

Э. С. КАРАПЕТОВ, Д. А. ШЕСТОВИЦКИЙ (Петербургский государственный университет путей сообщения, Россия)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ХЛОРИДОВ В БЕТОНЕ

Статья посвящена проблеме низкого срока службы железобетонных мостов. Особое внимание отведено отсутствию в нормативных документах значения коэффициента диффузии хлоридов в бетоне, как определяющего параметра при оценке долговечности железобетонных элементов мостов по физическим моделям деградации. Приведено описание эксперимента по определению коэффициента диффузии хлоридов в бетоне и установлена зависимость с прочностью, водопоглощением и ультразвуком в теле бетона.

Ключевые слова: долговечность, II закон А. Фика, коэффициент диффузии хлоридов в бетоне, прочность, ультразвук, водопоглощение

Проблема

Мостовые сооружения (МС), являясь ответственными элементами на сети автомобильных дорог страны, в процессе эксплуатации должны эффективно и качественно удовлетворять условиям бесперебойного и безопасного движения автотранспортных средств с расчетными скоростями и нагрузками в течение заданного срока эксплуатации. Существует яркое и весьма точное определение важности МС: «Мосты даже важнее, чем дома, они более надежны. Они принадлежат всем и всем в равной мере приносят пользу, они возводятся именно в тех местах, где сходится множество человеческих потребностей, они долговечнее других строений и всегда верно служат». При этом исправное техническое состояние МС обеспечивается выполнением эксплуатационными организациями необходимого комплекса работ по поддержанию потребительских свойств – пропускной способности, грузоподъемности, безопасности и комфортности движения, долговечности и внешнего вида сооружений, которые были заложены при их проектировании и строительстве.

На протяжении многих лет проблеме низкой долговечности железобетонных мостовых сооружений не было уделено должного внимания. Срок службы железобетонных конструкций мостов стал назначаться директивно только в 2006 году с принятием национального нормативного документа проектирования мостов Украины и составил 100 лет [1]. Ныне установлено, что средний срок службы железобетонных пролетных строений мостов Украины составляет 45...50 лет. Так на дорогах государственного значения в четвертом эксплуатационном состоянии находится почти 21 % железобетонных пролетных строений автодо-

рожных мостов (рис. 1), их средний возраст составляет 45 лет.

Проблема долговечности железобетонных мостов актуальна и для развитых стран. Так, например, установленное Министерством финансов среднее время жизненного цикла железобетонных мостов Японии составляет 60 лет [2].

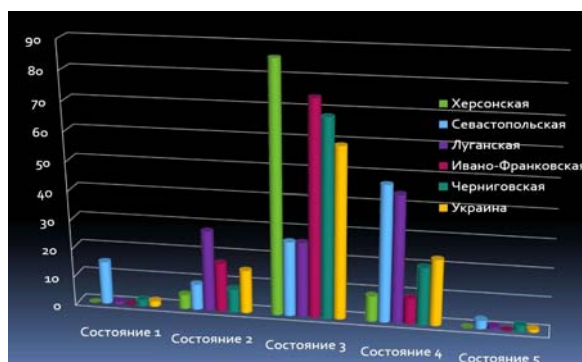


Рис. 1. Сравнительная характеристика железобетонных мостов пяти областей и Украины в целом по эксплуатационному состоянию

К наиболее опасным процессам, влияющим на долговечность железобетонных мостовых сооружений, относят карбонизацию защитного слоя бетона и проникновение хлоридов (рис. 2). Эта статья посвящена проникновению хлоридов в бетон и коэффициенту диффузии хлоридов в бетоне.

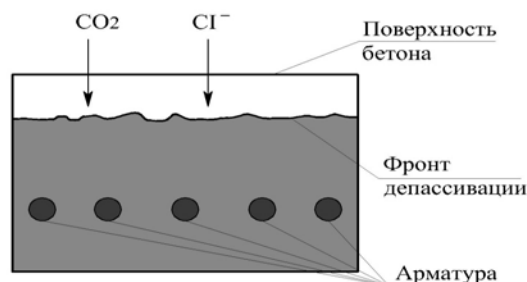


Рис. 2. Прохождение фронта депассивации в бетоне

На рис. 3 и 4 представлены пути проникновения хлоридов в бетон мостовых конструкций, а также механизм коррозии арматуры, как результат диффузии и насыщения ионами хлорида защитного слоя железобетонных элементов мостов.

