

Намного дешевле и эффективнее при новом строительстве запроектировать и смонтировать гелиосистему. Солнечные коллекторы могут устанавливаться на горизонтальной крыше или площадке возле дома, на наклонной крыше или стене, выходящей на юг, а также могут монтироваться непосредственно в крышу или в стену здания, выполняя функции пассивного утеплителя наружной его части. На малоэтажных зданиях с пологой кровлей могут с успехом применяться «солнечные» крыши. Солнечным панелям еще на стадии разработки проекта здания должна быть отведена дополнительная роль элементов перекрытия и оформления фасада (как это сделано во многих европейских странах).

Энергетическая зависимость нашего государства от энергоносителей других стран вынуждает все чаще обращаться к созданию энергоэффективных зданий, к возобновляемым источникам энергии, самым эффективным из которых на сегодня является солнце. Около пяти миллиардов лет, по расчетам ученых, Солнце ещё будет существовать, излучая такое количество энергии за тридцать минут, которого хватит человечеству на целый год.

Положительный опыт работы гелиоустановок в РБ: бесплатность солнечной энергии (за энергию солнца не нужно платить), простоту конструкции и монтажа гелиоустановки, ее экологическую безопасность и надежность, позволяет заключить, что использование в Беларуси альтернативных возобновляемых источников энергии с целью экологически чистого, эффективного ресурсосбережения не только возможно, перспективно, но и совершенно необходимо.

УДК 624.21/.8.001.2:620.169.1

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ И ПУТЕПРОВОДОВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ТЕЧЕНИЕ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ВРЕМЕНИ

Р. Ю. ДОЛОМАНЮК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Введение. Для Республики Беларусь, входящей в единую транспортную систему Европы и имеющей на своей территории более 6 тыс. мостов, обеспечение их бесперебойной работы является важнейшей государственной задачей.

Основную долю конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в настоящее время, составляют железобетонные конструкции (ЖБК) различных типов. Мостовые сооружения, являясь первоочередными элементами на сети дорог Беларуси, в процессе эксплуатации должны эффективно и

качественно удовлетворять условиям бесперебойного и безопасного движения транспортных средств с расчетными скоростями и нагрузками в течение заданного срока эксплуатации.

Международный опыт развития дорожно-транспортной инфраструктуры показывает, что даже в самых развитых странах происходит недофинансирование дорожной отрасли, то есть уровень запросов пользователей всегда выше возможного уровня финансирования. В такой ситуации достигнуть максимальной стабильности дорожной сети можно лишь за счет внедрения и реализации оптимизированного программно-целевого подхода, а именно обоснованного и своевременного вложения имеющихся средств. Этой цели служат расчетно-аналитические модули:

- определение необходимых средств на содержание сооружений;
- определение необходимых средств на все виды ремонта;
- определение необходимых средств с учетом прогнозной долговечности сооружений.

На сегодня в мировой инженерной практике наряду с конструктивным проектированием строительных ЖБК используется термин «проектирование долговечности или срок службы».

Данный подход направлен на определение времени наступления предельного состояния железобетонных конструкций при помощи специальных алгоритмов, позволяющие прогнозировать процесс деградации конструкции с определенной степенью точности и при необходимости корректировать проектные решения для достижения требуемого срока службы [1].

К наиболее опасным процессам, влияющим на долговечность железобетонных мостовых сооружений, относят карбонизацию защитного слоя бетона и проникновение хлоридов (рисунок 1) [2].

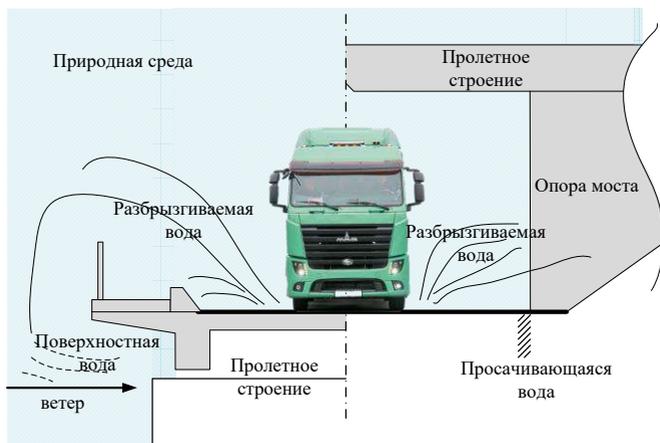


Рисунок 1 – Зоны моста с разным воздействием хлоридов

Поскольку большинство ЖБК эксплуатируются в различных атмосферных условиях, одной из основных причин появления и развития их коррозионных повреждений является карбонизация. Развитие коррозионных процессов в арматуре обусловлено в первую очередь пористой структурой бетона и, как следствие, его проницаемостью (рисунок 2) [3].

