

УДК 624.21.093.004

Э. С. Карапетов, Д. А. Шестовицкий

ПРОГНОЗ СРОКА СЛУЖБЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КАРБОНИЗАЦИИ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ

Дата поступления: 28.12.2015

Решение о публикации: 28.02.2016

Цель: Разработать прогноз срока службы мостов на основе моделирования процесса карбонизации защитного слоя железобетонных элементов мостов. **Методы:** В основе модели лежит аналитическое решение дифференциального уравнения теории диффузии первого закона А. Фика. **Результаты:** Приведен пример расчета сроков депассивации защитного слоя железобетонных элементов мостов с учетом вариативности исходных данных. Сопоставлены теоретическая модель деградации и фактической глубины карбонизации защитного слоя. Предложена модель прогнозирования срока службы железобетонных мостов, основанная на оценке времени карбонизации защитного слоя с учетом различных факторов: температуры, влажности окружающей среды, концентрации углекислого газа в атмосфере, прочностных характеристик бетона. **Практическая значимость:** Разработанная модель пригодна для прогноза долговечности на стадии проектирования.

Железобетон, долговечность, карбонизация, I закон диффузии А. Фика, концентрация углекислого газа в атмосфере.

Eduard S. Karapetov, Cand. Sci. (Eng.), professor; ***Dmitriy A. Shestovitskiy**, assistant lecturer, kmost@pgups.edu (Petersburg State Transport University) FORECAST OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES' SERVICE LIFE ON THE BASIS OF PROTECTIVE COVER CARBONIZATION PROCESS MODEL

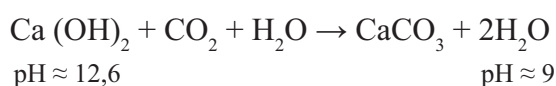
Objective: To develop a forecast for bridges' service life on the basis of modelling of a process of carbonization of protective cover of bridges' reinforced concrete elements. **Methods:** The model is based on analytical solution of differential equation of Fick's first diffusion law. **Results:** An example of calculation for depassivation terms of protective cover of bridges' reinforced concrete elements is provided, taking into account variability of basic data. A theoretical model of degradation and actual depth of carbonization of protective cover are compared. A model for forecasting service life of reinforced concrete bridges is proposed, based on evaluation of time required for carbonization of protective cover taking into account various factors – temperature, environmental humidity, concentration of carbon dioxide in the atmosphere, strength characteristics of the concrete. **Practical importance:** The model is applicable for forecasting lifespan at design stage.

Reinforced concrete, lifespan, carbonization, Fick's first diffusion law, concentration of carbon dioxide in the atmosphere.

На автомобильных дорогах России в настоящее время эксплуатируется большое количество мостовых сооружений разных лет постройки и разного конструктивного исполнения. Большая часть действующих мостовых сооружений малых и средних пролетов сооружена с использованием железобетонных пролетных строений и опор. Практика эксплуатации показала, что со временем в них возникают и развиваются дефекты и повреждения, снижающие долговечность конструкций. Существовавшее ранее мнение о высокой долговечности железобетонных конструкций оказалось ошибочным. Средний срок службы находится в пределах 35–45 лет, что не согласуется с проектным сроком службы 100 лет.

Наиболее опасным и весьма распространенным процессом, ведущим к депассивации защитного слоя железобетонных элементов мостов с последующей стремительной коррозией арматуры, снижающим надежность и долговечность транспортных сооружений, является карбонизация бетона защитного слоя.

Карбонизация бетона – процесс проникновения углекислого газа в поры бетона с дальнейшим взаимодействием с цементным камнем в присутствии влаги, что приводит к снижению щелочности бетона и утрате защитных свойств по отношению к арматуре:



В этих условиях особо важно создать адекватные модели прогноза сроков карбонизации с учетом различных факторов, влияющих на протекание этого процесса.

Цель исследования

Эта работа посвящена созданию модели срока карбонизации бетона защитного слоя с учетом различных влияющих факторов, а также проверке ее адекватности.

Модели прогноза срока карбонизации защитного слоя железобетонных элементов

В основе описания процесса карбонизации лежит дифференциальное уравнение первого закона аналитической теории диффузии, закона А. Фика. Решение этого уравнения с заданными начальными условиями позволяет получить выражение для определения времени карбонизации защитного слоя бетона. Авторы выполнили сравнительный анализ существующих моделей карбонизации [1–4, 6, 9]. Исходные параметры были одинаковыми для всех моделей (табл. 1, рис. 1).

Необходимо заметить, что модели карбонизации, приведенные выше, рассматривают концентрацию углекислого газа в атмосфере, а также температуру и влажность окружающей среды как константы, неизменные во времени.