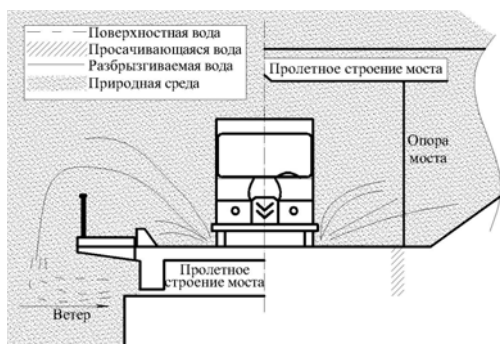


Рис. 3. Зоны моста с разным воздействием хлоридов

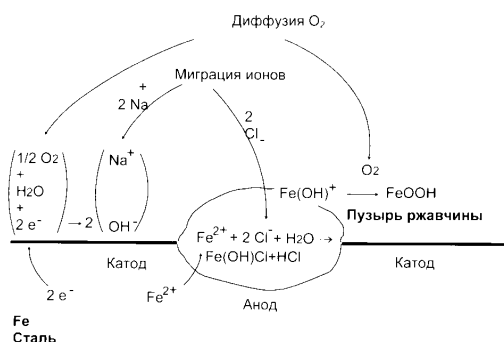


Рис. 4. Механизм коррозии арматурной стали в бетоне

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:

– II закон А. Фика:

$$\frac{dc}{dt} = D_{Cl} \frac{d^2c}{dx^2}; \quad (1)$$

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

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

где X_C – толщина защитного слоя бетона, м; D_{Cl} – коэффициент диффузии хлоридов в бетоне, m^2/c ; $\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.

Из уравнений 1–3 видно, что коэффициент диффузии хлоридов в бетоне D_{Cl} является определяющим параметром при оценке долговечности железобетонных элементов по физическим моделям деградации.

Этот коэффициент определяется, как скорость переноса диффундирующего вещества (хлорида) через единицу площади, деленную на пространственный градиент концентрации вещества (хлорида) и измеряется в cm^2/c . Значения этого коэффициента получают, как правило, экспериментальным путем.

В отечественных нормах проектирования мостов отсутствует классификация этого коэффициента относительно класса бетона, не определено его значение относительно водоцементного отношения. А ведь правильное назначение этого коэффициента существенно повлияет на точность прогноза.

Эта проблема довольно слабо изучена отечественными учеными. В первую очередь это связано с постоянными сложностями в проведении испытаний, экспериментальных исследований. В работах [4, 5, 6] встречается упоминание о значениях коэффициента диффузии хлоридов в бетоне. В [7] описываются лабораторные исследования, в том числе и по нахождению коэффициента диффузии хлоридов в бетоне. В зарубежных исследованиях эта проблема изучена несколько лучше. Так например в [8] приведены методы определения общего содержания и глубины проникновения хлоридов в бетоне. К ним относятся: фотометрический экспресс-анализ, аргентометрическое титрование, хроматный метод индикации, метод Коллепарди, метод ультрафиолетового исследования, рентгено-флуоресцентный анализ. В работах [9, 10] отображены лабораторные исследования по нахождению коэффициента диффузии хлоридов в бетоне различными методами.

