

МЕТОДИКА ВЕРОЯТНОСТНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ МОСТОВ И ПУТЕПРОВОДОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ХЛОРИДСОДЕРЖАЩИХ ЖИДКИХ СРЕД

Многие параметры, влияющие на долговечность железобетонных конструкций, нестабильны во времени и носят вероятностный характер, законы распределения воздействующих факторов подчиняются произвольным распределениям, а функции их влияния, как правило, нелинейные. Существующие методы расчета железобетонных конструкций не дают однозначного количественного ответа о долговечности или об остаточном сроке службы существующих железобетонных конструкций. Применение вероятностных методов проектирования позволяет учитывать изменения условий эксплуатации сооружений или требований к конструкциям и устанавливать их остаточный срок службы.

В настоящей статье, на основании проведенных теоретических и натурных исследований железобетонных пролетных строений автомобильных мостов и путепроводов, рассматривается методика определения срока службы при воздействии жидкой хлоридсодержащей среды, основанная на вероятностной модели и составленная с учетом климатических условий Республики Беларусь.

Предлагаемая методика учитывает периоды инициирования и распространения коррозии арматуры. Процесс инициирования начинается с эксплуатации конструкции и заканчивается после достижения концентрации ионов хлора в защитном слое бетона предельного значения. После чего начинается процесс распространения: депассивация арматуры; коррозия арматуры; инициирование трещины; развитие трещины; достижение трещины поверхности конструкции.

В соответствии с нормами [1], в предварительно напряженных конструкциях появление трещин не допускается, поэтому период распространения заканчивается после достижения трещиной поверхности конструкции. Таким образом, при прогнозировании долговечности железобетонной конструкции, рассматривается время до инициирования коррозии и время до достижения определенного критического уровня коррозии и сравнивается с проектируемым сроком эксплуатации. Срок нормальной эксплуатации конструкции заканчивается, когда коррозия арматуры достигает критического уровня, при котором трещины достигают поверхности конструкции.

В уравнениях предельного состояния для периода инициирования сравнивается фактическая концентрация ионов хлора на глубине залегания арматуры с предельной концентрацией, при которой начинается процесс коррозии арматуры. В уравнениях предельного состояния для периода распространения сравнивается прочность бетона на растяжение с расчетными растягивающими напряжениями в бетоне, при которых трещины достигают поверхности конструкции.

Вероятность окончания периода инициирования конструкции будет определяться вероятностью того, что на глубине залегания арматуры x фактическая концентрация хлоридов C_x превысит критическую C_{crit} :

$$P_{иниц} = P(C_x > C_{crit}). \quad (1)$$

Проведенным анализом преимуществ и недостатков различных моделей проникновения хлора в бетон (закон диффузии Фика, *DuraCrete*-модель, *Mejlbrot-Poulsen*-модель, конвекционная модель хлоридов и *ClinConc*-модель), для рас-

чета периода иницирования коррозии арматуры при воздействии хлоридсодержащих жидких сред принята *DuraCrete*-модель [2]. Эта модель позволяет использовать данные по проникновению хлоридов в железобетонные конструкции, полученные другими авторами.

Основным уравнением модели является:

$$C_x = C_{sn} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a(t)t}} \right], \quad (2)$$

где C_x – концентрация хлора на некоторой глубине, в % от массы цемента; C_{sn} – поверхностная концентрация хлора в % от массы цемента; x – глубина проникновения хлора, м; t – время воздействия, с; $D_a(t)$ – коэффициент диффузии хлора, м²/с, определяемый по формуле

$$D_a(t) = D_a(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n = k_c k_e k_t D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n, \quad (3)$$

где k_c – постоянный коэффициент, который учитывает влияние технологии изготовления; k_e – постоянный коэффициент, который учитывает влияние окружающей среды; k_t – постоянный коэффициент, который учитывает влияние метода испытаний; D_0 – коэффициент диффузии хлора, определенный при стандартных условиях, м²/с; t_0 – эталонное время, с; n – фактор возраста.

Как уже отмечалось выше, после достижения концентрации ионов хлора предельного значения начинается процесс распространения, который разделен на: иницирование трещины, развитие трещины, достижение трещины поверхности. Предельным будем считать достижение трещины поверхности [3, 4].