В мировой практике строительства искусственных сооружений выделяют два основных подхода к прогнозированию долговечности мостов. Первый основывается на введении функций деградации конструкций мостов. Второй подход базируется на прогнозировании изменения состояния арматуры в бетоне. Большинство моделей базируется на модели коррозии стальной арматуры, предложенной К. Туutti. Процесс диффузии углекислого газа и хлоридов в бетоне математически описываются классическими уравнениями аналитической теории диффузии (уравнения первого и второго законов Фика).



Рисунок 2 – Изменение щелочности бетона при воздействии агрессивной газовой среды

Данный алгоритм направлен на определение времени наступления предельного состояния ЖБК, позволяющий прогнозировать процесс деградации конструкции с определенной степенью точности и при необходимости корректировать проектные решения для достижения требуемого срока службы.

Основная часть. Целью работы является исследование выбранной модели прогноза долговечности железобетонных пролетных строений и путепроводов на стадии проектирования, позволяющая прогнозировать их срок службы в виде функции времени в зависимости от физико-механических свойств бетона и стальной арматуры, условий эксплуатации [1].

Модель рассматривает два периода граничных состояний:

1 Период иницирования коррозии стальной арматуры

Решая эти уравнения при определенных начальных условиях, получены выражения для определения времени инициирования стальной арматуры в результате карбонизации защитного слоя бетона t_{carb} и накопления критической концентрации хлоридов у поверхности стальной арматуры t_{CL} .

$$t_p = \frac{x_c^2}{2k_w^2 k_f^2 D_{CO_2} a^{-1} \cdot (c_1 - c_2)}, \quad (1)$$

где t_p – срок службы, лет; x_c – глубина карбонизации за время службы конструкции, м; k_w – коэффициент, учитывающий влияние погодных условий; k_f – коэффициент влияния морозной деструкции; D_{CO_2} – коэффициент диффузии CO_2 в бетоне, m^2/c ; C_1 , C_2 – соответственно содержание диоксида углерода на внешней поверхности бетона и на границе карбонизации (бесконечно малая величина), $кг/м^3$; a – реакционная емкость бетона (количество CO_2 , необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации цемента), $кг/м^3$.

$$t_{CL} = \frac{x_c^2}{4D_{CL} \cdot \left(erf^{-1} \cdot \left(\frac{C_s - C_{crit}}{C_s} \right) \right)^2}, \quad (2)$$

D_{CL} – коэффициент диффузии хлоридов в бетоне, m^2/c ; $erf()$ – функция ошибок Гаусса; C_s и C_{crit} – соответственно концентрация хлоридов на поверхности бетона защитного слоя и критическая концентрация хлоридов на поверхности арматуры, % по массе цемента [2].

2 Период активной коррозии стальной арматуры

Выход из строя железобетонных элементов (ЖБЭ) и ЖБК пролетных строений возможен при различных граничных состояний стальной арматуры. Таким образом, задавшись величиной критического уменьшения площади поперечного сечения стальной арматуры, используя формулу

$$x_{corr} = v_{corr} \cdot a_{pit} \cdot t, \quad (3)$$

где v_{corr} – скорость коррозии стальной арматуры, $мм/год$; a_{pit} – питтинговый фактор, учитывающий характер коррозии; t – время, лет, можно определить время наступления критического повреждения коррозией стальной арматуры.

Рассмотрим толщину защитного слоя бетона в период инициирования коррозии стальной арматуры, исходя из выражения (1), с учетом следующих заданных начальных условий.

1 Коэффициент влияния влажности за период наблюдений 1981–2010 гг. в течение времени от 0,4 до 0,08 (рисунок 3, таблица 1), а остальные параметры условно примем равные единице [3, 4].

Анализируя параметры критических значений коэффициента влияния влажности, получим следующие предельные значения глубины карбонизации (рисунок 4, таблица 2).