Однако полученные значения коэффициента диффузии хлоридов в бетоне из различных источников существенно разнятся. Так, например, в [11] установлено, что для бетона классов В30–В40 значение D_b варьируется от 0,32 до 2,13 $cm^2/год$. Тот же источник рекомендует при

оценочных расчетах для обычного бетона принимать значение $D_b = 0,5 \text{ см}^2/\text{год}$ для условий в европейских странах. В свою очередь в стандарте ACI [12] (American Concrete Institute) предлагается следующая формула для определения D_b (в $\text{м}^2/\text{сек}$)

$$D_b = 10^{(-12,06+2,4w/c)} \quad (4)$$

а в [13] автор рекомендует другую зависимость:

$$\log_{10}(D_b) = 6 \cdot w/c - 13,84 \quad (5)$$

Неопределенность в принятии значения коэффициента диффузии хлоридов в бетоне, отсутствие в нормативных документах его значений относительно класса бетона и водоцементного отношения делают крайне затруднительным адекватное и корректное прогнозирование времени проникновения хлорида в бетон. Определение этого коэффициента диффузии экспериментальным путем, установление связи его с прочностью бетона, водоцементным отношением может стать важным решением на пути прогнозирования срока службы железобетонных мостов.

Цель исследования

Этой работой авторы стремятся привлечь внимание научных работников и инженеров к проблеме неопределенности в назначении коэффициента диффузии хлоридов в бетоне, как определяющего параметра при оценке долговечности железобетонных элементов мостов по физическим моделям деградации.

Задача исследования

Задачей исследования является проведение экспериментальных исследований по определению коэффициента диффузии хлоридов в бетоне, водопоглощения, прочности на сжатие и изгиб, прохождения ультразвука для бетонов с разным водоцементным отношением. А так же установить взаимосвязь между прочностью бетона, водоцементным отношением, водопоглощением, скоростью ультразвука и коэффициентом диффузии хлоридов.

Для этого был выбран метод, приведенный в [14] и основанный на аналогии между диффузионным потоком вещества и электрическим током в теле бетона, метод определения диффузионной проницаемости бетона для хлоридов. В испытаниях сравнивается электропроводность бетона и водной вытяжки из бетона.

Экспериментальные работы

1. Изготовление образцов.

Для испытаний было изготовлено двенадцать образцов из бетона размерами $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$, в том числе девять образцов с электродами (рис. 5) и три образца без электродов

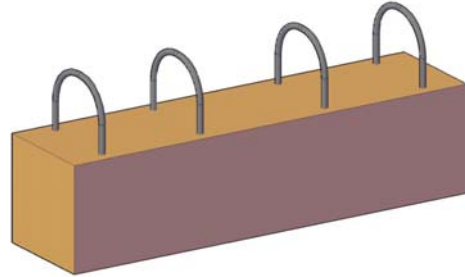


Рис. 5. Общий вид образца с электродами

Все образцы делились на три группы с разным водоцементным отношением: 0,4; 0,5; 0,6 соответственно.

2. Определение удельного электрического сопротивления бетона.

После набора прочности (28 суток) образцы в течение трех суток насыщали дистиллированной водой, затем они были извлечены и взвешены. После этого проводились измерения по схеме, показанной на рис. 6.

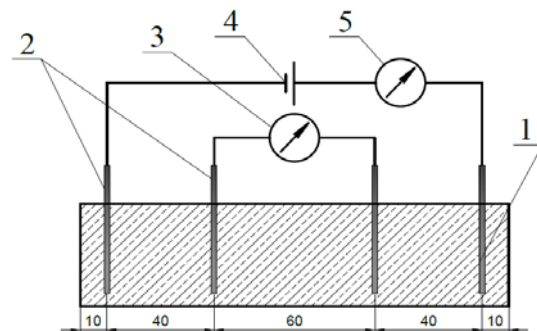


Рис. 6. Схема измерения электрического сопротивления образцов из бетона:

1 – образец из бетона; 2 – электроды; 3 – вольтметр; 4 – источник тока; 5 – микроамперметр

По результатам измерений было рассчитано удельное электрическое сопротивление бетона ρ_b , Ом·см, по формуле:

$$\rho_b = \frac{F(\Delta V - \Delta V_0)}{L \cdot I} \quad (5)$$

где F – площадь поперечного сечения бетонного образца, см^2 , ΔV – разность потенциалов между средними электродами после включения тока, В; ΔV_0 – разность потенциалов в отсутствие тока, В; I – ток в электрической цепи

установки, A ; L – расстояние между средними электродами в образце, см.