Вероятность окончания периода распространения конструкции определяется вероятностью того, что прочность бетона на растяжение превысит расчетные растягивающие напряжения в бетоне:

$$P_{\text{разр}} = p(\sigma_{ct} < f_{ctd}). \quad (4)$$

Растягивающие напряжения в бетоне в зависимости от величины защитного слоя c_{cov} и диаметра арматуры D определяются:

– при иницировании трещины

$$\sigma_{ct1} = \frac{(c_{cov}/D)^2 + (c_{cov}/D)}{(c_{cov}/D)^2 + (c_{cov}/D) + 0,5} f_{ctd}; \quad (5)$$

– при развитии трещины

$$\sigma_{ct2} = \frac{0,5 + (c_{cov}/D)}{1,665} f_{ctd}; \quad (6)$$

– при достижении трещины поверхности

$$\sigma_{ct3} = 2((c_{cov}/D) + 0,5) f_{ctd}; \quad (7)$$

– минимальные растягивающие напряжения

$$\sigma_{ct,\min} = (2c_{cov}/(D + 2d_0)) f_{ctd}. \quad (8)$$

Растягивающие напряжения в бетоне от коррозии арматуры определяются по формуле

$$\sigma_{ct}(t) = \frac{2E_{eff}d_v(t)}{(D + 2d_0) \left(\frac{c^2 + a^2(t)}{c^2 - a^2(t)} + v_c \right)}, \quad (9)$$

где E_{eff} – эффективный модуль упругости бетона; D – диаметр арматурного стержня; d_0 – толщина слоя продуктов коррозии в зоне сцепления арматуры с

бетоном; c – расстояние от поверхности до центра арматурного стержня, $c = c_{cov} + D/2$; c_{cov} – защитный слой бетона; v_c – коэффициент Пуассона для бетона, $v_c = 0,2$; $a(t) = [(D + 2d_0)/2] + d_5(t)$; $d_5(t)$ – толщина слоя продуктов коррозии.

Если растягивающие напряжения $\sigma_{ct}(t)$ меньше или равны минимальным растягивающим напряжениям $\sigma_{ct,min}$ – процесс инициирования ионов хлора в бетон не закончился, расчет срока службы конструкции ведется по вероятностной *DuraCrete*-модели.

Если растягивающие напряжения $\sigma_{ct}(t)$ превышают минимальным растягивающим напряжениям $\sigma_{ct,min}$ – начинается процесс распространения, то есть напряжения начинаем сравнивать с напряжениями:

$\sigma_{ct}(t) \leq \sigma_{ct1}$ – инициирование трещины;

$\sigma_{ct}(t) \leq \sigma_{ct2}$ – развитие трещины;

$\sigma_{ct}(t) \leq \sigma_{ct3}$ – достижение трещины поверхности.

Достижение трещиной поверхности конструкции устанавливает предельное состояние при процессе распространения.

Многие учитываемые факторы *DuraCrete*-модели являются стохастическими, в простейшем стационарном случае – случайными величинами с заданными законами распределения. Законы распределения воздействующих факторов подчиняются произвольным распределениям, а функции их влияния, как правило, нелинейные. Поэтому, для решения поставленной задачи использовалось имитационное моделирование и метод Монте-Карло. Метод Монте-Карло заключается в многократном розыгрыше значений влияющих факторов с последующим вычислением необходимых функционалов, например: фактической концентрации хлоридов на заданной глубине залегания арматуры; срока службы железобетонной конструкции и т.д.

Для компьютерной реализации метода Монте-Карло был разработан специализированный программный комплекс автоматизации имитационного моделирования «СМ-ДЭС», состоящий из трех модулей. Первый модуль отвечает за генерацию случайных величин. В нем реализованы две подсистемы:

1) подсистема генерации базовой случайной величины, подчиняющейся равномерному закону распределения на отрезке $[0; 1]$;

2) подсистема генерации случайной величины с основными типовыми законами распределения (нормальное, бета, гамма, Вейбулла, треугольного, трапецеидального, Лапласа, арксинуса, Пуассона и др.), а также произвольного распределения, заданного функцией распределения и гистограммой.

Второй модуль пакета – вычислительный – отвечает за функциональные преобразования с множеством влияющих случайных величин. Поскольку исследуемые модели могут включать сколь угодно сложные и разнообразные математические преобразования, то в качестве вычислительного модуля использовалось ядро символьных вычислений пакета компьютерной математики Maple. Для взаимодействия программы «СМ-ДЭС», написанной в среде программирования Delphi, с ядром Maple используется стандартная технология OpenMaple и дополнительная библиотека преобразования типов данных.

