоритмы, которые определили бы количественные критерии уровня надежности и прогноза ресурса элементов.

Для большинства бетонных и железобетонных конструкций характерна подверженность влиянию углекислого газа, содержащегося в атмосфере, что приводит к карбонизации защитного слоя и коррозии арматуры. Характерной 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 среднее и сильноагрессивное [1]. Агрессивное влияние хлоридов доказывается примерами внезапного разрушения конструкции вследствие коррозии арматуры.

Обрушение пешеходного моста в 2000 г. в городе Шарлотт (США) привело к травмированию более ста человек (рис. 1). Мост



Рис. 1. Обрушение пешеходного моста в городе Шарлотт

был построен в 1995 г., 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 г. Путепровод был открыт в 1960 г. и пропускал около сорока тысяч транспортных средств в день. Его разрушение было вызвано коррозией, возникшей под влиянием антигололедных средств, в совокупности с воздействием интенсивного движения транспорта.

В основе описания процесса проникновения хлорида в бетон лежит дифференциальное уравнение аналитической теории диффузии второго закона Адольфа Фика [2]. Решение этого уравнения является основой для большинства моделей прогнозирования времени накопления критической концентрации ионов хлоридов у поверхности арматуры в железобетонных мостовых конструкциях.

II 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, м²/с; 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.

Данное аналитическое решение (1–3) нашло широчайшее применение в расчетах ввиду своей простоты и удобства применения. Однако такой подход имеет явные недостатки, а именно:

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

Настоящая работа ставит целью разработать модель прогнозирования срока службы мостов на основе моделирования процесса проникновения хлоридов в защитный слой железобетонных элементов мостовых конструкций с учетом различных влияющих факторов.

1 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.

2 Определяющая система дифференциальных уравнений

При одновременном учете диффузии, конвекции и связывающей способности од-

номерное уравнение диффузии (1) примет вид:

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

где C_f – концентрация свободных хлоридов в бетоне, кг/м³; C_b – концентрация связанных хлоридов в бетоне, кг/м³; h – относительная влажность в бетоне, м²/с; ω_e – свободная поровая влага; $\partial C_b / \partial C_f$ – связывающая способность бетона.

В уравнении (1) при учете конвекции появляется неизвестная функция относительной поровой влажности h , которая, как и концентрация хлоридов, изменяется в зависимости от времени и глубины 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 – относительная поровая влажность; D_h^* – эффективный коэффициент диффузии влаги в бетоне; $\partial \omega_e / \partial h$ – влагоемкость бетона.

Система дифференциальных уравнений (4–5) является основой предложенной модели.

3 Эффективные коэффициенты диффузии D_{Cl}^* и D_h^*

Эффективные коэффициенты диффузии носят такое название, потому что учиты-

вают 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.

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

Наиболее опасным для проникновения хлоридов 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 (рис. 2):

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

где φ_{\max} – максимальное среднее значение параметра (температуры, влажности); φ_{\min} –

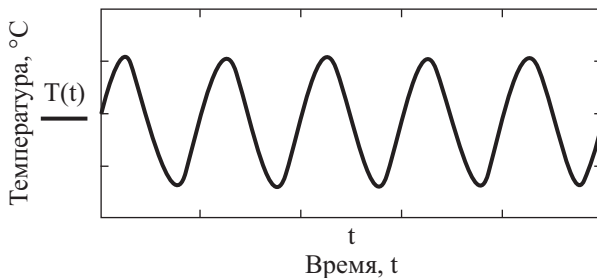


Рис. 2. Изменение температуры по синусоидальному закону

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, 8,314·10⁻³ 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.

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:

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

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.

3.2 Зависимость диффузии от времени эксплуатации

Коэффициенты диффузии хлоридов и влаги в бетоне $D_{Cl,0}$, $D_{h,0}$ часто рассматриваются как независимый от времени параметр. 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.

3.3 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 напря-

женного состояния (сжатия или растяжения). Там же проведены экспериментальные исследования по определению влияния напряженного состояния на коэффициент диффузии хлоридов в бетоне, в ходе которых 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).

4 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, а химически создают малорастворимые соединения с продуктами гидратации цемента, называются 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 нужно установить взаимосвязь между связанными и свободными хлоридами.

Среди различных исследований три закона, три типа изотерм сорбции, устанавливающих взаимосвязь между свободными и связанными хлоридами, применяются наиболее часто (рис. 3).