3. *Определение водопоглощения и скорости ультразвука, прочности на сжатие и изгиб.*

Образцы были высушены до постоянной массы и снова взвешены, определено водопоглощение бетона согласно [15]. Далее была определена скорость прохождения ультразвука сквозь тело бетона образцов с помощью ультразвукового тестера УК1401. После чего было проведено испытание прочности образцов на изгиб и на сжатие. Результаты проделанных экспериментов и расчетов приведены в виде графиков на рис. 7, 8, 9 и 10.

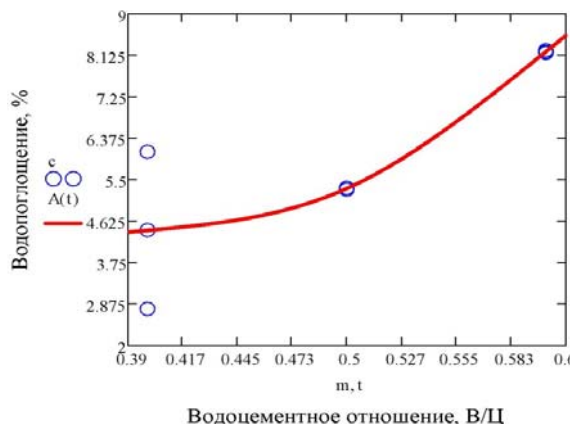


Рис. 7. График зависимости водопоглощения бетона от В/Ц

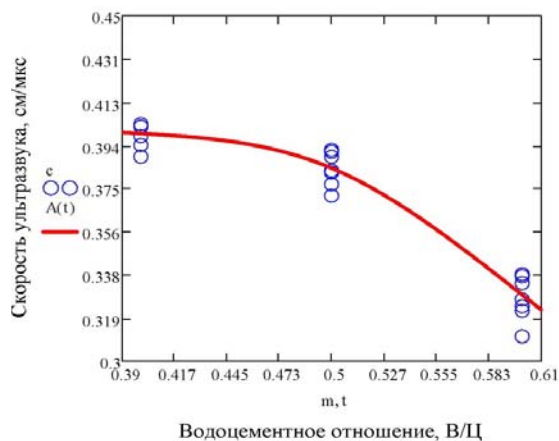


Рис. 8. График зависимости скорости ультразвука в теле бетона от В/Ц

4. *Определение удельного электрического сопротивления водной вытяжки из бетона.*

Образцы, не имеющие электродов, были раздроблены до полного прохождения через сито с размером ячеек 0,63 мм. Из дробленого материала каждого из образцов с разным водоцементным отношением было отобрано 4 пробы массой 100 г. Всего получилось 12 проб, которые засыпали в 12 стеклянных колб.

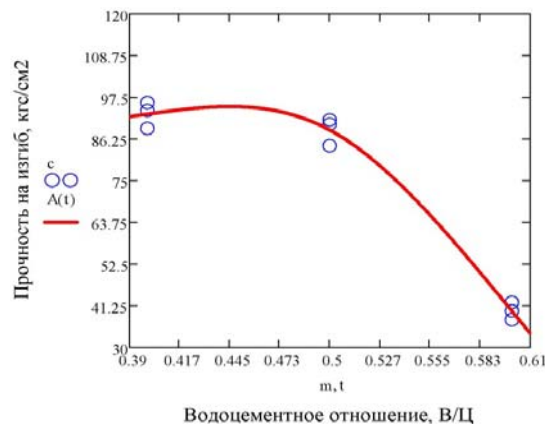


Рис. 9. График зависимости прочности бетона на изгиб от В/Ц

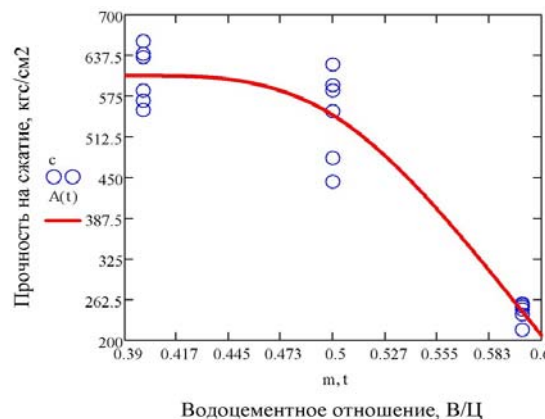


Рис. 10. График зависимости прочности бетона на сжатие от В/Ц

В колбы заливали дистиллированную воду в количестве 100, 250, 500 и 1000 см³ соответственно для каждой группы проб. После 72 часов, отстоявшуюся над осадком водную вытяжку, не взбалтывая, слили через воронку с фильтром в установку. Измерения проводились по схеме, показанной на рис. 11