Рекомендуемая модель карбонизации бетона защитного слоя

Если мы рассмотрим карбонизацию как устойчивый постоянный процесс, описанный первым законом А. Фика, где концентрация CO_2 , температура и влажность окружающей среды являются функциями времени, то модифицированная модель глубины прохождения фронта карбонизации для сооружения, введенного в эксплуатацию в 2015 г., может быть записана следующим образом [10]:

$$x_{carb}(t) = \sqrt{\frac{2D(t)}{a} \int_{2015}^t f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot k_{site} \cdot C_{\text{CO}_2}(t) dt} \times \left(\frac{t_0}{t - 2014} \right)^{n_m}$$

при $t \geq 2015$,

где t – время эксплуатации в годах, начиная с 2015 г.; t_0 – 1 год; n_m – возрастной фактор

ТАБЛИЦА 1. Сравнение моделей карбонизации

Модель	Глубина карбонизации, см (время эксплуатации 50 лет), коэффициент диффузии $D_{eff} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$	Источник	Обозначение кривой на рис. 1
$x_c = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a \cdot f_{cm}^b \cdot \sqrt{t}$	0,92	[9]	■ ■ ■
$\bar{X} = (150Kd / f_c) \sqrt{t}$	2,12	[6]	▲ ▲ ▲
$x = \sqrt{521t} \exp(-0,05 f_{c,28})$	2,81	[4]	● ● ●
$x = \left(\frac{1}{2,1 \sqrt{f_{c,28}}} - 0,06 \sqrt{365t} \right)$	0,80	[4]	□ □ □
$X_c = \sqrt{\frac{2K_1 \cdot K_2 \cdot D_{eff} \cdot C_s}{a}} \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_o}{t} \right)^n$	2,44	[9]	▲ ▲ ▲
$T_{к6} = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot \frac{a}{K}$	2,14	[3]	⊖ ⊖ ⊖
$X = \sqrt{\frac{2D_{эф} \cdot C \cdot t}{m_0}}$	1,50	[1, 2]	× × ×

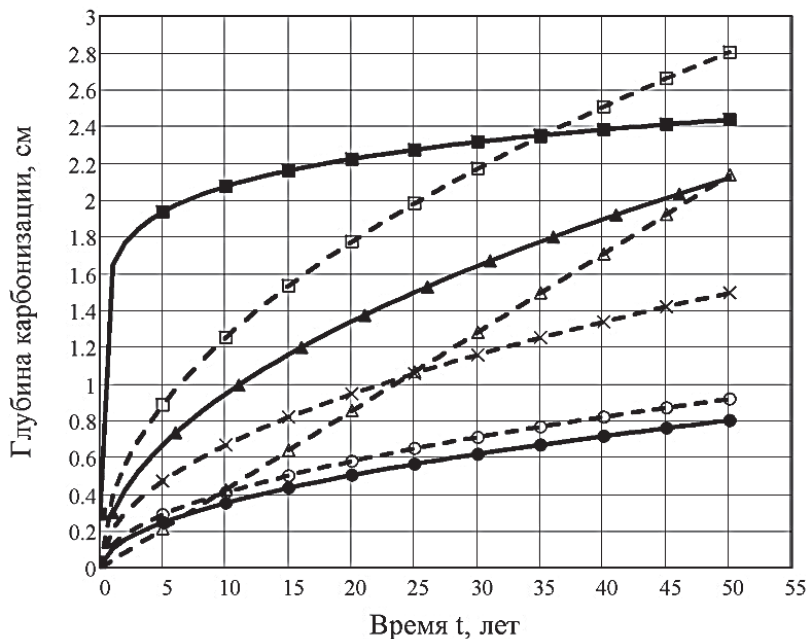


Рис. 1. График кривых карбонизации. Обозначения см. в табл. 1

для микроклиматических условий, связанных с частотой циклов увлажнения/просушки и принимаемый в зависимости от степени за-

щиты поверхности; k_{site} – коэффициент, учитывающий повышенное содержание углекислого газа в мегаполисах и больших городах;

$C_{\text{CO}_2}(t)$ – функция изменения концентрации CO_2 во времени, 10^{-3} кг/м³, ($1 \text{ ppm} = 0,0019 \times 10^{-3}$ кг/м³); $D(t)$ – коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне как функция времени, см²/с, определяемый по формуле

$$D(t) = D_1(t - 2014)^{-n_d},$$

где D_1 – начальный коэффициент диффузии, см²/с; n_d – коэффициент, принимаемый в зависимости от водоцементного отношения бетона;

a – количество CO_2 , необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации, кг/м³, определяемое по зависимости

$$a = 0,75 \cdot \text{CaO} \cdot C_e \cdot a_H \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}},$$

где CaO – содержание оксида кальция в цементе (~64–65 %); C_e – количество цемента, кг/м³; M_{CO_2} – молярная масса углекислого газа (44 г/моль); M_{CaO} – молярная масса оксида кальция (56 г/моль); a_H – степень гидратации цемента.