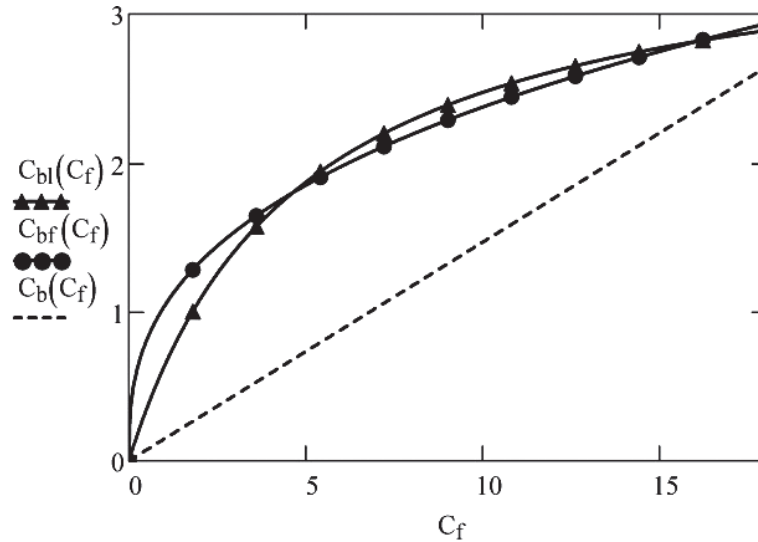


Рис. 3. Изотермы сорбции, построенные по линейному закону (---), закону Фрейндлиха (●) и закону Лангмюра (▲)

1. Линейный закон:

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

2. Закон Френдлиха:

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

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 α , α_f , β_f , α_l , β_l – связывающие константы, определенные эмпирическим путем регрессионного анализа. Значения связывающих констант зависит от содержания трикальциевого алюмината C_3A отвечающего за связывающую способность цемента. Для среднего значения $C_3A = 8\%$, $\alpha = 0,147$, $\alpha_f = 0,256$, $\beta_f = 0,397$, $\alpha_l = 0,1185$, $\beta_l = 0,090$.

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 (*BSBmodel*) [11].

При учете связывающей способности $\delta C_b/\delta C_f$ и влагоемкости бетона $\delta\omega_e/\delta h$ уравнения (4–5) становятся нелинейными диф-

ференциальными 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.

5 Численное решение системы дифференциальных уравнений

Для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений (4–5) выбран метод конечных разностей в явной форме. На каждом этапе 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