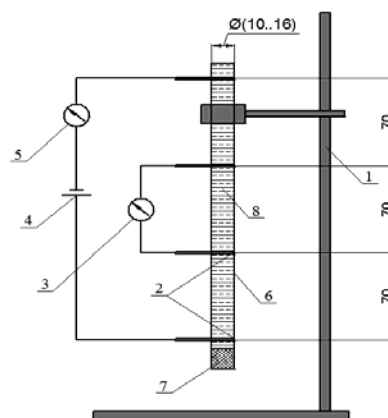


Рис. 11. Схема измерения электрического сопротивления водной вытяжки из бетона:
1 – штатив; 2 – электроды; 3 – вольтметр; 4 – источник тока; 5 – микроамперметр; 6 – трубка из неэлектропроводного материала; 7 – пробка; 8 – водная вытяжка

По результатам измерений было рассчитано удельное электрическое сопротивление водной вытяжки из бетона $\rho_{\text{ВВ}}$ Ом·см, по формуле:

$$\rho_{\text{ВВ}} = K \frac{\Delta V_{\text{ВВ}}}{I_{\text{ВВ}}}, \quad (6)$$

где K – постоянная прибора, которая была рассчитана по формуле

$$K = \frac{\pi D^2}{4l} \Pi, \quad (7)$$

где D – внутренний диаметр трубки в установке, см; l – расстояние между средними электродами в трубке установки, см; Π – поправка.

Поправка прибора была найдена заранее, для этого было определено удельное электрическое сопротивление 10 % раствора NaCl по формуле:

$$\rho_z = \frac{\pi D^2 (\Delta V_{\text{NaCl}} - \Delta V_{0\text{NaCl}})}{4l \cdot I}. \quad (8)$$

Делением удельного электрического сопротивления 1 н. раствора NaCl, полученного из справочника, ρ_c на экспериментально полученное значение ρ_z , было рассчитано значение поправки Π по формуле:

$$\Pi = \frac{\rho_c}{\rho_z}. \quad (9)$$

По полученным результатам электрического сопротивления водной вытяжки из бетона, с помощью сплайновой интерполяции в среде Mathcad были построены графики в координатах «соотношение вода – бетон» – «электрическое сопротивление» и экстраполированы до точки, где «соотношение вода – бетон» равно нулю. По этим точкам были определены значения удельного электрического сопротивления жидкой фазы в бетоне, $\rho_{\text{ВВ}}$, для трех типов бетона с разным водоцементным отношением (рис. 12, 13 и 14).

5. *Определение коэффициента диффузии хлоридов в бетоне.*

После этого была рассчитана эффективная сквозная пористость бетона $\Pi_{\text{эф}}$ для каждого типа бетона по формуле:

$$\Pi_{\text{эф}} = \frac{\rho_{\text{ВВ}}}{\rho_b}, \quad (10)$$

где $\rho_{\text{ВВ}}$ – удельное электрическое сопротивление водной вытяжки, Ом·см; ρ_b – удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·см.