Начальный коэффициент диффузии

Начальный коэффициент диффузии D_1 в зависимости от цилиндрической прочности бетона приводится в документе [7]:

$$D_1 = 10^{-7} \cdot 10^{-0,025 \cdot f_{ck}},$$

где f_{ck} – прочность на сжатие (цилиндрическая) бетона, МПа, по истечении 28 суток.

В исследовании мы использовали данные, приведенные в [5], где по результатам экспериментальных исследований определены коэффициенты диффузии углекислого газа в бетоне в зависимости от класса бетона (рис. 2).

Влияние температуры и влажности на скорость карбонизации

Более высокая температура окружающей среды приводит к увеличению коэффициента диффузии, что ускоряет карбонизацию. Влияние температуры на коэффициент диффузии моделируется с помощью закона Аррениуса и

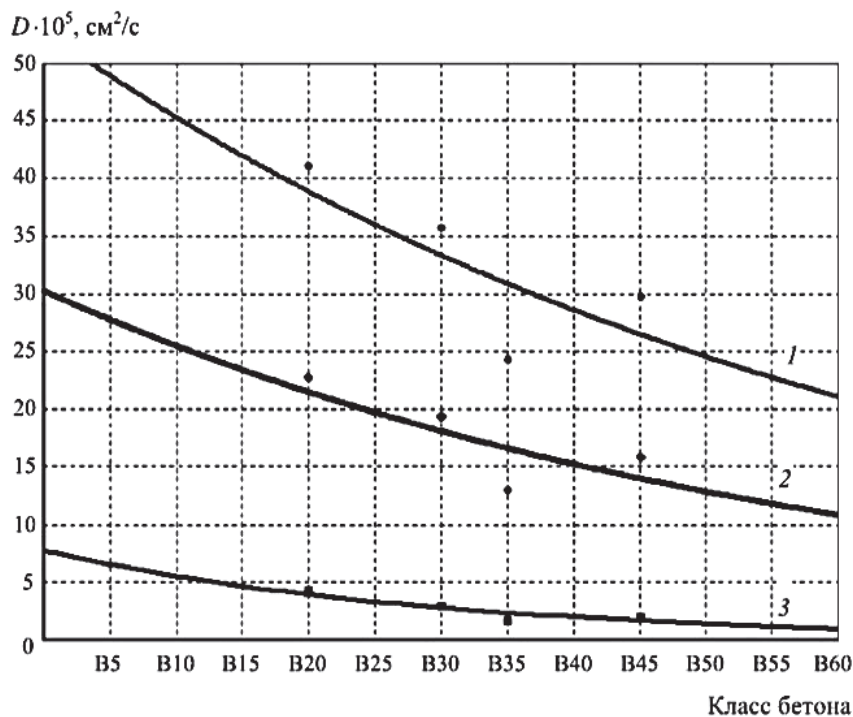


Рис. 2. Зависимости коэффициента диффузии от класса бетона по [5]

вместе с изменением температуры во времени определяется зависимостью

$$f_T(t) = e^{(E/R)((1/293,15)-(1/(273,15+T(t))))},$$

где $T(t)$ – температура, °С, как функция времени; E – энергия активации диффузионного процесса (40 кДж/моль); R – постоянная Больцмана ($8,314 \cdot 10^{-3}$ кДж/моль·К). Повышение температуры на 2 °С увеличивает коэффициент диффузии на 12%.

В документе [8] предлагается следующая зависимость для учета влияния влажности на коэффициент диффузии:

$$f_W(t) = \left(\frac{1 - \left(\frac{W(t)}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{W_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e},$$

где $W(t)$ – влажность, %, как функция времени; W_{ref} – базовая влажность, составляет 65%; f_e – константа, равная 5,0; g_e – константа, равная 2,5.