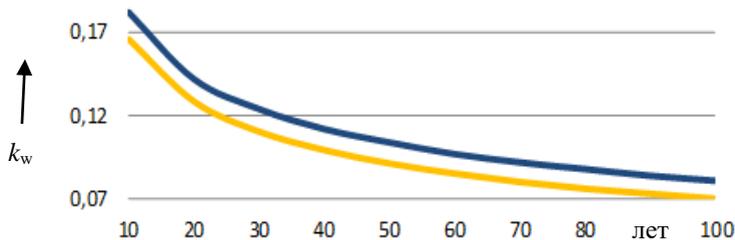


Рисунок 3 – Коэффициент влияния влажности на глубину карбонизации в течение времени

Таблица 1 – Коэффициент влияния влажности

Период, лет	Период увлажнения		Период, лет	Период увлажнения	
	min	max		min	max
10	0,182	0,165	60	0,097	0,085
20	0,142	0,128	70	0,092	0,080
30	0,124	0,110	80	0,088	0,076
40	0,112	0,099	90	0,084	0,073
50	0,104	0,091	100	0,081	0,070

$$x_c = k_w \sqrt{t_p} \cdot 2. \quad (4)$$

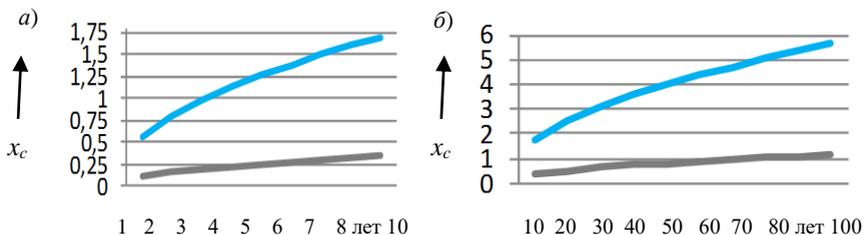


Рисунок 4 – В зависимости от коэффициента влияния влажности глубина карбонизации во времени: а – от 1 года до 10 лет;

б – от 10 до 100 лет

Таблица 2 – Глубина карбонизации во времени от 1 года до 100 лет в зависимости от коэффициента влияния влажности

x_c	Период, лет									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
min	1,788	2,529	3,09	3,577	4	4,381	4,732	5,059	5,366	5,656
max	0,357	0,506	0,619	0,715	0,8	0,876	0,946	1,012	1,073	1,131

2 В обычном строительстве популярен материал с морозостойкостью от F150 до F200. Бетон с повышенными показателями применяется при возведении строений на влагонасыщенном грунте или гидротехнических сооружений. Согласно [5] вероятность повреждения бетона в цикле «замораживание – оттаивание» представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Вероятность повреждения бетона в цикле «замораживание – оттаивание»

F	$\Delta P=0,05$	$\Delta P=0,1$	$\Delta P=0,15$	$\Delta P=0,2$	$\Delta P=0,25$
150	0,000333333	0,000666667	0,001	0,001333333	0,001666667
200	0,00025	0,0005	0,00075	0,001	0,00125
250	0,0002	0,0004	0,0006	0,0008	0,001
300	0,000166667	0,000333333	0,0005	0,000666667	0,000833333
350	0,000142857	0,000285714	0,000428571	0,000571429	0,000714286
400	0,000125	0,00025	0,000375	0,0005	0,000625
450	0,000111111	0,000222222	0,000333333	0,000444444	0,000555556
500	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005
550	0,0000909091	0,000181818	0,000272727	0,000363636	0,000454545
600	0,0000833333	0,000166667	0,00025	0,000333333	0,000416667
650	0,0000769231	0,000153846	0,000230769	0,000307692	0,000384615
700	0,0000714286	0,000142857	0,000214286	0,000285714	0,000357143
750	0,0000666667	0,000133333	0,0002	0,000266667	0,000333333
800	0,0000625	0,000125	0,0001875	0,00025	0,0003125
850	0,0000588235	0,000117647	0,000176471	0,000235294	0,000294118
900	0,0000555556	0,000111111	0,000166667	0,000222222	0,000277778

Исходя из выражения (1) и условий, что остальные параметры примем равными единице, выражение будет следующим:

$$x_c = k_f \sqrt{t_p \cdot 2}. \quad (5)$$

Используя критические значения коэффициента влияния морозного разрушения, получаем предельные значения глубины карбонизации (таблица 4).

