

УДК 691.3:551.5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

САВИЦКИЙ Н. В.^{1*}, *д.т.н, проф.*,
ТЫТЮК А. А.^{2*}, *к.т.н, доц.*,
ТЫТЮК А. А.^{3*}, *к.т.н.*,
ПШИНЬКО П. А.^{4*}, *к.т.н.*

^{1*} Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

^{2*} Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-10-65, e-mail: anatol-61@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4927-370X

^{3*} Лаборатория исследования атомных и тепловых электростанций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: tytiuk89@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4119-4089

^{4*} Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: mostoproekt@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0003-4500-2450

Аннотация. Постановка проблемы. Известны многочисленные случаи разрушения бетона защитного слоя железобетонных конструкций вследствие атмосферных климатических воздействий, характеризующихся температурой, влажностью, концентрацией агрессивных газов и, в частности, углекислого газа. Имеющиеся количественные зависимости расчета карбонизации бетона вследствие воздействия углекислого газа не учитывают температуру и влажность окружающей среды, а также рассчитаны на стационарные условия. В реальных условиях температура и влажность среды изменяются в зависимости от времени года. При этом необходимо учитывать, что карбонизация бетона происходит только в период с положительной температурой и при определенной влажности. В то же время, в период с отрицательными температурами происходит попеременное замораживание и оттаивание бетона, что увеличивает его проницаемость. Это обуславливает необходимость разработки количественной методики проектирования первичной защиты защитного слоя бетона железобетонных конструкций, которая учитывает физико-химический процесс карбонизации бетона, осложненный морозной деструкцией. **Цель.** Разработка методики проектирования первичной защиты железобетонных конструкций в условиях климатических воздействий с учетом процесса карбонизации, сезонного и суточного изменения температуры и влажности среды (на примере г. Днепропетровска). **Методика.** Методы теории тепло – массопереноса и развития гетерогенных химических реакций при исследовании долговечности бетона. **Результат.** Разработан количественный метод проектирования первичной защиты железобетонных конструкций в условиях климатических воздействий. **Научная новизна.** Предложен метод проектирования первичной защиты бетона защитного слоя железобетонных конструкций в условиях климатических воздействий. **Практическая значимость.** На основании проведенных исследований разработана методика проектирования состава бетона и параметров защитного слоя железобетонных конструкций для обеспечения долговечности на заданный срок службы.

Ключевые слова: защитный слой бетона; карбонизация; морозная деструкция; первичная защита; долговечность; прогнозирование

ПРОЕКТУВАННЯ ПЕРВИННОГО ЗАХИСТУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ВПЛИВІВ

САВИЦЬКИЙ М. В.^{1*}, *д.т.н, проф.*,
ТИТЮК А. О.^{2*}, *к.т.н, доц.*,
ТИТЮК А. А.^{3*}, *к.т.н.*,
ПШИНЬКО П. О.^{4*}, *к.т.н.*

^{1*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

^{2*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-10-65, e-mail: anatol-61@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4927-370X

^{3*} Лабораторія досліджень атомних та теплових електростанцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: tytiuk89@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4119-4089

^{4*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: mostoproekt@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0003-4500-2450

Анотація. Постановка проблеми. Відомі численні випадки руйнування бетону захисного шару залізобетонних конструкцій внаслідок атмосферних кліматичних впливів, що характеризуються температурою, вологістю, концентрацією агресивних газів. Загальноприйнята методика проектування первинного захисту залізобетонних конструкцій носить рецептурний характер. Наявні кількісні залежності розрахунку карбонізації бетону внаслідок впливу вуглекислого газу не враховують температуру і вологість навколишнього середовища, а також розраховані на стаціонарні умови. У реальних умовах температура і вологість середовища змінюються залежно від пори року. При цьому необхідно враховувати, що карбонізація бетону відбувається тільки в період з додатною температурою і при певній вологості. У той же час, в період з від'ємними температурами відбувається поперемінне заморожування і відтавання бетону, що збільшує його проникність. Тому необхідна кількісна методика проектування первинного захисту захисного шару бетону залізобетонних конструкцій, яка враховує фізико-хімічний процес карбонізації бетону, ускладнений морозною деструкцією. **Мета.** Розробка методики проектування первинного захисту залізобетонних конструкцій в умовах атмосферних кліматичних впливів з урахуванням процесу карбонізації, сезонної та добової зміни температури і вологості середовища (на прикладі м.Дніпропетровська). **Методика.** Методи теорії тепло - масопереносу і розвитку гетерогенних хімічних реакцій при дослідженні довговічності бетону. **Результат.** Розроблено кількісний метод проектування первинного захисту залізобетонних конструкцій в умовах атмосферних кліматичних впливів. **Наукова новизна.** Запропоновано метод проектування первинного захисту бетону захисного шару залізобетонних конструкцій в умовах атмосферних кліматичних впливів. **Практичне значення.** На підставі проведених досліджень розроблена методика проектування складу бетону і параметрів захисного шару залізобетонних конструкцій для забезпечення довговічності на заданий термін служби.