Моделирование изменения температуры и влажности во времени

Чтобы учитывать сезонные колебания температуры и влажности, предположим, что их функция в зависимости от времени подчиняется синусоидальному закону (рис. 3):

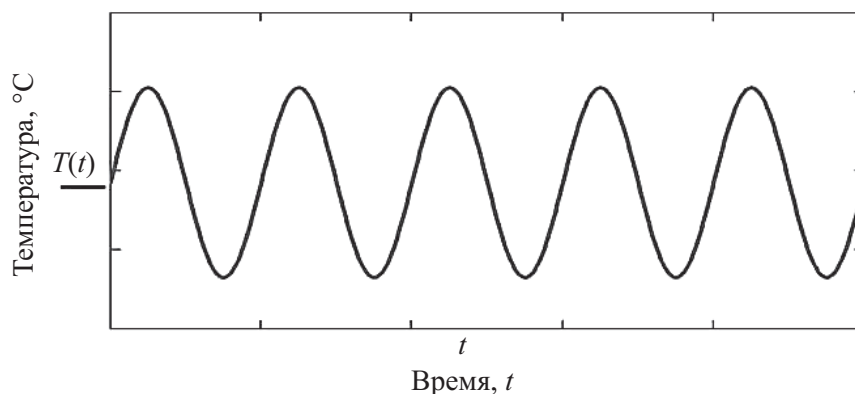


Рис. 3. Изменение температуры по синусоидальному закону

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

где Φ_{max} , Φ_{min} – максимальное и минимальное среднее значение параметра (температуры, влажности), соответственно; t – время, годы.

Модель концентрации углекислого газа в атмосфере

Стремительное нелинейное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере, связанное с развитием жизнедеятельности человека (рис. 4), изменение климата ускоряют процесс карбонизации, а следовательно, износ железобетонных элементов мостов, снижают безопасность, работоспособность и долговечность транспортных сооружений. В связи с этим необходимо создать модель карбонизации бетона защитного слоя, в которой можно будет учитывать изменения концентрации углекислого газа и климатических условий во времени. Это особо важная задача.

Будущее изменение концентрации углекислого газа в атмосфере прогнозируется согласно нескольким сценариям в зависимости от изменений в экономике, энергетике, технологиях, сельском хозяйстве и т. д. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC) в докладах указывает на стремительное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере с 280 ppm в 1750 г. до 380 ppm в 2005 г. с дальнейшим ростом трен-

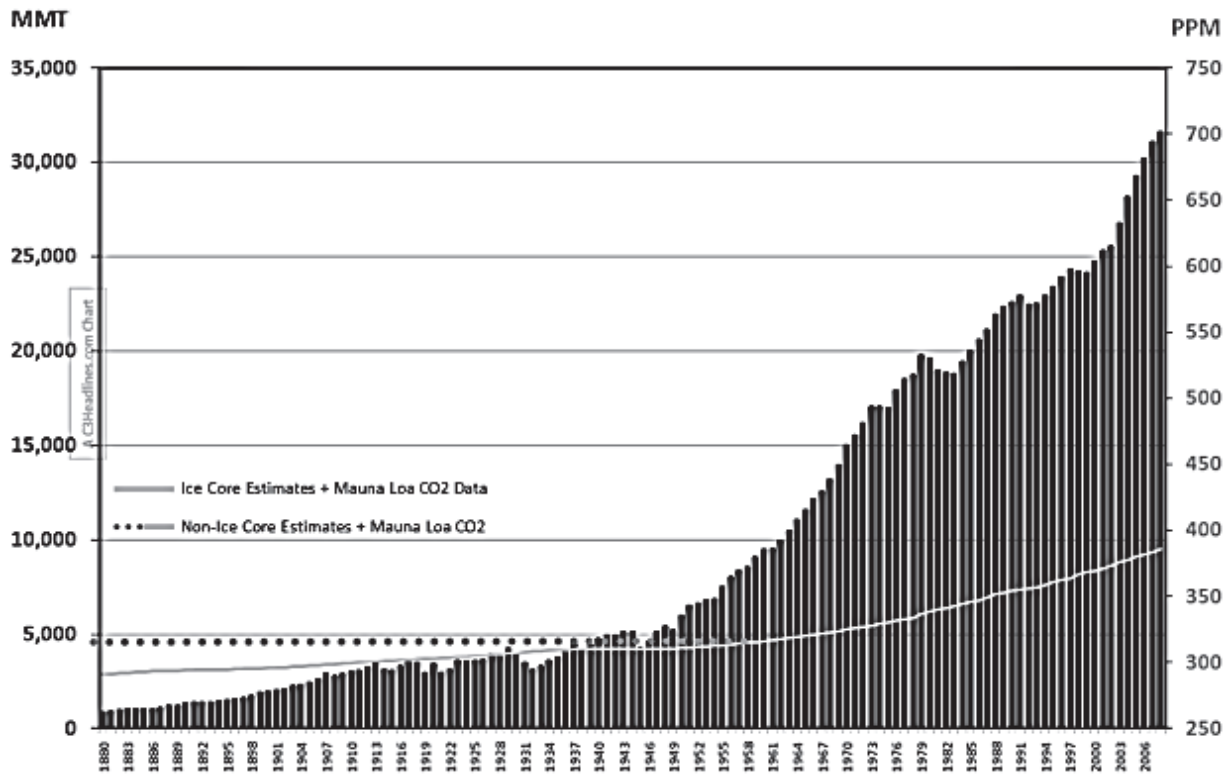


Рис. 4. График изменения концентрации CO₂ в атмосфере с 1880 по 2006 г.

