

УДК 624.01/04.001.18

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Приведены результаты исследований поврежденности различных типов железобетонных элементов (ЖБЭ) для разных эксплуатационных условий. Для возможности укрупненной оценки развития коррозионных повреждений ЖБЭ предложены регрессионные зависимости изменения во времени коррозионных повреждений в бетоне и (или) стальной арматуре для различных типов ЖБЭ, эксплуатирующихся в разных атмосферных средах.

**Введение.** Железобетон во всем мире признан одним из самых экономичных, экологически чистых, надежных и долговечных строительных материалов. В настоящее время объем производства бетона и железобетона в мировом строительном комплексе по разным оценкам колеблется от 2 до 3 млрд м<sup>3</sup> в год. В индустриально развитых странах на одного жителя затрачивается в год до 2 м<sup>3</sup> бетона и железобетона [1]. Таким образом, основную долю строительных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в настоящее время, составляют железобетонные элементы (ЖБЭ) и конструкции (ЖБК) различных типов.

Массовость применения бетона и железобетона, многолетние сроки службы, условия эксплуатации от нормальных до сильноагрессивных, качество эксплуатации обуславливают значительную повреждаемость ЖБЭ (ЖБК).

**Основная часть.** Повреждения ЖБЭ и ЖБК, их причины и последствия изучались многочисленными авторами [2–13 и др.]. В своих работах авторы, по результатам собственных исследований и исследований других ученых, систематизировали наиболее характерные повреждения ЖБЭ и ЖБК, выполнили анализ их влияния на техническое состояние ЖБЭ и ЖБК. Так, классификация повреждений ЖБЭ (ЖБК) по результатам анализа авторов [10] приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Количественное соотношение между повреждениями ЖБЭ и ЖБК

Повреждение	Процент от общего количества
Коррозия стальной арматуры под воздействием хлоридов (внутренних и внешних)	37,8
Коррозия арматуры вследствие карбонизации бетона	16,7
Размораживание бетона	11,1
Химические воздействия	3,60
Внутренняя коррозия бетона	8,90
Усадочные деформации	13,9
Абразия/эрозия	3,30
Кавитационные повреждения	1,10
Пластическое растрескивание	0,900
Термическое растрескивание	2,70

Приведенные данные показывают, что более чем в 50 % описанных случаев повреждения бетона были связаны с коррозией бетона и стальной арматуры.

Подавляющее большинство ЖБЭ и ЖБК эксплуатируются в различных атмосферных средах. Воздух –

многокомпонентная газовая смесь. Уже в данной среде могут происходить процессы коррозии бетона и стальной арматуры посредством их контакта с CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O [9]. Развитие мегаполисов и техническая революция, сопровождающиеся интенсивным развитием энергетики, металлургии, химической промышленности, всех видов транспорта, машиностроения, привели к значительному изменению состава воздушной среды (повышению её агрессивности), что в свою очередь вызвало ускорение процессов деградации бетона, коррозии стальной арматуры и, как следствие, снижению сроков эксплуатации конструкций из бетона и железобетона.

Большинство строительных конструкций эксплуатируется в условиях жилых, общественных, производственных, сельскохозяйственных зданий либо в условиях открытой атмосферы. Агрессивность атмосферной среды для ЖБЭ и ЖБК определяется следующими основными эксплуатационными условиями.

1 Открытая атмосфера: концентрация CO<sub>2</sub> – 0,03–1,20 % (по исследованиям автора); относительная влажность – до 100 %; периодический переход температуры через 0 °C; периодическое увлажнение атмосферными осадками различной степени интенсивности.

Продолжительность периода, сут, с температурой воздуха выше 0 °C в Республике Беларусь составляет 230–263, с температурой ≥5 °C – 185–208, ≥10 °C – 140–160 и ≥15 °C – 77–108. Все они увеличиваются с северо-востока на юго-запад. Преобладание влажного атлантического воздуха обусловило повышенную влажность воздуха в течение года. В осенне-зимний период она составляет 80–90 %, весной и летом понижается до 50–60 %. Высокая влажность воздуха является причиной частых туманов. Среднее количество суток с туманами составляет 35–60 на равнинах и 80–100 на возвышенностях. Более 70 % годовой суммы суток с туманами приходится на холодное полугодие (октябрь – март) [14].