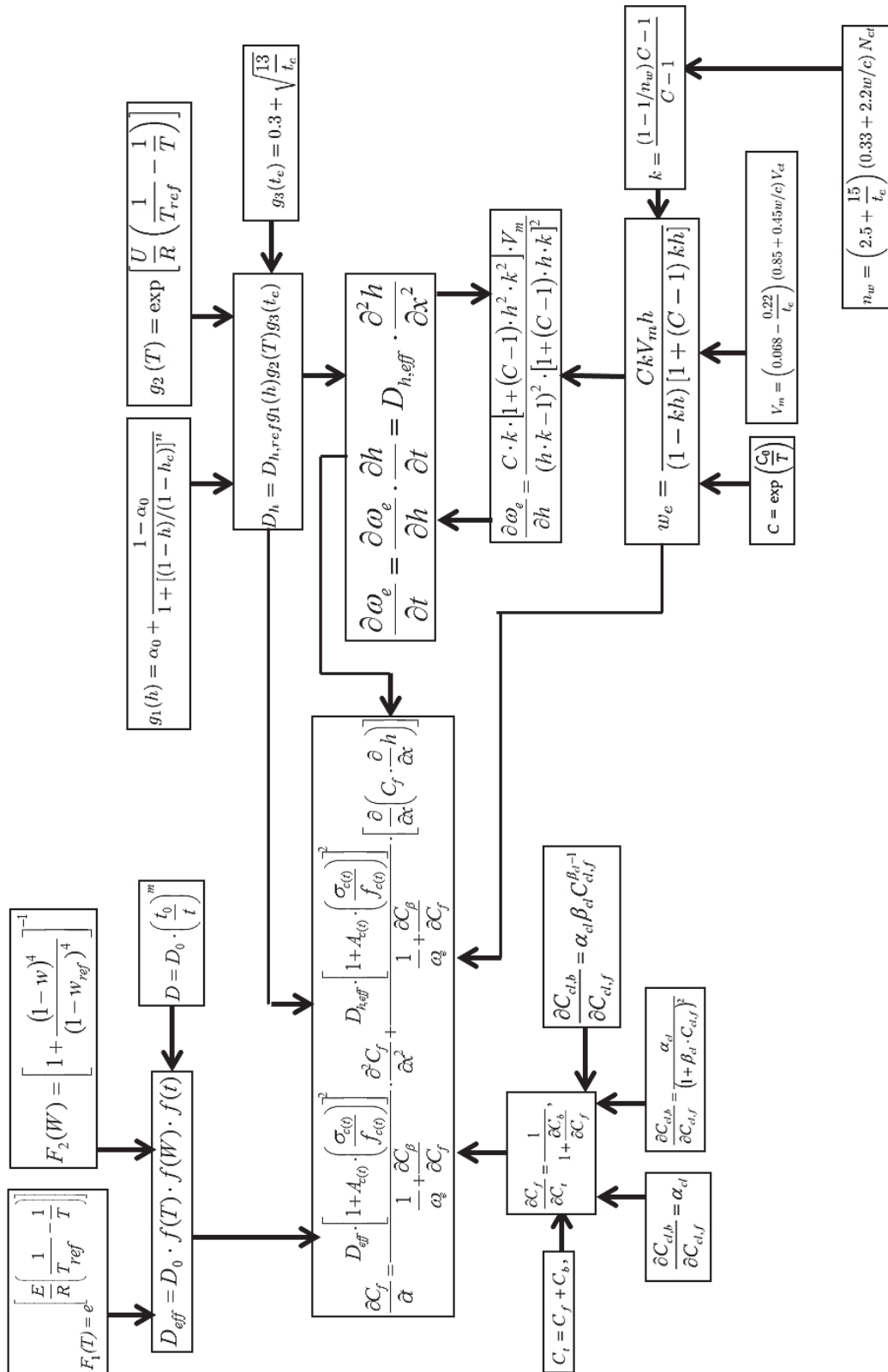


Рис. 4. Последовательность расчета предложенной модели

«разбалтывания» системы. В программном комплексе Mathcad авторами 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, времени, напряженного состояния, связывающей способности и влагоемкости бетона. Она также позволяет автоматически строить график распределения концентрации хлоридов по глубине в каждый момент времени (рис. 6) и определять поверхность изменения концентрации хлоридов (рис. 9, 10).

6 Блок-схема предложенной модели

Блок-схема модели проникновения хлоридов в защитный слой железобетонных элементов мостовых конструкций с учетом формул (4–18) показана на рис. 4.

7 Пример прогнозирования сроков деградации железобетонных элементов мостов

В качестве примера оценки сроков деградации железобетонных элементов выбран одинаковый тип конструкции железобетонного пролетного строения моста, который эксплуатируется в пяти областях Украины с различными климатическими условиями (рис. 5) (табл. 2) и имеет разное водоцементное отношение бетона, а так же разную толщину защитного слоя.

Необходимые исходные данные для расчета сроков деградации железобетонных элементов:

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;

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

Результаты расчета приведены в табл. 3 и 4, а также на рис. 6–12.



Рис. 5. Области с различным типом климата

ТАБЛИЦА 2. Значение максимальной и минимальной средней температуры и влажности окружающей среды региона

Климатическая область	Температура, min, °С	Температура, max, °С	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

ТАБЛИЦА 3. Время накопления хлоридов до критического значения $S_{кр}$ (с учетом связывающей способности)

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

ТАБЛИЦА 4. Время накопления хлоридов до критического значения $S_{кр}$ (без учета связывающей способности)