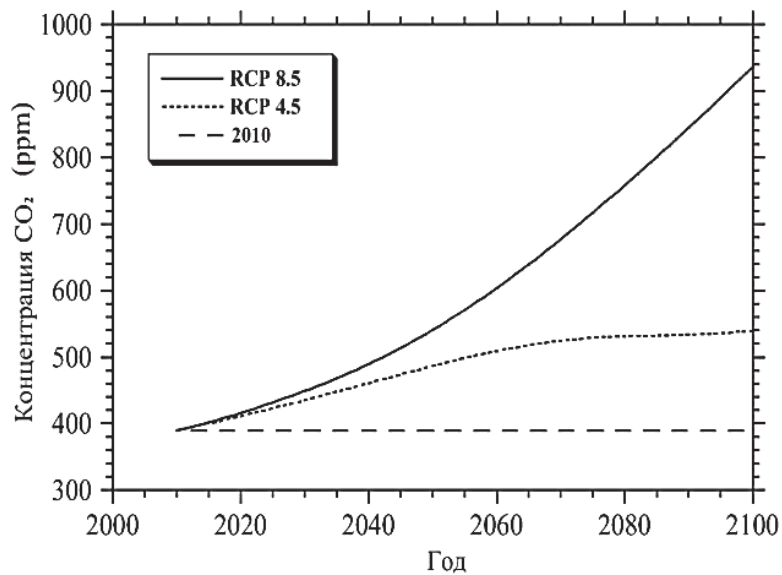


Рис. 5. Сценарии увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере

да. По результатам своих исследований они предложили три наиболее возможных сце-

нария развития (representative concentration pathways, RCP). Пессимистичный сценарий

развития (*RCP 8.5*) предполагает стремительное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере до 1000 ppm в конце века из-за интенсивного развития глобальной экономики и роста популяции людей. Согласно другому сценарию (*RCP 4.5*), увеличение концентрации будет умеренным с замедлением тренда к концу столетия. Третий сценарий оптимистичен, он предполагает, что концен-

трация углекислого газа останется неизменной на уровне 389 ppm 2010 г. (рис. 5).

В модели карбонизации величина $C_{CO_2}(t)$ принимается согласно этим сценариям изменения концентрации углекислого газа во времени.

Для оценки уровня влияния исходных параметров модели проведены количественные расчеты, результаты приведены на рис. 6–9.

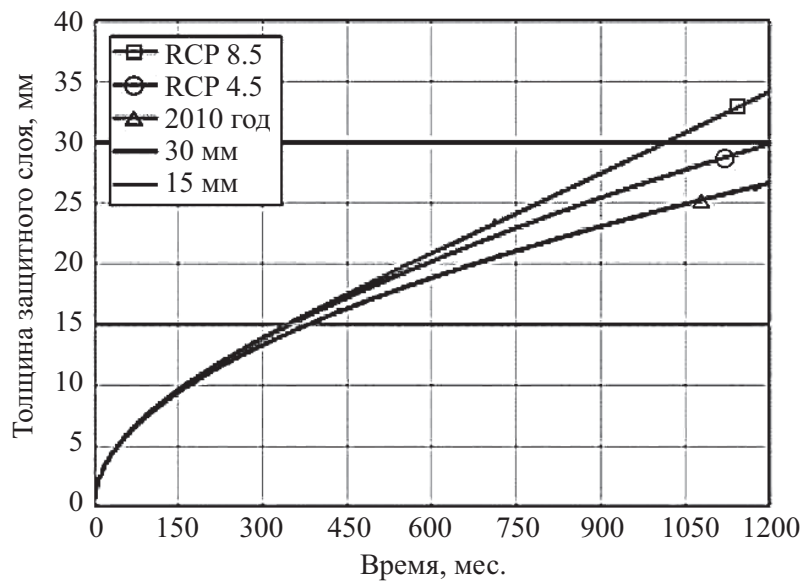


Рис. 6. Кривые карбонизации бетона защитного слоя для разных сценариев изменения концентрации CO_2 в атмосфере, месяцев