Таблица 4 – Глубина карбонизации во времени от 1 года до 100 лет в зависимости от коэффициента влияния морозного разрушения

F	$\Delta P=0,05$		$\Delta P=0,1$		$\Delta P=0,15$		$\Delta P=0,2$		$\Delta P=0,25$	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
150	1,0239	10,666	1,0485	113,8534	1,0736	1216,28	1,0993	13003,62	1,1257	139135,75
200	1,0179	5,9015	1,0361	34,8442	1,0547	205,8191	1,0736	1216,28	1,0928	7190,7553
250	1,0143	4,1377	1,0288	17,1254	1,0435	70,9005	1,0584	293,6161	1,0736	1216,2801
300	1,0119	3,2655	1,0239	10,666	1,0361	34,8442	1,0484	113,8534	1,0609	372,0891
350	1,0102	2,7575	1,0204	7,6054	1,0309	20,9787	1,0414	57,8759	1,052	159,691
400	1,0089	2,4291	1,0179	5,9015	1,0269	14,3392	1,0361	34,8442	1,0453	84,6806
450	1,0079	2,201	1,0159	4,845	1,0239	10,666	1,032	23,4825	1,0402	51,7042
500	1,0071	2,034	1,0143	4,1377	1,0215	8,4175	1,0288	17,1254	1,0361	34,8442

Окончание таблицы 4

F	$\Delta P=0,05$		$\Delta P=0,1$		$\Delta P=0,15$		$\Delta P=0,2$		$\Delta P=0,25$	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
550	1,0064	1,9069	1,0129	3,6365	1,0195	6,9353	1,0261	13,2273	1,0328	25,2293
600	1,0059	1,807	1,0119	3,2655	1,0179	5,9015	1,0239	10,666	1,03	19,2777
650	1,0054	1,7266	1,0109	2,9813	1,0165	5,1482	1,0221	8,8902	1,0276	15,3527
700	1,0051	1,6605	1,0101	2,7575	1,0153	4,5795	1,0204	7,6054	1,0256	12,6311

Данные таблицы 4 приведённые к среднему значению, будут имеет следующий вид (рисунок 5).

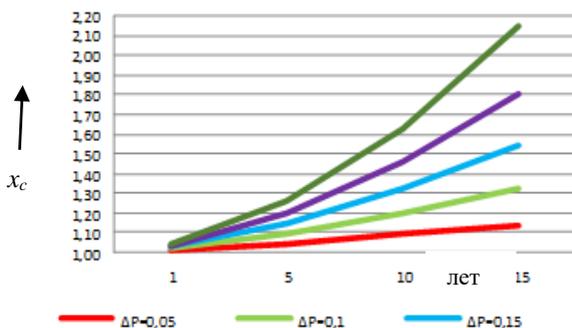


Рисунок 5 – Глубина карбонизации во времени от 1 года до 15 лет в зависимости от коэффициента влияния морозного разрушения

3 Рассчитанные по существующим методикам значения коэффициента диффузии по сечению реально эксплуатируемых конструкций являются переменной величиной для конструкций из бетона одного состава и эксплуатируемых в одинаковых условиях. Среднее значение коэффициента диффузии углекислого газа в железобетоне мостовых элементов варьируется в пределах от $2,5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ см²/с [6, 7].

Преобразовав формулу (1), получим

$$x_c = \sqrt{t_p \cdot 2D_{CO_2}} \quad (6)$$

Подставляя критичные значения коэффициента диффузии CO₂ в бетоне формулу (6), получаем следующие зависимости (таблица 5, рисунок 6).

Таблица 5 – Глубина карбонизации во времени от 1 года до 100 лет в зависимости от коэффициента диффузии

x_c	Период, лет												
	1	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
min	0,007	0,015	0,022	0,027386	0,031	0,038	0,044	0,05	0,054	0,059	0,063	0,067	0,07
max	0,01	0,022	0,031	0,038	0,044	0,054	0,063	0,07	0,077	0,083	0,089	0,094	0,1