Третий модуль пакета «СМ-ДЭС» анализирует результаты статистических испытаний – оценкой основных числовых характеристик, в том числе квантилей распределения случайных величин и вероятностей событий.

Программа «СМ-ДЭС» работает следующим образом. Первоначально формирует текстовую строку, соответствующую принятой вероятностной модели – математическую функцию $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ множества аргументов, записанную

на языке Maple. Для получения очередной реализации метода Монте-Карло разыгрывается случайный вектор (x_1, x_2, \dots, x_n) . Его значения передаются в ядро Maple с запросом на вычисление вещественной функции $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Процедура повторяется указанное число раз с последующим статистическим анализом.

В предлагаемую модель расчета долговечности железобетонных конструкций, подверженных воздействию жидкой агрессивной хлоридсодержащей среды, входят следующие вероятностные модели параметров и факторов базисных переменных.

Толщина защитного слоя бетона. Проектная толщина защитного слоя бетона должна быть не менее 40 мм [5] из условий защиты арматуры от коррозии, воздействия огня и из условий обеспечения совместной работы арматуры с бетоном. Для статистического моделирования толщины защитного слоя принят подход, при котором защитный слой бетона c_{cov} является детерминированной величиной, а отклонение Δc носит случайный характер. При вероятностном моделировании отклонений толщины защитного слоя бетона Δc приняты следующие параметры: $\mu = 0 \dots +10$ мм; $\sigma = 5 \dots 10$ мм.

Проектный срок службы. В соответствии с ТКП 45-3.03-232-2011 [6] проектный срок службы мостов – 100 лет. Проектный срок службы элементов мостовых сооружений, при выполнении нормативных условий содержания и ремонтов, составляет для конструкций пролетных строений с пролетами более 33 м $t_p = 100$ лет, для конструкций пролетных строений с пролетами 33 м и менее $t_p = 75$ лет.

Параметры, учитывающие влияние окружающей среды. Модель *DuraCrete* использует три фактора, учитывающих влияние окружающей среды (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры DuraCrete-модели, учитывающие влияние окружающей среды

Параметр	Описание	Формула определения
$k_{c,T}$	Коэффициент, который учитывает влияние температуры на поверхностное содержание хлора	$k_{c,T} = \frac{C_{sn}(T, Cl_f)}{C_{sn,eq}(+20^\circ C, Cl_f)} = e^{\left[\frac{1700}{273+T} - \frac{1700}{273+20} \right]}$
$k_{D,RH}$	Коэффициент, который учитывает влияние влажности на коэффициент диффузии	$k_{D,RH} = \frac{D_a(T, RH)}{D_a(T, 100\%RH)} = \left(1 + \frac{(1-RH)^4}{(1-RH_c)^4} \right)^{-1}$
$k_{D,T}$	Коэффициент, который учитывает влияние температуры на коэффициент диффузии	$k_{D,T} = \frac{D_a(T, RH)}{D_a(+20^\circ C, RH)} = e^{\left[\frac{1700}{273+T} - \frac{1700}{273+20} \right]}$

В формулах таблицы 1: RH_c – влажность, при которой коэффициент диффузии $D(RH_c) = 1/2D(100\%RH)$, $RH_c = 83\%RH$; $D_a(T, RH) - D_a(t)$ полученный по кривым проникновения хлора при определенных температуре T и влажности RH ; $D_a(+20^\circ C, RH) - D_a(t)$ полученный по кривым проникновения хлора, при температуре $+20^\circ C$ и определенной RH ; $C_{sn}(T, Cl_f) - C_{sn}$ полученный по кривым проникновения хлора при воздействии раствора хлора с температурой T и определенной концентрацией, Cl_f ; $C_{sn}(+20^\circ C, Cl_f) - C_{sn}$ полученный по кривым проникновения хлора при воздействии раствора хлора при температуре $+20^\circ C$ определенной концентрации, Cl_f ; T – температура бетона, $^\circ C$.

Значения прочих параметров DuraCrete-модели.