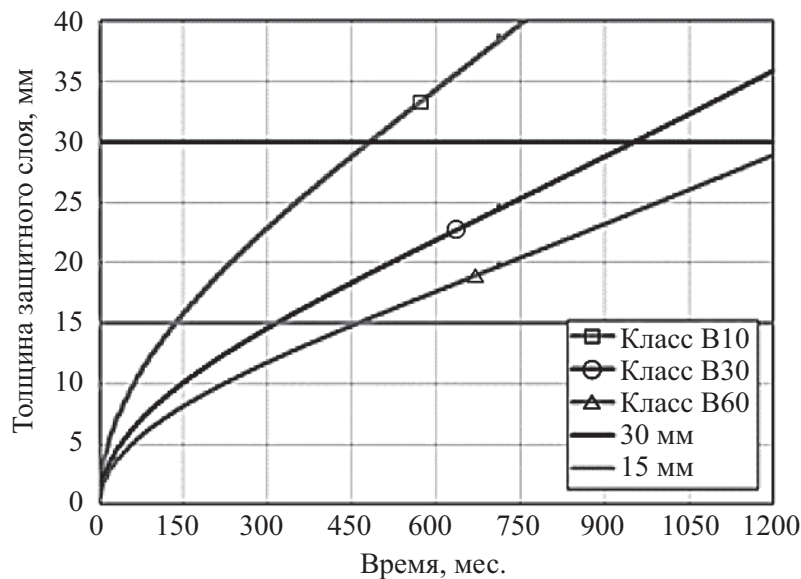


Рис. 7. Кривые карбонизации защитного слоя с разным классом бетона, месяцев

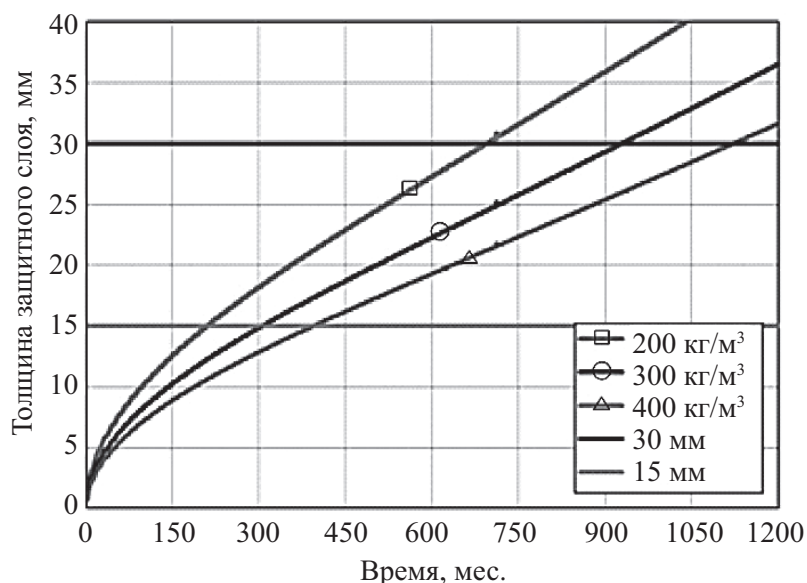


Рис. 8. Кривые карбонизации защитного слоя с разным содержанием цемента в бетоне, месяцев

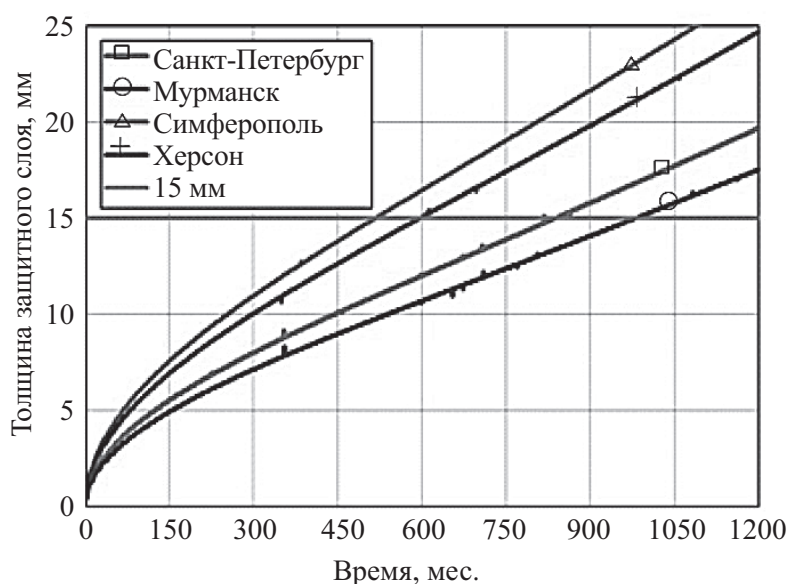


Рис. 9. Кривые карбонизации защитного слоя с разными климатическими условиями, месяцев

Апробация теоретической модели карбонизации бетона

Для практической оценки результатов теоретических исследований карбонизации бетона мостовых конструкций, приведенных выше, в августе 2015 г. в рамках обследования железобетонного путепровода, введенного в эксплуатацию в 1964 г., расположенного на ав-

томобильной дороге крупного горнодобывающего и перерабатывающего производственного объединения на севере страны, выполнены соответствующие инструментальные измерения. Результаты замера глубины карбонизации балки Б7 (пролет 7–8) (рис. 10) и балки Б5 (пролет 1–2) составили 10–16 мм.