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

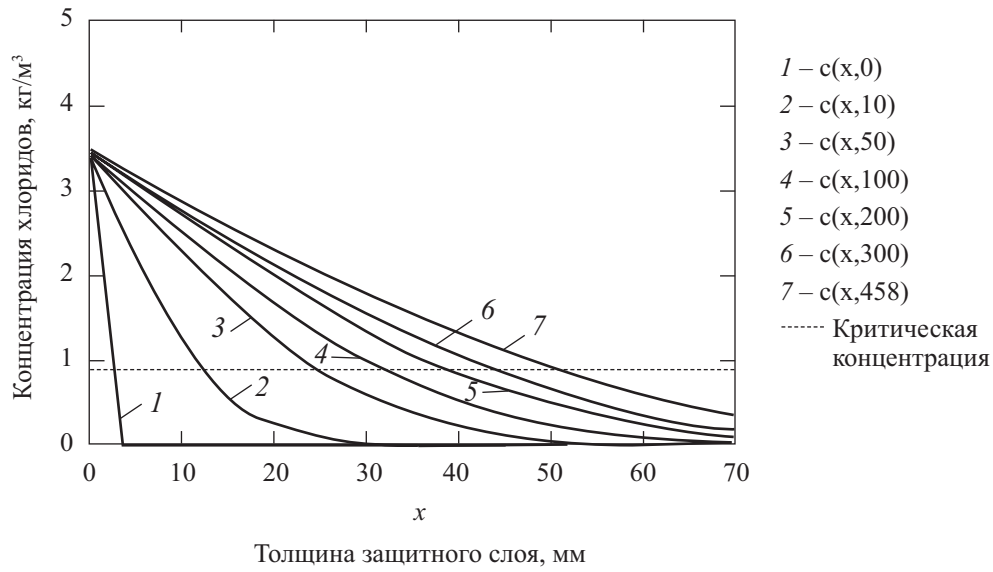


Рис. 6. Изменение концентрации хлоридов в бетоне защитного слоя в разные моменты времени в Севастопольском регионе

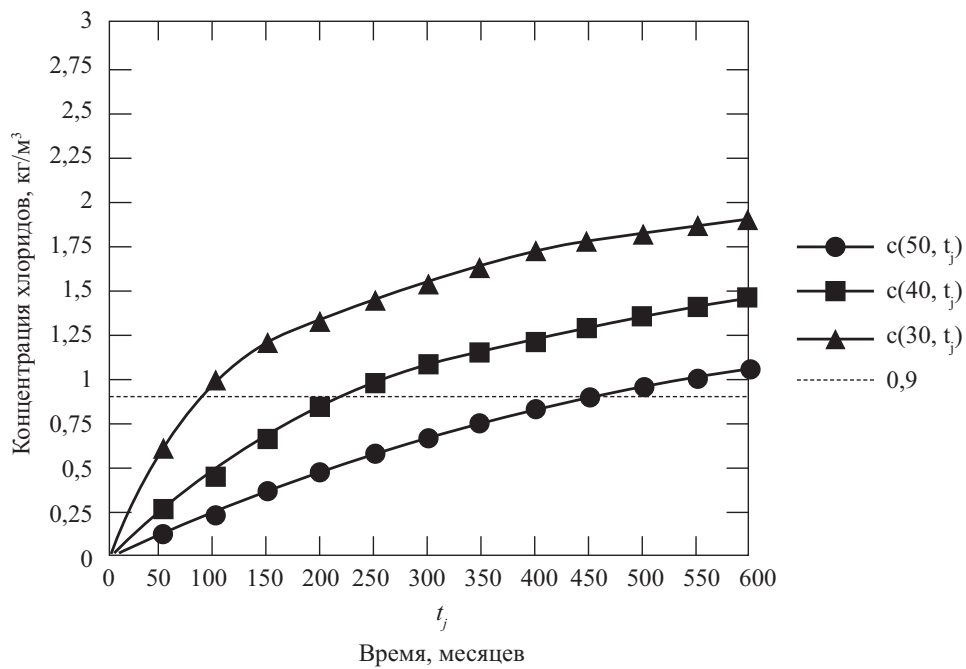


Рис. 7. Графики изменения концентрации хлоридов на глубине защитного слоя во времени ((●) – 50 мм, (■) – 40 мм, (▲) – 30 мм) при $V/C = 0,6$