Ключові слова: захисний шар бетону; карбонізація; морозна деструкція; первинний захист; довговічність; прогнозування

DESIGN OF PRIMARY PROTECTION OF CONCRETE STRUCTURES UNDER CLIMATE EFFECTS

SAVYTSKYI M.V. ^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

TYTIUK A. A. ^{2*}, *PhD, As.Prof.*

TYTIUK A. A. ^{3*}, *PhD.*

PSHYNKO P.A. ^{4*} *PhD*

^{1*} Department of Reinforce-Concrete and Stone Constructions, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

^{2*} Department of Reinforce-Concrete and Stone Constructions, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 46-10-65, e-mail: anatol-61@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4927-370X

^{3*} Branch research laboratory of nuclear and thermal power plants, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: tytiuk89@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4119-4089

^{4*} Department of Reinforce-Concrete and Stone Constructions, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: mostoproekt@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0003-4500-2450

Summary. Raising of problem. There are numerous cases of destruction of the concrete protective layer of reinforced concrete structures due to atmospheric climate effects that characterized by temperature, humidity, concentration of the corrosive gas. A common method of designing the primary protection of reinforced concrete structures has a prescription character. Available quantitative relations of concrete carbonation calculation due to the

impact of carbon dioxide do not take into account the temperature and humidity of the environment and are designed for stationary conditions. Under actual conditions, the temperature and humidity of the environment vary depending on the season. It should be kept in mind that the concrete carbonation takes place only during the period with positive temperature and with certain humidity. At the same time, during the negative temperature alternate freezing and thawing of concrete occurs, which increases permeability. Therefore, a quantitative method of designing the primary protection of concrete cover of reinforced structures is necessary, which takes into account physical and chemical process of carbonation of concrete, which is complicated by frosty destruction. **Purpose.** The development of a quantitative technique of designing the primary protection of reinforced concrete structures in the conditions of climate effects, taking into account carbonization process, seasonal and daily changes in temperature and humidity (on the example of Dnipropetrovsk). **Methods.** Methods of the theory of heat and mass transfer and development of heterogeneous chemical reactions while investigating of concrete durability. **Result.** A quantitative method of designing the primary protection of reinforced concrete structures in the conditions of climate effects was developed. **Scientific novelty.** A method of primary protection of concrete design method of the protective layer of reinforced concrete structures in the conditions of climate impacts. **Practical significance.** On the basis of the researches the technique of designing the concrete composition and parameters of the protective layer of reinforced concrete structures for ensuring of durability by a predetermined life span was developed.

Key words: concrete protective layer; carbonation; frosty destruction; primary protection; longevity; forecasting

Постановка проблемы. С момента широкого использования железобетонных конструкций и до настоящего времени в промышленном и гражданском строительстве остается актуальной проблема обеспечения их долговечности в условиях воздействия агрессивных сред природного, антропогенного или смешанного происхождения.

В условиях атмосферных климатических воздействий бетон защитного слоя железобетонных конструкций подвергается действию агрессивной воздушной среды, вызывающей нейтрализацию бетона, так и попеременному замораживанию и оттаиванию, приводящих к морозной деструкции бетона.

Обоснованию выбора первичной защиты арматуры в агрессивных условиях эксплуатации посвящены работы С. Н. Алексеева, Н. К. Розенталя [1], Е. А. Гузеева [3], Б. В. Гусева [4], Н. В. Савицкого [11] и др.

Влияние замораживания и оттаивания на бетон в своих работах изучали А. И. Васильев [2], А. М. Подвальный [9], Л. И. Дворкин [5] и др.