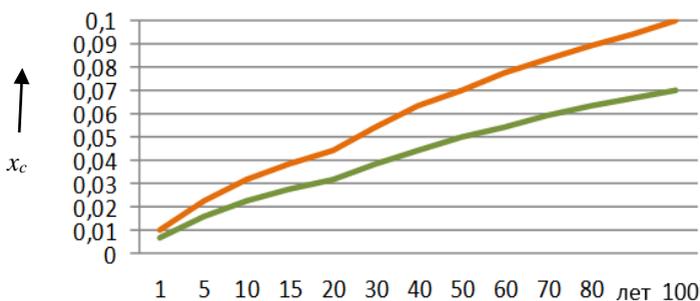


Рисунок 6 – Глубина карбонизации во времени от 1 года до 100 лет в зависимости от коэффициента влияния влажности

Заключение. Не соответствующий современному уровню развития строительной науки и возрастающим транспортным нагрузкам законодательная и нормативная базы. Это иногда порождает необоснованные решения в области капремонта, реконструкции, повышения надежности и долговечности сооружений, что приводит к экономическим потерям и затратам, нанося материальный и социальный ущерб обществу.

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

В статье проведены расчеты по выбранной модели прогноза времени деградации защитного слоя до наступления процесса коррозии арматуры с учетом влияния температуры, влажности, времени эксплуатации.

По результатам исследований и расчетов по выбранной модели изменения показателей глубины карбонизации во времени нуждаются в последующем математическом анализе вероятностного подхода к прогнозированию долговечности железобетонных элементов, который позволит более полно изучить физико-химические процессы в железобетонных конструкциях мостов и их влияние на физико-механические характеристики бетона и его защитные свойства по отношению к стальной арматуре.

Список литературы

1 Васильев, А. А. Модель прогнозирования долговечности железобетонных пролетных строений мостов / А. А. Васильев, Р. Ю. Доломанюк, С. В. Дашкевич // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2018. – № 1(36). – С. 121–123.

2 **Доломанюк, Р. Ю.** Воздействие хлоридов на железобетонные конструкции мостов с учетом особенностей бетона защитного слоя / Р. Ю. Доломанюк // Actualscientificresearch 2019. IV Междунар. науч.-практ. конференция. – М. : Олимп, 2019. – 168 с.

3 **Доломанюк, Р. Ю.** Функция изменения физико-механических свойств бетона во времени в зависимости от периодов увлажнения на территории Республики Беларусь / Р. Ю. Доломанюк // Современные научные исследования и разработки : электронное науч.-практ. периодич. издание. – М., 2019. – № 1 (30). – С. 359–364.

4 **Доломанюк, Р. Ю.** Влияние коэффициента влажности на глубину карбонизации железобетонных элементов мостовых сооружений / Р. Ю. Доломанюк // Современные проблемы науки и образования: вопросы теории и практики : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. НИЦ ПНК от 30 апреля 2019 г. / [редкол.: Р. Р. Галлямов и др.]. – Самара : ООО НИЦ «Поволжская научная корпорация», 2019. – 232 с.

5 **Доломанюк, Р. Ю.** Функция влияния морозного разрушения на карбонизацию / Р. Ю. Доломанюк // World Science: problems and innovations : сб. ст. XXVIII Междунар. науч.-практич. конф.. В 2 ч. Ч. 1. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С 46–49.

6 **Доломанюк, Р. Ю.** Оценка расчета коэффициента диффузии углекислого газа в железобетонных элементах мостовых конструкций / Р. Ю. Доломанюк // Интеграция наук. – М. – 2018. – № 7 (22).: Сайт: <http://in-sc.ru/arkhiv>. – С. 146–150

7 **Доломанюк, Р. Ю.** Оценка параметров коэффициента диффузии углекислого газа в железобетонных элементах моста в зависимости от среды эксплуатации / Р. Ю. Доломанюк // Актуальные вопросы физики и техники : материалы VIII Республ. науч. конф. студентов и аспирантов : в 2 ч. Ч. 1. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2019.

УДК 624.01/.04:620.193

ЗАВИСИМОСТИ КРИТИЧЕСКИХ КОРРОЗИЙНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ОТ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА, КЛАССА ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ

Р. Ю. ДОЛОМАНИЮК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Железобетон во всем мире признан одним из самых экономичных, экологически чистых, надежных и долговечных строительных материалов. В данное время объем производства бетона и железобетона в мировом строительстве по разным источникам до трех миллиардов кубических в год. Поэтому основную долю строительных мостовых конструкций, эксплуатируемых в настоящее время, составляют железобетонные элементы. Повреждение железобетонных конструкций изучались и изучаются многими ав-