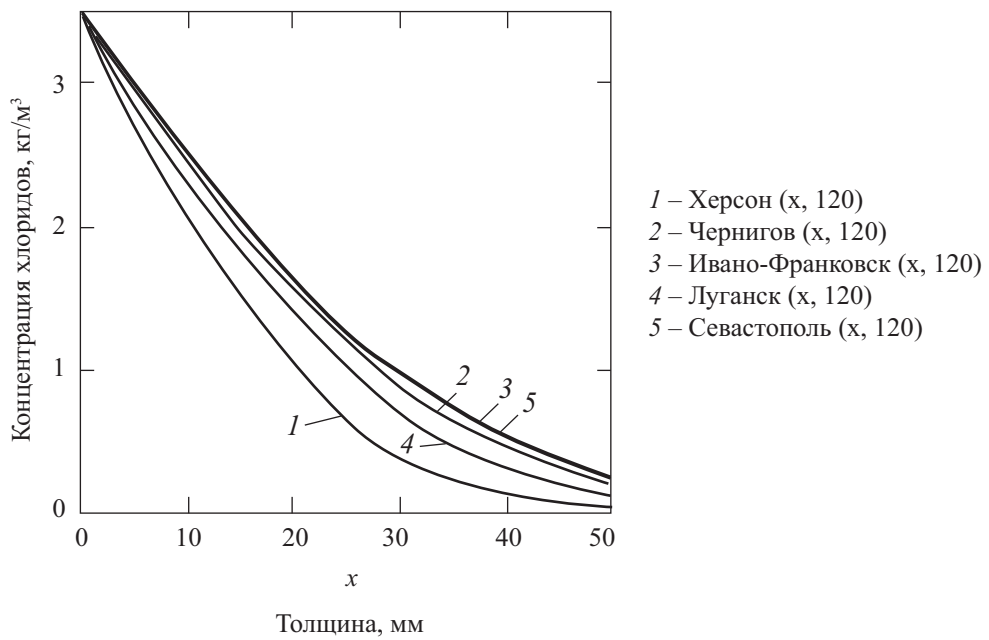


Рис. 8. Графики распределения концентрации хлоридов в бетоне через 120 месяцев для пяти климатических областей

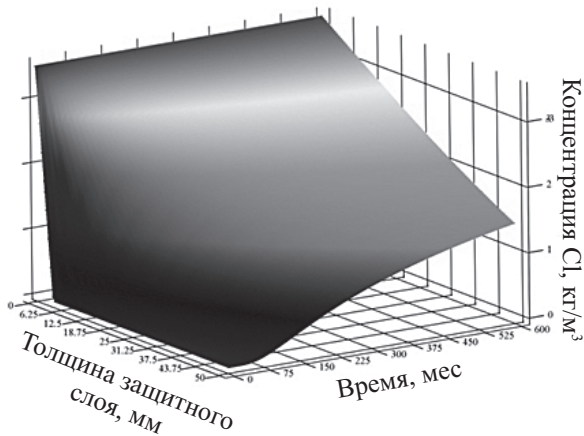


Рис. 9. Поверхность изменения концентрации хлоридов по толщине защитного слоя и времени в Севастопольской области

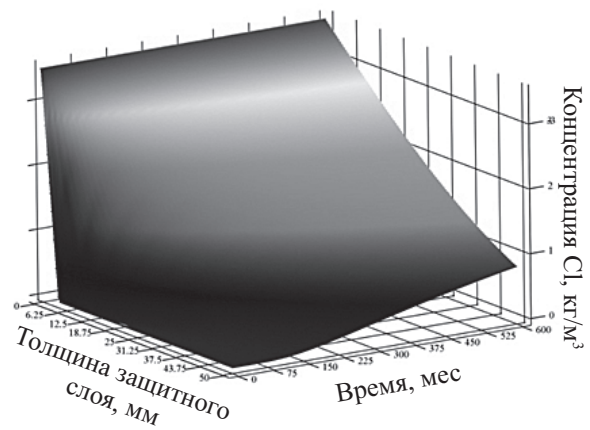


Рис. 10. Поверхность изменения концентрации хлоридов по толщине защитного слоя и времени в Херсонской области

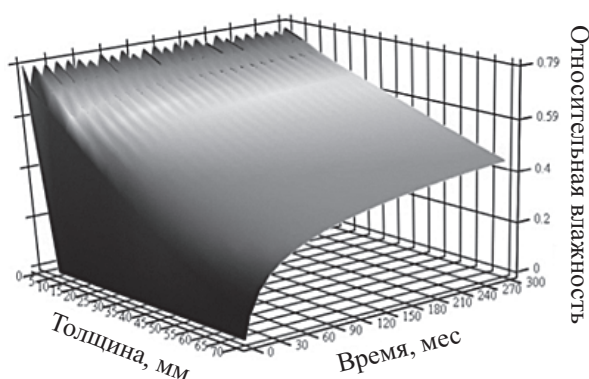


Рис. 11. Поверхность изменения влажности по толщине защитного слоя и времени в Севастопольской области

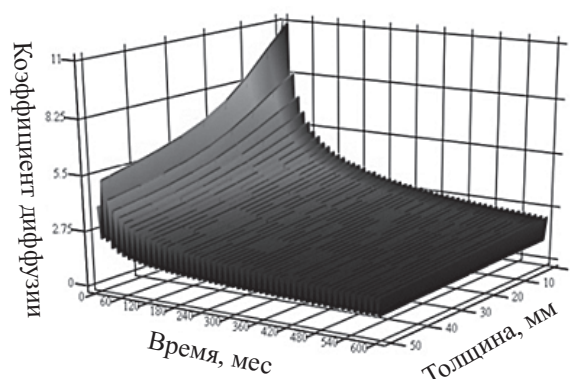


Рис. 12. Поверхность изменения эффективного коэффициента диффузии хлоридов в бетоне по толщине защитного слоя и времени, мм²/мес

При значении времени $t = 458,2$ месяцев концентрация C , на глубине 50 мм достигает критического значения $C_{кр}$.