Методика расчета нейтрализации (карбонизации) бетона, предложенная Розенталем Н.К. [1], рассчитана на стационарные условия и не учитывает температуру и влажность окружающей среды. В реальных условиях температура и влажность среды изменяются в зависимости от времени года.

Несоответствие первичной защиты бетона железобетонных конструкций условиям эксплуатации может существенно уменьшить срок службы конструкций.

Стоит отметить, что в Европе [14, 15] и в США [12, 13], выбор толщины защитного слоя зависит от условий окружающей среды того региона, в котором будет эксплуатироваться конструкция.

В связи с вышеизложенным актуальной является разработка метода проектирования первичной защиты железобетонных конструкций, которая учитывает физико-химический процесс

карбонизации бетона, осложненной морозной деструкцией.

Цель статьи. Разработка метода проектирования первичной защиты железобетонных конструкций в условиях атмосферных климатических воздействий с учетом процесса карбонизации, сезонного и суточного изменения температуры и влажности среды (на примере г. Днепропетровска).

Изложение основного материала. При проектировании железобетонных конструкций следует определять необходимость и способы осуществления первичной защиты от коррозии. При этом необходимо осуществить выбор конструктивных параметров (толщина защитного слоя), материалов конструкции (состав бетона) с тем, чтобы обеспечить стойкость этой конструкции при эксплуатации в соответствующей агрессивной среде.

Степень агрессивности среды характеризуется разрушением бетона и/или потерей его защитного действия по отношению к стальной арматуре за 50 лет эксплуатации. Соответственно, для слабоагрессивной, среднеагрессивной и сильноагрессивной карбонизация распространяется на глубину не более 10 мм, не более 20 мм, 20 мм и более [6].

В зависимости от условий воздействия на бетон агрессивные среды подразделяют на классы, которые определяют по отношению к конкретному защищенному от коррозии бетону и железобетону. Классы сред с указанием их индексов возрастания агрессивности указаны в [7]. При одновременном воздействии агрессивных сред, различающихся индексами, но относящихся к одному классу применяют требования, среды с более высоким индексом (если в проекте не указано иное).

Условные обозначения классов сред эксплуатации указывают в проекте в зонах конкретных агрессивных воздействий с увязкой к месту расположения здания или сооружения и ожидаемыми воздействиями.

Окончательное решение о виде защиты и материалах для защиты от коррозии бетонных и железобетонных конструкций следует принимать на основе сравнения технико-экономических показателей различных вариантов технических решений.

При технико-экономических расчетах защитных мероприятий должны быть учтены капиталовложения, затраты на защиту от коррозии бетонных и железобетонных конструкций и стоимость ее периодического восстановления, а также значение вынужденных материальных потерь, вызываемых необходимостью перерыва производственного процесса на время восстановления защиты от коррозии.

Выбор мер защиты должен проводиться на основании технико-экономического сравнения вариантов с учетом прогнозируемого срока службы и расходов, включающих в себя расходы на восстановление вторичной защиты, текущий и капитальный ремонты и другие расходы, связанные с затратами на эксплуатацию конструкций.

Срок службы защиты от коррозии бетонных и железобетонных конструкций с учетом необходимости ее периодического восстановления должен соответствовать сроку эксплуатации здания или сооружения.

Требования к бетону и конструкции должны назначаться, исходя из необходимости обеспечения срока надежной эксплуатации сооружения не менее 50 лет. Для большего или меньшего расчетного срока эксплуатации могут применяться более или менее жесткие требования по граничным характеристикам.

Требования по обеспечению коррозионной стойкости бетона для каждого класса среды эксплуатации должны включать в себя:

- 1) разрешенные виды и марки (классы) составляющих бетона;
- 2) максимально допустимую величину водоцементного отношения;
- 3) минимально необходимое содержание цемента в бетоне;
- 4) минимальное воздухововлечение (в случае необходимости);
- 5) минимальный класс бетона по прочности на сжатие;
- 6) минимальную допускаемую марку бетона по водонепроницаемости и/или максимальный допускаемый коэффициент диффузии.

Требования к бетону железобетонных конструкций в зависимости от классов сред эксплуатации приведены в [7].