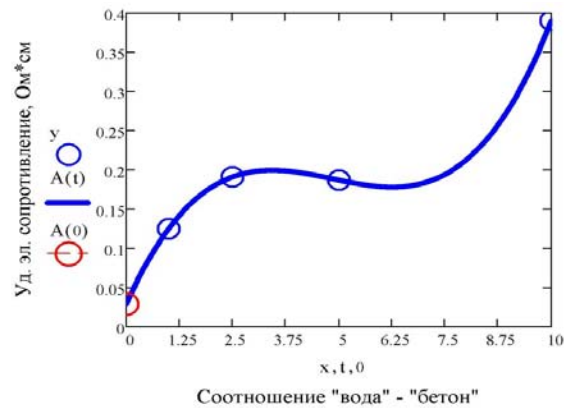


Рис. 12. Оценка электрического сопротивления водной вытяжки из бетона с В/Ц=0,4

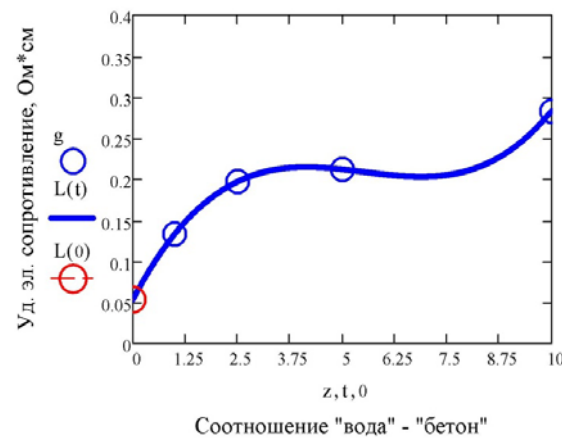


Рис. 13. Оценка электрического сопротивления водной вытяжки из бетона с В/Ц=0,5

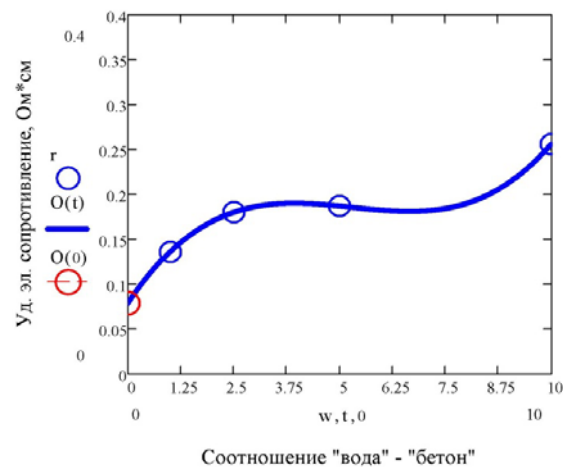


Рис. 14. Оценка электрического сопротивления водной вытяжки из бетона с В/Ц=0,6

В заключительной части эксперимента были получены коэффициенты диффузии хлоридов в бетоне для трех типов образцов с разным водоцементным отношением по формуле:

$$D_{\text{Cl}} = D_{\text{в}} \cdot \Pi_{\text{эф}}, \quad (11)$$

где $D_{\text{в}}$ – коэффициент диффузии хлоридов в воде; принимают равным $1,23 \cdot 10^{-5}$ см²/с.

Результаты проделанных экспериментов и расчетов приведены на рис. 15, 16, 17 и 18.

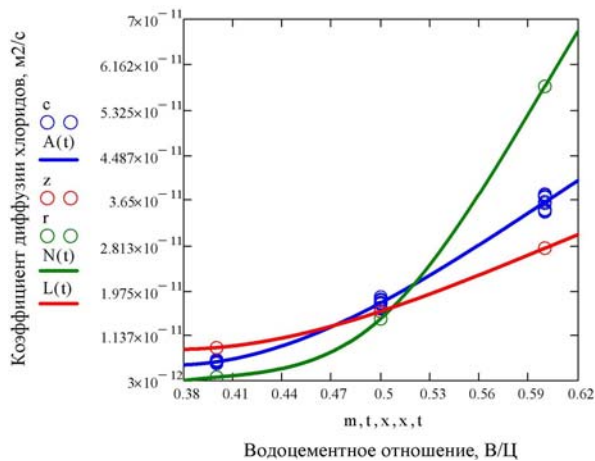


Рис. 15. Сравнение коэффициентов диффузии хлоридов в бетоне, найденных экспериментальным путем (■) и посчитанных по формуле (4) (●), (5) (●)