Исходные данные и результаты расчета по модели приведены в табл. 2 и на рис. 11.

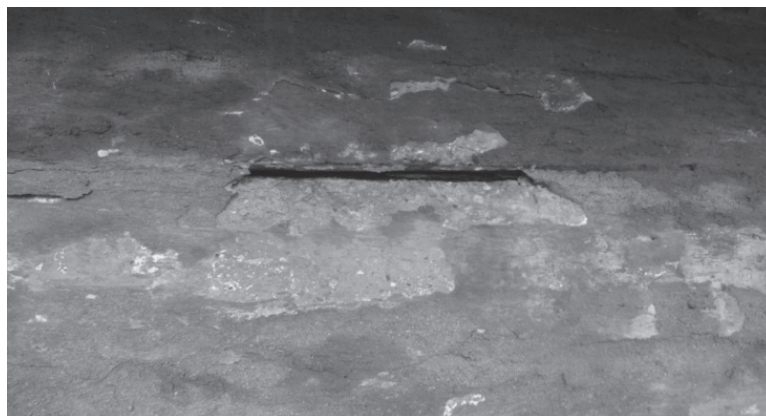


Рис. 10. Определение степени карбонизации бетона ребра балки Б7 пролета 7–8

ТАБЛИЦА 2. Параметры модели

Исходные параметры расчета	Балка Б7 (пролет 7–8)	Балка Б5 (пролет 1–2)
Температура региона (средняя минимальная/ максимальная), °С	–12,6/13,8	
Влажность региона (средняя минимальная/ максимальная), %	72/85	
Прочность бетона с обеспеченностью 0,95 (метод упругого отскока), МПа	28	35
Концентрация углекислого газа в атмосфере, ppm	390	390

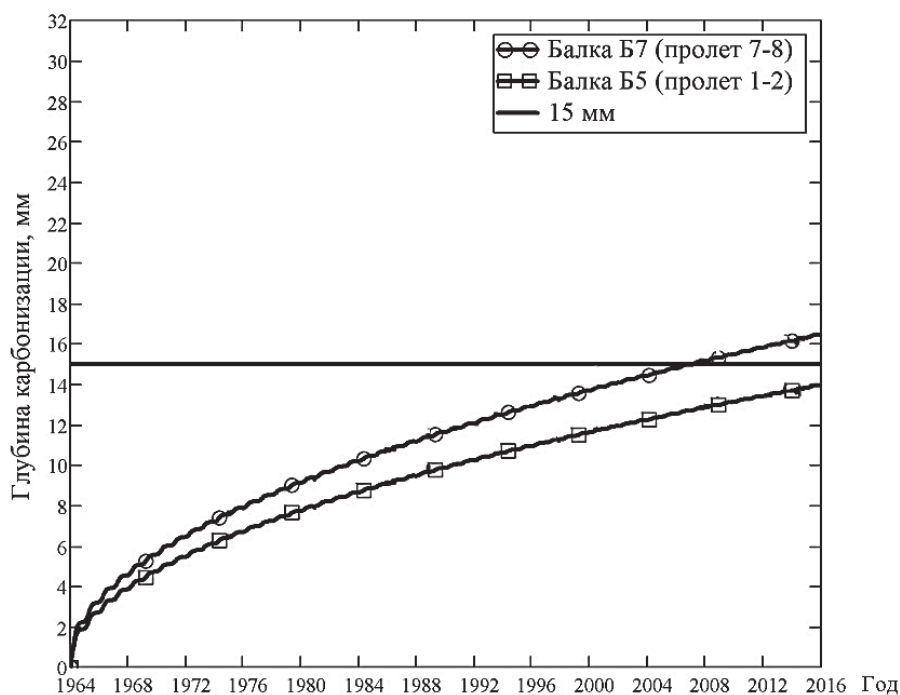


Рис. 11. Кривые карбонизации бетона защитного слоя балки Б5 и Б7

По результатам расчета глубина карбонизации составила: для балки Б7 (пролет 7–8) 16,4 мм; для балки Б5 (пролет 1–2) 13,8 мм, что подтверждает адекватность предложенной модели.