Особенностью процесса карбонизации является то, что при отрицательной температуре практически прекращается взаимодействие CO_2 с активными компонентами, растворенными в поровой жидкости бетона. Это связано с тем, что мельчайшие поры, в которых сохраняется незамерзшая капиллярная влага, недоступны для диффузии CO_2 в газовой среде, а известь из раствора переходит в

кристаллогидрат уже при температуре наружного воздуха $0,15^\circ\text{C}$ [1].

В исследовании времени карбонизации бетона защитного слоя в условиях атмосферных климатических воздействий температура и относительная влажность наружного воздуха принималась для условий г. Днепропетровска.

Исходными данными для проектирования согласно предложенному методу являются:

- 1) режим эксплуатации – температурная зона, влажностная зона, условия эксплуатации, количество циклов замораживания/оттаивания;
- 2) срок службы конструкций;
- 3) климатические условия района строительства;
- 4) концентрация агрессивных газов;
- 5) проектный класс бетона по прочности.

Возможные варьируемые параметры:

- 1) толщина защитного слоя;
- 2) состав бетона (цемент, песок, щебень, вода, добавки);
- 3) активность цемента.

Расчет состава бетона

Исходными параметрами при подборе состава бетона, как известно, является прочность бетона и подвижность бетонной смеси. Если прочность бетона конструкций задана в проекте, то она является нижним ограничением, которое необходимо учитывать при подборе состава бетона по критерию долговечности.

В зависимости от требуемой прочности бетона R_b^{req} определяется водоцементное отношение (W/C). При этом используется известная зависимость для прочности бетона [10]:

$$R_b = A R_c ((C/W) - b), \quad (1)$$

где: R_b – прочность бетона на сжатие;

R_c – активность цемента;

(C/W) – цементно-водное отношение;

A, b – эмпирические коэффициенты. Для бетона на щебне $A = 0,55$; $b = 0,5$.

$$R_b = R_b^{\text{req}} \quad (2)$$

$$(C/W) = R_b / (A R_c) + b, \quad (3)$$

$$(W/C) = 1 / (C/W) \quad (4)$$

где: R_b^{req} – требуемая прочность бетона на сжатие;

Назначается марка бетона по морозостойкости:

$$F \geq F^{\text{req}}, \quad (5)$$

где: F^{req} – требуемая марка бетона по морозостойкости;

Определить требуемую марку по морозостойкости с учетом или без учета применения воздухововлекающей добавки возможно с использованием полиномиальной модели предложенной в [5].

$$F^{\text{req}} = 380 - 68X_1 + 162X_2 + 148X_3 - 27X_4 + 22X_5 + 63X_6 - 39(X_2)^2 + 30X_1X_2 + 27X_2X_3 + 24X_3X_6 \quad (6)$$

где: $X_1 = (W - 180)/30$; $X_2 = (C/W - 2,1)/0,8$; $X_3 = (AEA - 0,06)/0,06$; $X_4 = (ND - 27,2)/2,6$; $X_5 = (R_c - 41,2)/6,7$; $X_6 = (\lg \tau - 1,86)$.

В приведенных выше кодированных значений факторов W – расход воды, л/м³; C/W – то же, что и в формуле (1); ND – нормальная густота цементного теста, %; R_c – активность цемента, МПа; τ – длительность твердения бетона, сут.; AEA – воздухововлекающая добавка.

Если не вводится воздухововлекающая добавка, то при заданной подвижности бетонной смеси (жесткости) и крупности гравия d_g определяется расход воды W для пластичных и жестких бетонных смесей по аналитическим зависимостям, полученным путем аппроксимации табулированных и графических данных, содержащихся в руководстве [8]:

$$\left. \begin{aligned} W &= 176,4 + 5,76 CS - 0,166 CS^2, \text{ при } d_g = 10 \text{ мм;} \\ W &= 162 + 5,464 CS - 0,125 CS^2, \text{ при } d_g = 20 \text{ мм;} \\ W &= 148,3 + 4,786 CS - 0,08 CS^2, \text{ при } d_g = 40 \text{ мм;} \\ W &= 133 + 5,286 CS - 0,134 CS^2, \text{ при } d_g = 70 \text{ мм;} \end{aligned} \right\} (7)$$

где CS – осадка конуса, см; d_g – крупность заполнителя, мм.