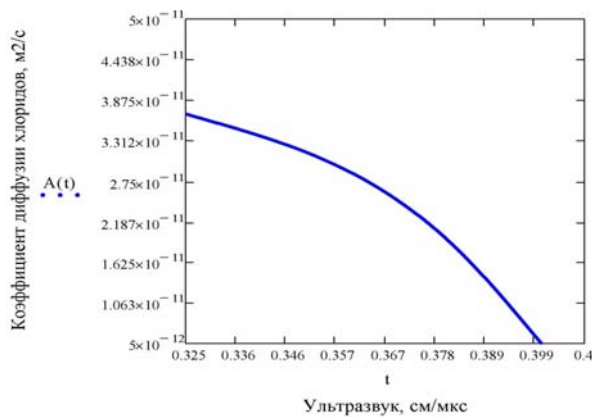


Рис. 16. Зависимость между ультразвуком и коэффициентом диффузии хлоридов в бетоне

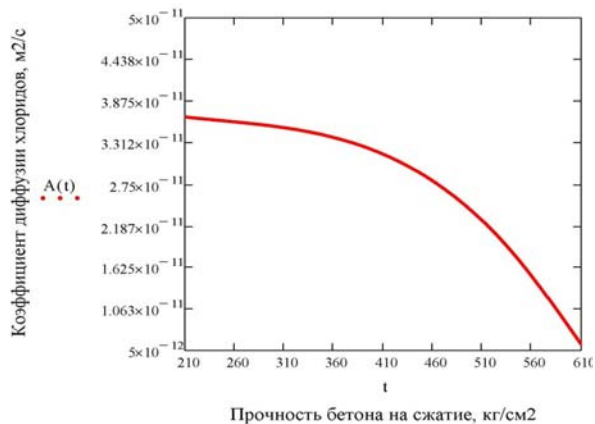


Рис. 17. Зависимость между прочностью на сжатие и коэффициентом диффузии хлоридов в бетоне

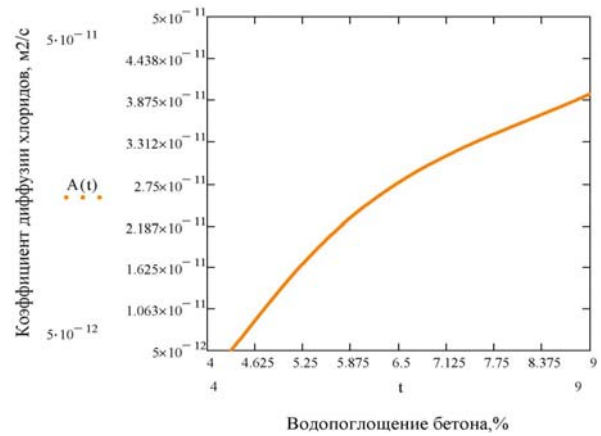


Рис. 18. Зависимость между водопоглощением и коэффициентом диффузии хлоридов в бетоне

Основные выводы и результаты

1. Полученные значения коэффициента диффузии хлоридов в бетоне свидетельствуют о нелинейном законе зависимости от водоцементного отношения, подтверждают значительное влияние изменения водоцементного отношения бетона на значение коэффициента.

2. Результаты экспериментальных работ доказывают, что с увеличением значения прочности бетона, скорости прохождения ультразвука в теле бетона, значение коэффициента диффузии в бетоне падает, а с увеличением значения водопоглощения – возрастает.

3. Сравнение значений коэффициента диффузии хлоридов в бетоне, полученных экспериментальным путем и по формуле (4), показывают высокую степень сходимости.

4. При водоцементном отношении более 0,5 наблюдается заметное расхождение в значениях коэффициента диффузии, полученных экспериментальным путем и по формулам (4) и (5).