Поверхностное содержание хлора, измеренное при эквивалентных условиях и качестве бетона, $C_{sn,eq}$, принято на основании исследования проникновения ионов хлора в несущие конструкции автодорожных мостов, выполненного в

работах [7, 8]. Срок эксплуатации мостов составлял 25–27 лет, бетон на портландцементе, $V/\Omega = 0,4 \dots 0,45$, расход вяжущего 260...420 $\text{кг}/\text{м}^3$. Величина $C_{sn,eq}$ составляет 1,0...2,7 % по массе цемента.

Критическая концентрация хлора C_{crit} принята на основании обзора данных, представленных различными авторами. В литературе значения C_{crit} изменяются от 0,1 до 2,0 % по массе цемента.

Коэффициент, который учитывает влияние состава бетона на поверхностное содержание хлора $k_{C,conc}$ принят на основании экспериментальных данных [2, 9, 10].

Коэффициент, который учитывает расстояние по горизонтали до источника хлоридов $k_{C,d}$, можно определить на основании анализа экспериментальных данных [11, 12, 13].

Коэффициент $k_{C,d}$ зависит от расстояния до дороги, от интенсивности и скорости движения, которые описаны параметром d_n . Этот параметр дает расстояние от дороги, при котором $k_{C,d} = 1,0$.

Коэффициент, который учитывает расстояние по вертикали к источнику хлоридов $k_{C,h}$, можно определить на основании экспериментальных данных, приведенных в работах [8, 14].

Коэффициент, который учитывает ориентацию поверхности по отношению к движению транспорта $k_{C,o}$, определен количественно при помощи данных [8].

Коэффициент, который учитывает условия набора прочности $k_{D,c}$, принят в соответствии с экспериментальными данными [2, 9, 10] (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры распределения вероятностей коэффициента $k_{D,c}$

Время набора прочности, дни	Среднее значение, μ	Стандартное отклонение, σ	Статистическое распределение
1	2,4	0,700	Beta (1.667, 1.905, 1.00, 4.00) $1,00 \leq k_c \leq 4,00$
3	1,5	0,300	Beta (2.148, 10.741, 1.00, 4.00) $1,00 \leq k_c \leq 4,00$
7	1,0	–	Det. (1)
28	0,793	0,102	Beta (4.445, 2.333, 0.40, 1.00) $0,40 \leq k_c \leq 1,00$

Коэффициент возраста, n , учитывающий уменьшение коэффициента диффузии D_a со временем, на основании экспериментальных данных, изложенных в [2, 7, 8, 9, 10] принят подчиняющимся бета-распределению с параметрами: $\mu = 0,3$; $\sigma = 0,12$ (4,075; 9,508; 0,0; 1,0).

Для значений влияющих факторов, характерных для эксплуатации железобетонных балок путепроводов в Республике Беларусь, в пакете «СМ-ДЭС» была построена теоретическая модель проникновения хлоридов в железобетонную конструкцию

$$R = (C_{crit} - C_x). \quad (10)$$

По модели определены значения вероятностей ресурсного отказа в течение различного срока эксплуатации для различных значений толщины защитного слоя бетона. При этом состоянию ресурсного отказа соответствуют отрицательные значения R , то есть, когда фактическая концентрация хлоридов C_x на глубине x превышает критическую концентрацию C_{crit} .

Выполнены расчеты вероятности ресурсного отказа несущей балки пролетного строения путепровода, для постоянных негативных воздействий хлора при поверхностном содержании равном 1,5 % и различных климатических условиях Республики Беларусь. Получены вероятности отказа конструкции и индексы надежности в зависимости от срока эксплуатации при постоянной величине

защитного слоя бетона и вероятности отказа конструкции и индексы надежности в зависимости от величины защитного слоя бетона при нормативном сроке эксплуатации равном 75 лет. Расчеты выполнены по критерию иницирования концентрации ионов хлора в бетоне.

Сравнительный анализ полученных значений вероятностей отказа и индексов надежности железобетонных балок пролетных строений путепроводов XD3 класса по условиям эксплуатации, подвергающиеся увлажнению растворами-антиобледенителями, содержащими ионы хлора, представлен на рисунках 1 и 2.