$$\left. \begin{aligned} W &= 189,47 - 1,983H + 0,033 H^2, \text{ при } d_g = 10 \text{ мм;} \\ W &= 173,25 - 1,748H + 0,0257 H^2, \text{ при } d_g = 20 \text{ мм;} \\ W &= 157,6 - 1,581H + 0,0228 H^2, \text{ при } d_g = 40 \text{ мм;} \end{aligned} \right\} (8)$$

где H – жесткость бетонной смеси, определенная по ГОСТ 10181-76. Для жесткости бетонной смеси, определенной по техническому вискозиметру, получена зависимость:

$$\left. \begin{aligned} W &= 189,51 - 0,654 H + 0,0036 H^2, \text{ при } d_g = 10 \text{ мм;} \\ W &= 173,55 - 0,586 H + 0,0028 H^2, \text{ при } d_g = 20 \text{ мм;} \\ W &= 158,27 - 0,548 H + 0,0027 H^2, \text{ при } d_g = 40 \text{ мм.} \end{aligned} \right\} (9)$$

Расход цемента, крупного и мелкого заполнителей определяется в соответствии с [10] по формулам:

$$C = W/W/C, \quad (10)$$

$$G = \frac{1000}{\frac{\alpha \cdot V_g}{\gamma_g} + \frac{1}{\rho_g}} \quad (11)$$

$$S = \left(1000 - \frac{Cem}{\rho_{cem}} - W - \frac{G}{\rho_g} \right) \cdot \rho_s, \quad (12)$$

где C , G , S – соответственно, расход цемента, гравия, песка, кг/м³;

V_g – пустотность гравия (щебня);

ρ_{cem} , ρ_s , ρ_g – соответственно, плотности цемента, песка и гравия, кг/л;

γ_g – насыпная плотность гравия, кг/л;

α – коэффициент раздвижки, зависящий от водоцементного отношения W/C и расхода цемента Cem .

Значения α для пластичных бетонных смесей приведены в [8], которая для удобства использования преобразована при помощи интерполяционного многочлена Лагранжа в аналитическую зависимость:

$$\alpha = \frac{(C-300) \cdot (C-350) \cdot (C-400) \cdot (C-500) \cdot (C-600)}{-6,5625 \cdot 10^{10} \cdot (0,6 \cdot W / C + 0,9)} + \frac{(C-250) \cdot (C-350) \cdot (C-400) \cdot (C-500) \cdot (C-600)}{1,5 \cdot 10^{10} \cdot (0,6 \cdot W / C + 1)} + \frac{(C-250) \cdot (C-300) \cdot (C-400) \cdot (C-500) \cdot (C-600)}{-9,735 \cdot 10^9 \cdot (0,6 \cdot W / C + 1,08)} + \frac{(C-250) \cdot (C-300) \cdot (C-350) \cdot (C-500) \cdot (C-600)}{1,5 \cdot 10^{10} \cdot (0,6 \cdot W / C^2 + 0,9 \cdot W / C + 0,86)} + \frac{(C-250) \cdot (C-300) \cdot (C-350) \cdot (C-400) \cdot (C-600)}{-7,5 \cdot 10^{10} \cdot (-2 \cdot W / C^2 + 2,2 \cdot W / C + 0,96)} + \frac{(C-250) \cdot (C-300) \cdot (C-350) \cdot (C-400) \cdot (C-500)}{5,25 \cdot 10^{11} \cdot (0,4 \cdot W / C + 1,4)}; \quad (13)$$

При расходе цемента свыше 400 кг/м³ расход воды необходимо увеличить на 1 л на каждые 10 кг цемента сверх 400 кг, согласно [10]:

$$W = W + n, \text{ если } 400 + 10n \leq x_1 < 400 + 10(n+1); \quad (14)$$

$$n = 1, 2, \dots, 20$$

где: n – количество дополнительной воды, л.