5. Практическим достоинством этого исследования является возможность приблизительного определения коэффициента диффузии по графикам рис. 16, 17 и 18 по значениям ультразвуковой диагностики, прочности на сжатие и водопоглощения бетона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. [Текст]. – Введ. 2007-02-01. – К.: Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
2. Matsumoto, T. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance [Текст] / T. Matsumoto, S. S. Beng // Proceeding Japan-Taiwan international workshop

- on urban regeneration. Maintenance and green material. – 2005. – P. 23–36.
3. Пухонто, Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений: (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) [Текст]: монография / Л. М. Пухонто – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 424 с.
 4. Ферронская, А. В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона [Текст]: учебн. пособие / А. В. Ферронская. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 336 с.
 5. Алексеев, С. Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах [Текст] / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.
 6. Бліхарський, З. Я. Моделювання корозійних руйнувань залізобетонних балок в агресивному середовищі / З. Я. Бліхарський, М. Г. Сташук, О. М. Малик // Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж. – Донецьк: 2003.
 7. Розенталь, Н. К. Методы коррозионных испытаний бетона [Текст] / Н. К. Розенталь // Бетонные и сухие смеси. – 2008. – С. 11–14.
 8. Штарк, Иохен Вихт Бернд Долговечность бетона [Текст] / Иохен Вихт Бернд Штарк: пер. с нем. А. Тулаганова / под ред. П. Кривенко, техн. ред. Е. Кавалеровой. – К.: Оранта, 2004. – 301 с.
 9. Chisholm, D. H. Actual and Effective Diffusion Coefficients of Concrete Under Marine Exposure Conditions [Текст] / D. H. Chisholm, N. P. Lee // Presented to the 20th Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia, Perth 11-14 September 2001.
 10. Janos Gergely Joshua E. Tempest. Concrete Diffusion Coefficients and Existing Chloride Exposure in North Carolina [Текст] / Janos Gergely Joshua E. Bledsoe Brett Q. // North Carolina Department of Transportation Research Project No. HWY-2004-12, June 7, 2006.
 11. Concrete Bridge Protection [Текст]. Repair and Rehabilitation. Relative to Reinforcement Corrosion // A Methods Application Manual. – Washington. 1993.
 12. Service-Life Prediction [Текст] / State of the Art Report // Reported by ACI Committee 365 // ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. 2001.
 13. Dong, Chen Computational framework for durability assessment of reinforced concrete structures under coupled deterioration processes [Текст]. – August, 2006.
 14. ГОСТ Р 52804-2007 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии [Текст] – М.: Стандартинформ, 2008.
 15. ГОСТ 12730.3-78 Бетоны. Метод определения водопоглощения [Текст]. – 1980.
- Поступила в редколлегию 20.07.2012.
Принята к печати 08.08.2012.

Е. С. КАРАПЕТОВ, Д. О. ШЕСТОВИЦЬКИЙ (Петербурзький державний університет шляхів сполучення, Росія)

ДОСЛІДЖЕННЯ ІЗ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИФУЗІЇ ХЛОРИДІВ У БЕТОНІ

Стаття присвячена проблемі низького терміну служби залізобетонних мостів. Особливу увагу відведено відсутності в нормативних документах значення коефіцієнта дифузії хлоридів у бетоні, як визначального параметра при оцінці довговічності залізобетонних елементів мостів за фізичними моделям деградації. Наведено опис експерименту з визначення коефіцієнта дифузії хлоридів в бетоні і встановлена залежність з міцністю, водопоглинанням і ультразвуком в тілі бетону.

Ключові слова: довговічність, II закон А. Фіка, коефіцієнт дифузії хлоридів у бетоні, міцність, ультразвук, водопоглинання

Е. S. KARAPETOV, D. A. SHESTOVICKY (Petersburg State Transport University, Russia)

THE RESEARCH TO DETERMINE CHLORIDE DIFFUSION COEFFICIENT IN CONCRETE

The article deals with the problem of low service life of reinforced concrete bridge structures. Particular attention is given to the lack of values in the regulations of the diffusion coefficient of chloride in concrete, as a determining parameter in assessing the durability of reinforced concrete bridges on physical models of degradation. The description of the experiment to determine the diffusion coefficient of chloride in the concrete and the dependence of strength, water absorption and ultrasound in the concrete, is given.

Keywords: durability, II A. Fick's law, diffusion coefficient of chloride in concrete, strength, ultrasound, water absorption