Заключение

– Большинство моделей прогнозирования сроков депассивации защитного слоя, основанных на решении дифференциальных уравнений первого и второго законов А. Фика, носят общий поверхностный характер, они не учитывают влияние температуры и влажности, а также времени эксплуатации, напряженного состояния, связывающей способности бетона на скорость прохождения фронта депассивации.

– В данной 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. Такая модель может быть применена для прогноза долговечности на стадии проектирования.

– Модель дает возможность автоматически строить график и распределение концентрации хлоридов по глубине в каждый

момент времени, а также поверхности изменения концентрации хлоридов по глубине и времени.

– По результатам исследований и расчетов по предложенной модели можно сделать вывод, что определяющими параметрами для проникновения хлоридов являются водоцементное отношение бетона, толщина защитного слоя, климатические условия, а также связывающая способность бетона.

– В дальнейших исследованиях планируется создание модели коррозии арматуры в бетоне с разрушением защитного слоя с целью определения реального срока службы элементов железобетонных мостовых конструкций.

Библиографический список

1. **СНиП 2.03.11–85.** Защита строительных конструкций от коррозии. – Москва, 1985.
2. **Долговечность** железобетонных конструкций инженерных сооружений : монография / Л. М. Пухонто. – Москва : Изд-во АСВ, 2004. – 424 с.
3. **Xi, Y., Bazant, Z., Jennings, H.** (1994). Moisture diffusion in cementitious materials adsorption. *Advanced Cement Based Materials*, 1 (6), 324–325.
4. **Martin-Perez, B., Pantazopoulou, S., and Thomas, M.** (2001). Numerical solution of mass

transport equations in concrete structures. *Computers and Structures*, 79, 1251–1264.

5. **Saetta, A.**, Scotta, R., and Vitaliani, R. (1993). Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete. *ACI Materials Journal*, 90 (5), 441–451.

6. **Takewaka, K.**, Mastumoto, S. (1988). Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments. ACI SP 109–17, American Concrete Institute, 381–400.

7. **Maage, M.**, Helland, S., Carlsen, J. E. (1994). Chloride penetration in high performance concrete exposed to marine environment. *Proceedings of RILEM international Workshop on Durability of High Performance Concrete*, Wien, 194–207.

8. **Mangat, P.S.**, Molloy, B. T. Predicting of long term chloride concentration in concrete. *Materials and Structures*, 27, 338–346.

9. **Papadakis, V. G.** (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30 (3), 1215–1223.

10. **Tingcheng, Y.**, Chunhua, Lu, Zhiren, Wu, Ronggui, Liu. (2008). Durability of Pre-stressed Concrete Structure Suffering from Chloride Ions' Invasion. *International Journal of Nonlinear Science*, 5 (2), 184–192.

11. **Brunauer, S.**, Skalny, J., Bodor, E. (1969). Adsorption in nonporous solids. *Journal of Colloid Interface Science*, 30, 546–552.

УДК 625.04

А. Ф. Колос, А. А. Морозова

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИБРОУСКОРЕНИЙ ЧАСТИЦ БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ОСЕВЫМИ НАГРУЗКАМИ

Рассмотрены результаты исследований уровня и характера изменений вертикальных и горизонтальных виброускорений частиц балластного слоя под подошвой шпалы и по глубине балластной призмы в зоне стыка рельсов при обращении опытного подвижного состава с осевыми нагрузками до 30 т и скоростью 70 км/ч на Экспериментальном кольце ВНИИЖТа. Получены зависимости величины виброускорений от осевой нагрузки и затухания ускорений по глубине балластного слоя.

виброускорение, балласт, балластный слой, подшпальное основание, основная площадка, повышенные осевые нагрузки, теория предельного равновесия, вибродинамическое воздействие, колебания, вибродинамика, несущая способность.

Введение

Одним из направлений развития железнодорожного транспорта является повышение осевых нагрузок подвижного состава до 30 т/ось [1]. Российский и зарубежный опыт по-

казывают, что при переходе на новые условия обращения подвижного состава требуется специальная подготовка железнодорожного пути [2]. Повышение осевых нагрузок вызывает увеличение вибродинамического воздействия на железнодорожный путь, которое,