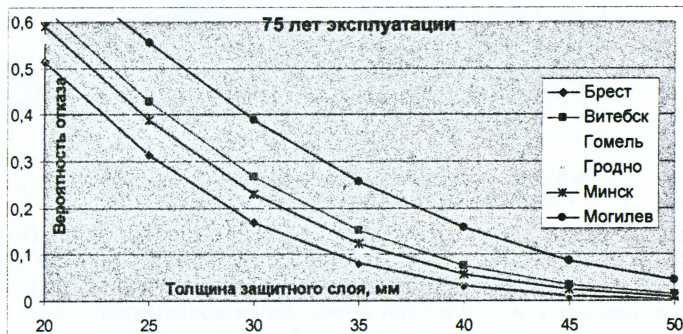


Рисунок 1 – Вероятности отказа железобетонного элемента в зависимости от величины защитного слоя бетона при нормативном сроке эксплуатации, равном 75 лет для областных центров Республики Беларусь

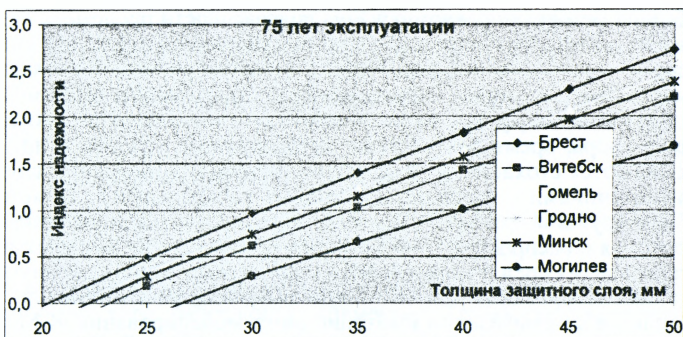


Рисунок 2 – Индексы надежности железобетонного элемента в зависимости от величины защитного слоя бетона при нормативном сроке эксплуатации, равном 75 лет для областных центров Республики Беларусь

С помощью программы «СМ-ДЭС» выполнен расчет вероятности отказа железобетонного элемента по модели распространения в зависимости от длительности фазы распространения, для трех различных критериев: 1 – иницирования трещины; 2 – развитие трещины; 3 – достижение трещиной поверхности. Расчет показал, что период распространения коррозии, который заканчивается после достижения трещиной поверхности конструкции, составил 6 лет. Результаты расчета представлены на рисунке 3.

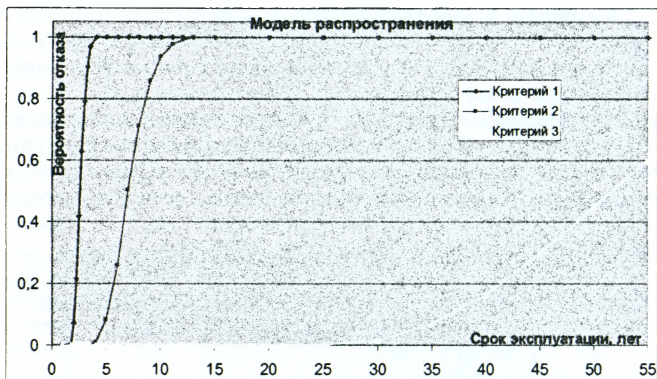


Рисунок 3 – Вероятность отказа железобетонного элемента в зависимости от длительности фазы распространения

При верификации достоверности предлагаемой модели выполнены расчеты изменения концентрации хлора в защитном слое бетона в зависимости от времени эксплуатации балок пролетных строений путепроводов. Результаты расчетов сравнивались с результатами определения концентрации хлора в защитном слое бетона балок пролетных строений путепроводов г. Гомеля. Сопоставление результатов расчетов и экспериментальных данных показало хорошую сходимость [15].

ВЫВОДЫ

Разработана методика прогнозирования долговечности пролетных строений автомобильных мостов и путепроводов при воздействии агрессивных хлоридсодержащих сред с использованием вероятностной модели расчета. Методика позволяет учитывать многочисленное количество факторов (толщину защитного слоя бетона, коэффициент диффузии хлора, критическую концентрацию, поверхностное содержание хлора, время воздействия, автодорожные условия и др.), часть из которых являются стохастическими: в простейшем стационарном случае – случайными величинами с заданными законами распределения. В методике для оценки конструкции по предельному состоянию, рассчитываются периоды иницирования и распространения коррозии арматуры при воздействии жидких хлоридсодержащих сред и сравниваются с проектным сроком эксплуатации.