Время карбонизации бетона защитного слоя арматуры железобетонных конструкций (долговечность) τ_{carb} определяется из выражений:

$$a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \quad (15)$$

$$y_{ij} = \sqrt{\frac{2A_{j-1}(F) D_{ij}(T, \varphi) C \tau_i}{m_0}} \quad (16)$$

$$A_{j-1}(F) = \frac{1}{(1-P)^{Fj-1}} \quad (17)$$

$$D_{ij}(T, \varphi) = D_0 \cdot \xi_{Tij}, \quad (18)$$

$$D_0 = 10^{-4} (10^{(W/C - 0,4)/0,27} + 0,033(\varphi_{ij} - 60)(10^{(W/C - 0,7)/0,2} - 10^{(W/C - 0,4)/0,27})), \quad (19)$$

$$\xi_{Tij} = \left(\frac{273 + t_i}{273} \right)^{1,75}; \quad (20)$$

$$m_0 = f_{pc} (1 - p_a) Cem V Mg/M_{CaO}; \quad (21)$$

где: a – величина защитного слоя бетона;

$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij}$ – глубина карбонизации бетона защитного слоя арматуры за j календарных годов;

y_{ij} – глубина карбонизации бетона защитного слоя для i -го месяца с положительной температурой в j -том году определяется согласно зависимости (16);

$D_{ij}(T, \varphi)$ – эффективный коэффициент диффузии углекислого газа;

C – концентрация углекислого газа;

τ_i – время (продолжительность i -го месяца);

m_0 – реакционная емкость бетона;

$A_{j-1}(F)$ - коэффициент проницаемости;

P - вероятность разрушения бетона в цикле замораживания и оттаивания;

D_0 – эффективный коэффициент диффузии газа в бетоне при $t=0^\circ\text{C}$;

ξ_{tij} – коэффициент, учитывающий влияние температуры в i – м месяце j – го года на эффективный коэффициент диффузии газа.

W/C - водоцементное отношение;

ϕ_{ij} - относительная влажность воздуха в i - м месяце j – го года, %.

t_i - температура окружающей среды в i - м месяце, град. С.

p_c - содержание основных оксидов в цементном клинкере в пересчете на CaO в относительных величинах по массе;

p_a - содержание активных добавок в цементе.

f - степень нейтрализации бетона, равная отношению количества основных оксидов, прореагировавших с газом, к общему их количеству в цементе;

$C_{\text{ем}}$ - расход цемента;

V - объем 1 г газа: $V = V_m/M_g$;

V_m - объем 1 моля газа;

M_g - молекулярная масса газа;

M_{CaO} - молекулярная масса CaO .

Среднемесячная температура воздуха выражается зависимостью (22):

$$T(m)=e \cdot \sin(bm-c)+d \quad (22)$$

где: $T(m)$ – температура, $^\circ\text{C}$;

m – месяц (1,2,3,4,...);

e, b, c, d – коэффициенты.

Для условий г. Днепропетровска зависимость (22) принимает вид:

$$T(m)=14,213\sin(0,52m-2,095)+8,44 \quad (23)$$

С целью анализа нормативных значений бетона защитного слоя согласно ДСТУ – Н Б EN 1992 – 1-1: 2010 и ДСТУ Б В.2.6-145:2010 на соответствие реальным условиям эксплуатации для г. Днепропетровска, был выполнен расчет глубины нейтрализации защитного слоя бетона конструкций здания в условиях карбонизации и морозной деструкции (таблица 1). Расчет срока карбонизации бетона был выполнен при концентрации углекислого газа в воздухе в 0,03% и относительной влажности воздуха 62-87%.

Для принятых исходных данных был выполнен прогноз глубины нейтрализации защитного слоя в условиях карбонизации и морозной деструкции согласно методике, описанной выше. Результаты расчетов приведены в таблице 2 и на рис 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Initial Data for Calculation

Класс бетона, МПа	C30/37
Марка цемента	M500
Расход цемента, кг/м ³	300
В/Ц	0,5
Циклы попеременного замораживания и оттаивания	55
Требуемая морозостойкость	F100
Концентрация агрессивных газов, мг/м ³	2000 ⁽¹⁾
Срок службы конструкции, лет	50
Толщина защитного слоя	20 ⁽²⁾ , 30 ⁽³⁾
⁽¹⁾ – для углекислого газа; ⁽²⁾ – рекомендуемая величина защитного слоя по ДСТУ Б В.2.6-145:2010; ⁽³⁾ – рекомендуемая величина защитного слоя по ДСТУ – Н Б EN 1992 – 1-1: 2010.	

Таблица 2

Результаты расчета глубины нейтрализации защитного слоя бетона

The Results of Calculation of the Neutralization Depth of Concrete Protective Layer

Бетон класса C30/37	Продолжительность эксплуатации, лет									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Глубина карбонизации, мм	2,43	4,86	7,29	9,72	12,15	14,58	17,01	19,44	21,87	24,30

Как следует из данных, представленных в таблице 2 необходимая долговечность бетона 50 лет, в условиях эксплуатации в г. Днепропетровске, обеспечивается при толщине защитного слоя 25 мм.