Выводы

По результатам анализа можно сделать вывод, что карбонизация бетона опасна для железобетонных элементов с толщиной защитного слоя 1–2 см, которая зачастую наблюдается у конструкций, изготовленных с нарушением технического регламента и требований строительных норм, а также у типовых проектов 1950–1960-х годов, струнотонных балок. Среди основных факторов, влияющих на скорость карбонизации, необходимо выделить свойства бетона (класс бетона по прочности, водоцементное отношение, содержание цемента), температуру и влажность окружающей среды, а также содержание углекислого газа в атмосфере. С понижением водоцементного отношения, температуры окружающей среды и с повышением класса бетона, содержания цемента, влажности атмосферы скорость карбонизации падает.

Предложенная модель карбонизации бетона учитывает изменение во времени температуры и влажности окружающей среды, концентрации углекислого газа, что делает ее более точной. Сравнение модели с натурным измерением карбонизации бетона защитного слоя показало ее достоверность и адекватность, что позволяет рекомендовать ее для практического применения.

Библиографический список

1. Алексеев С. Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шильс. – М. : Стройиздат, 1990. – 320 с.
2. ГОСТ Р 52804-2007. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. – М. : Стандартинформ, 2008.
3. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автомобильных мостов (утв. 18.04.2001 г. распоряжением № 79-р Министерства транспорта РФ).
4. Пухонто Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений: (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) : моногр. / Л. М. Пухонто. – М. : АСВ, 2004. – 424 с.
5. Шмелев Г. Д. Диффузия углекислого газа в бетон строительных конструкций и оценка коэффициента диффузии интервальным методом / Г. Д. Шмелев, С. А. Варюшкин // *Вопр. современной науки и практики.* – 2013. – № 3 (47). – С. 315–320.
6. Bob C. Probabilistic assesment of reinforcement corrosion in existing structures / C. Bob // *Proc. Int. Conf. held at the Univ. – Dundee, Scotland, UK, 1996.* – P. 17–28.
7. DuraInt Report. – Task 4. Deterioration Models with Interaction.
8. Fib. Model code for service life design. – Lausanne: Fib Bul., 2006. – N 34.
9. Modelling of Degradation. DuraCrete. – Probabilistic Performance based Durability design of Concrete Structures. Doc. BE-1347/R4-5, Dec. 1998.
10. Peng L. Climate change and corrosion damage risks for reinforced concrete infrastructure in China / L. Peng, M. G. Stewart // *Centre for Infrastructure Performance and Reliability, The Univ. Newcastle, New South Wales 2308, Australia.* Received 27 Feb. 2013 ; fin. version received 8 July 2013 ; accepted 2 Oct. 2013.

References

1. Alekseyev S. N., Ivanov F. M., Modry S. & Shisl P. *Dolgovechnost zhelezobetona v agressivnykh sredakh [Longevity of Reinforced Concrete in Corrosive Environments]*. Moscow, Stroyizdat, 1990. 320 p.
2. GOST R 52804-2007. Protection of Concrete and Reinforced Concrete Elements from Corrosion. Moscow, Standartinform, 2008.
3. A Method for Calculation Forecast of Service Lifetime of Motor Bridge Superstructures (approved by order of the Transport Ministry of the Russian Federation No. 79-r on April 18, 2001).

4. Pukhonto L.M. *Dolgovechnost zhelezobetonnykh konstruktivnykh sooruzheniy (silosov, bunkerov, rezervuarov, vodonapornykh bashen, podpornykh sten)*, monografiya [Longevity of Reinforced-Concrete Elements of Engineering Structures (silo towers, bunkers, storage tanks, water towers, supporting walls)], monogr. Moscow, ASV, 2004. 424 p.
5. Shmelev G.D. & Varyushkin S.A. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki – Questions of Modern Science and Practice*, 2013, no. 3 (47), pp. 315-320.
6. Bob C. Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures. *Proc. Int. Conf. held at the Univ. Dundee, Scotland, UK, 1996*. Pp. 17-28.
7. DuraInt Report. Task 4. Deterioration Models with Interaction.
8. Fib. Model code for service life design. Lausanne, Fib Bul., 2006, no. 34.
9. Modelling of Degradation. DuraCrete. Probabilistic Performance based Durability design of Concrete Structures. Doc. BE-1347/R4-5, Dec. 1998.
10. Peng L. & Stewart M.G. Climate change and corrosion damage risks for reinforced concrete infrastructure in China // Centre for Infrastructure Performance and Reliability, The Univ. Newcastle, New South Wales 2308, Australia. Received 27 Feb. 2013; final version received 8 July 2013; accepted 2 Oct. 2013.

КАРАПЕТОВ Эдуард Степанович – канд. тех. наук, профессор; *ШЕСТОВИЦКИЙ Дмитрий Александрович – ассистент, kmost@pgups.edu (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).