Расчет прогнозирования долговечности выполняется с помощью программного комплекса автоматизации имитационного моделирования «СМ-ДЭС», использующего метод Монте-Карло, позволяющий оценивать вероятность ресурсного отказа по критерию проникновения хлоридов к арматуре железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях агрессивной среды. При этом может быть решена и обратная задача определения ресурса конструкций, обеспечиваемого с заданной вероятностью.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Надежность строительных конструкций. Общие принципы: СТБ ISO 2394-2007. – Введ. 01.07.2008. – Мн., 2008. – 72 с.
2. DuraCrete (1998a). Modelling of Degradation // Document BE95-1347/R4-5. The European Union – BriteEuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda. – 1998.
3. Martin-Perez, B. Service Life Modelling of R. C. Highway Structures exposed to chlorides / B. Martin-Perez // PhD Dissertation. – Department of Civil Engineering, University of Toronto. – 1999.

4. Tefpers, R. Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars / R. Tefpers // *Magazine of Concrete Research*. – March 1979. – Vol. 31. – Iss. 106. – P. 3–12.
5. Защита строительных конструкций от коррозии. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.01-111-2008 (02250). – Введ. 01.01.2009. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2009. – 94 с.
6. Мосты и трубы. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.03-232-2011 (02250). – Введ. 01.11.2019. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2011. – 304 с.
7. 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 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*. – Paris, 2000. – P. 85–103.
8. Lindvall, A. Mapping of the chloride load around two Swedish reinforced concrete bridges / A. Lindvall // *Publication P-02:2, Department of Building Materials, Chalmers University of Technology*. – Goteborg, 2002. – P. 52.
9. DuraCrete (1998a). *Modelling of Degradation // Document BE95-1347/R4-5. The European Union – BriteEuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda*. – 1998.
10. DuraCrete (1999f). *Quantification of the environmental parameters in the carbonation and chloride ingress models // Document BE95-1347/TG4/C. The European Union – BriteEuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Prepared at Chalmers University of Technology, Göteborg*. – 1999.
11. Blomqvist, G. Airborne spreading and deposition of de-icing salt – a case study / G. Blomqvist, E.-L. Johansson // *The Science of the Total Environment*. – 1999. – Vol. 235. – P. 161–168.
12. Eliasson, Å. Spridningavvägsaltkringsvägar (The spread of de-icing salts around roads) / Å. Eliasson // *Project work 20p, Naturgeografiskainstitutionen, Göteborgsuniversitet, Göteborg*, 1996. (in Swedish).
13. McBean, E. Migration pattern of de-icing salts from roads / E. McBean, S. Al-Nassri // *Journal of Environmental Management*. – 1987. – Vol. 25. – P. 231–238.
14. Fagerlund, G. Karteringavkloridbelastning vid Riksväg 40 – Resultatfran 5 vintersasoner (Mapping of the chloride load around a Swedish main road exposed to de-icing salts – Results after 5 winter seasons): Report TVBM-7162 / G. Fagerlund, J. Svard // *Division of Building Materials, Lund Technical University*. – Lund, 2001. – P. 12.
15. Талецкий, В.В. Нарушения несущих железобетонных конструкций путепроводов, вызванные хлоридной агрессивней / В.В. Талецкий, А.В. Степанова // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-технич. конф., Могилев, 19-20 апреля 2012 г. В 2 ч.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – Ч. 2. – С. 127.

УДК 624.016

Стороженко Л.И., Ермоленко Д.А., Демченко О.В.

РАБОТА ПОД НАГРУЗКОЙ СЖАТЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УСИЛЕННЫМИ ЯДРАМИ

Трубобетон является комплексной конструкцией, состоящей из стальной трубы и бетонного ядра, работающей совместно. Трубобетонные конструкции очень надежны в эксплуатации. В предельном состоянии они не теряют несущую способность мгновенно, как обычные железобетонные элементы, а еще долгое время способны выдерживать возрастающую нагрузку [1]. Прочность бетонного ядра, стесненного стальной оболочкой, как обоймой, значительно превышает приземную. Использование в строительстве трубобетонных конструкций, вместо железобетонных, дает возможность экономии стали и бетона [2]. И, таким образом, уменьшить вес сооружений, многократно повысить технические показатели традиционных стержневых конструкций, что особенно важно в строительстве многоэтажных, многопролетных объектов. Это также позволяет в условиях нехватки строительных площадей в крупных и средних городах решать целый ряд проблем в вопросах проектирования и производства строительных работ [3]. Кроме того, открывается перспектива использования в