Для анализа соответствия требованиям ДСТУ - Н Б EN 1992 - 1-1: 2010 и ДСТУ Б В.2.6-145:2010 прогнозные значения глубины карбонизации бетона в реальных условиях эксплуатации полученные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ величины защитного слоя для обеспечения долговечности бетона 50 лет
Comparative Analysis of the Magnitude of the Protective Layer to Ensure Concrete Durability to 50 years

Нормативный документ	С30/37		Запас долговечности
	Величина защитного слоя по нормам, мм	Результаты расчета глубины карбонизации по разработанной методике, мм	
ДСТУ Б В.2.6-145:2010	20	24,3	-22%
ДСТУ – Н Б EN 1992 – 1-1:2010	30		+24%

Выводы. 1. Разработана методика проектирования первичной защиты железобетонных конструкций в условиях климатических воздействий.

2. Для климатических условий г. Днепропетровска выполнен прогноз глубины карбонизации бетона защитного слоя при регламентируемых нормами параметрах бетона. Проведено сопоставление требований нормативных документов по назначению величины защитного слоя и прогнозных значений глубины карбонизации бетона.

3. Установлено, что при назначении защитного

слоя по нормам ДСТУ Б В.2.6-145:2010 получают недостаточную долговечность, меньше регламентируемого срока службы равного 50 лет. При назначении защитного слоя по нормам ДСТУ – Н Б EN 1992 – 1-1:2010 получают избыточную надежность и долговечность защитного слоя бетона более 50 лет.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Алексеев С. Н.** Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – Москва : Стройиздат, 1976. – 205 с.
2. **Васильев А. И.** О выборе толщины защитного слоя бетона мостовых конструкций / А. И. Васильев, А. С. Бейвель, А. М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 2001. – № 5. – С. 25-27.
3. **Гузев Е. А.** Учет агрессивных воздействий в нормах проектирования конструкций / Е. А. Гузев, С. Н. Алексеев, Н. В. Савицкий // Бетон и железобетон. – 1992. – № 10. – С. 8-10.
4. **Гусев Б. В.** Построение математической теории процессов коррозии бетона / Б. В. Гусев, А. С. Файвусович // Строительные материалы. – 2008. – № 3. – С. 38-41.
5. **Дворкін Л. Й.** Основы бетонознатства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Київ : Основа, 2007. – 616 с.: іл.
6. Еврокод 2 Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для сооружений (EN 1992-1-1: 2004, ИДТ) ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1: 2010 . – Изд. офиц. – Режим доступа: <http://profidom.com.ua/jevrokody/en-1992/7461-jevrokod-2-projektirovanije-zhelezobetonnyh-konstrukcij-chast-1-1->
7. Конструкции зданий и сооружений. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования : (ГОСТ 31384-2008, NEQ) ДСТУ Б В.2.6-145:2010. – [Введ. 2010-10-26]. – Киев : Минстрой Украины, 2010. – 78 с. – (Национальный стандарт Украины).
8. **Полак А. Ф.** О применении теории моделирования к вопросам коррозии бетона в агрессивной среде / А. Ф. Полак // Тр. НИИпромстроя, вып. 12. – Москва. : Стройиздат, 1974. – С. 260-265.
9. **Подвальный А. М.** Об испытаниях бетона на морозостойкость / А. М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 1996. – № 4. – С. 26-29.
10. Руководство по подбору состава тяжелого бетона./НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. – М.:Стройиздат, 1979.- 103с.
11. **Савицкий Н. В.** Основы расчета надежности железобетонных конструкций в агрессивных средах : дис. докт. техн. наук : 05.23.01 ; 05.23.05 / Н. В. Савицкий ; Днепрпетр. инж.-строит. ин-т. – Днепрпетровск, 1994. – 400 с.
12. **McCormac J. C.** Design of reinforced concrete. ACI 318-05 Code Edition / Jack C. McCormac, James K. Nelson. – 7th ed. – USA, 2005. – 737 p.
13. **Merritt F. S.** Building design and construction handbook / Frederick S. Merritt, Jonathan T. Ricketts. – 6th ed. – New York, 2000. – 1722 p.
14. **Mosley W. H.** Reinforced concrete design to Eurocode 2 / W. H. Mosley, Ray Hulse, J. H. Bungey. – London, 2004. – 67 p.

15. Structural use of concrete : British standard BS 8110-1:1997. – 1997. – Part 1 : Code of practice for design and construction. – Режим доступа:
https://docs.google.com/document/d/13wWCIZIjDSUPoHLdL4wBlg8JzBRAidK6FKQILhAGz_8/edit?pli=1

REFERENCES

1. Alekseev S. N. *Korrosionnaya stoikost zhelezobonnykh konstruktsiy v agressivnoy promyshlennoy srede* [Corrosion resistance of reinforced concrete structures in aggressive industrial environments] / S. N. Alekseev, N. K. Rosental ; – M. : Stroyizdat, 1976. – 205 p. (in Russian).
2. Vasilyev A. I. *O vibore tolshini zashitnogo sloya betona mostovih konstruktsiy* [On the choice of the thickness of the protective layer of concrete bridge structures] / A. I. Vasilyev, A. S. Beyvel, A. M. Podvalnyi // *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. – 2001. – № 5. – P. 25-27. (in Russian).
3. Guzeev E. A. *Uchet agressivnykh vozdeystviy v normah proektirovaniya konstruktsiy* [Record of aggressive actions in the standards of structural design] / E. A. Guzeev, S. N. Alekseev, N. V. Savitskiy // *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. – 1992. – № 10. – P. 8-10. (in Russian).
4. Gusev B. V. *Postroyeniye matematicheskoy teorii protsessov korrozii betona* [Construction of mathematical theory of concrete corrosion processes] / B. V. Gusev, A. S. Fayvovich // *Stroitelnye materialy* [Building materials]. – 2008. – № 3. – P. 38-41. (in Russian).
5. Dvorkin L. J. *Osnovy betonoznavstva* [Basics of concrete study] / L. J. Dvorkin, O. L. Dvorkin ; – K. : Osnova, 2007. – 616.: il. (in Ukrainian).
6. *Evrokod 2 Proektirovaniye zhelezobonnykh konstruktsiy. Chast 1-1. Obshnie pravila i pravila dlya sooryzheniy* [Eurocode 2 Design of concrete structures Part 1-1. General rules and rules for buildings] (EN 1992-1-1: 2004, IDT) DSTU-H B EN 1992-1-1: 2010 official edition.
7. *Konstruktsii zdaniy i sooryzheniy. Zashita betonnykh i zhelezobonnykh konstruktsiy ot korrozii. Obshnie tekhnicheskie trebovaniya* [Protection of concrete and reinforced concrete structures against corrosion. General technical requirements]. DSTU B V.2.6-145: 2010.- [Effective from 2010-10-26] . – K. : Ministry of Construction of Ukraine, 2010. – 78p. (GOST 31384: 2008, NEQ).
8. Polak A. F. *O primeneniye teorii modelirovaniya k voprosam korrozii betona v agressivnoy srede* [On the application of the theory of modeling to the issues of concrete corrosion in aggressive environment] / A. F. Polak // *Raboty NIIPromstroya* [Works NIIPromstroya], Vol. 12. - Moscow. : Stroyizdat, 1974. – P. 260-265. (in Russian).
9. Podvalnyi A. M. *Ob ispitaniyakh betona na morozostoikost* [On the tests of concrete on frost resistance] / A. M. Podvalnyi // *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. – 1996. – № 4. – C. 26-29. (in Russian).
10. *Rukovodstvo po podbory sostava tyazhelogo betona* [Guidelines for the selection of a heavy concrete structure]. / *Naychno issledovatel'skiy institut betona i zhelezobetona Gosstroya SSSR* [Research Institute of concrete and reinforced concrete of Gosstroy of the USSR]. - Moscow: Stroyizdat, 1979. – 103p. (in Russian).
11. Savitskiy N. V. *Osnovy rascheta nadezhnosti zhelezobonnykh konstruktsiy v agressivnykh sredakh* [Fundamentals of calculating the reliability of concrete structures in aggressive environments]. Thesis ... Dr. Sc. (Tech.). / N. V. Savitskiy. – M., 1993. – 399 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 10.08.2016