Месячные суммы осадков имеют четко выраженный годовой ход с минимумом в феврале-марте и максимумом в летние месяцы. Около 70 % годовой суммы осадков приходится на теплый период года (с апреля по октябрь). Общее количество суток с осадками (0,1 мм и более) – 160–190, значительные осадки (1 мм и более) – 100–120, (5 мм и более) – 30–40, (10 мм и более) – 12–16. Около 70–80 % осадков дает дождь, 9–16 % – снег, остальные – смешанные [14].

2 Сельскохозяйственные здания: концентрация CO<sub>2</sub> – 0,1–1,0 %; относительная влажность – до 100 %; положительная температура в помещениях в течение всего года; наличие зон с повышенным содержанием CO<sub>2</sub> и

влажности длительные промежутки времени с учетом специфики вентиляции; постоянное длительное воздействие  $\text{CO}_2$  и влажности в зимний период.

Большое влияние на газовый состав воздушной среды животноводческих помещений оказывает выдыхаемый животными воздух. Содержание в нем углекислого газа в 100 и более раз превышает содержание в атмосферном воздухе, а кислорода – меньше на 25 %. По данным [16], в коровниках относительная влажность ( $W$ ) – 80–99 %, скорость движения воздуха ( $v$ ) – 0,09–0,5 м/с, содержание  $\text{CO}_2$  – 0,31–0,50 %, аммиака – 0,002–0,015 мг/л. В свинарниках в зависимости от периода года показатели микроклимата колеблются в следующих пределах: весной –  $W$  – 65,0–68,0 %,  $v$  – 0,16–0,19 м/с,  $\text{CO}_2$  – 0,30–0,36 %, аммиака – 5,5–6,0 мг/м<sup>3</sup>; летом –  $W$  – 57,0–60,0 %,  $v$  – 0,30–0,44 м/с,  $\text{CO}_2$  – 0,25–0,27 %, аммиака – 4,0–5,0 мг/м<sup>3</sup>; осенью –  $W$  – 66,0–72,0 %,  $v$  – 0,11–0,16 м/с,  $\text{CO}_2$  – 0,16–0,18 %, аммиака – 4,0–5,0 мг/м<sup>3</sup>; зимой –  $W$  – 70,5–71,9 %,  $v$  – 0,18–0,24 м/с,  $\text{CO}_2$  – 0,34–0,39 %, аммиака – 7,2–8,4 мг/м<sup>3</sup> [16]. Обычно в животноводческих зданиях относительная влажность колеблется от 50 до 90 %. Причем она выше у пола, чем у потолка. В условиях Беларуси [17] в некоторых зданиях относительная влажность часто поднимается выше 90 %, а нередко и до 100 %.

3 Общественные здания и промышленные – с неагрессивной эксплуатационной средой: концентрация  $\text{CO}_2$  – 0,03–0,12 %; относительная влажность – до 100 %; положительная температура в помещениях в течение всего года.

Газовый состав эксплуатационной среды незначительно отличается от условий открытой атмосферы.

В большей части помещений значения относительной влажности невысоки и изменяются в незначительных пределах. Существенное различие относительной влажности и влажности элементов и конструкций в по-

мещениях (их участках) связаны с эксплуатационными условиями (ванные, кухни в жилых домах, зоны влияния пропарочных камер в цехах и т. д.) или с повреждениями кровель (протечки).

На базе результатов многолетних обследований зданий различного назначения, с вскрытием бетона защитного слоя ЖБЭ, оценкой состояния бетона и стальной арматуры, выполненных НИЛ «Строительные конструкции, основания и фундаменты» имени д. т. н., профессора И. А. Кудрявцева, была выполнена оценка поврежденности основных типов ЖБЭ, эксплуатирующихся длительные сроки в разных атмосферных условиях.

Поврежденность ЖБЭ определяли по результатам обследования различных типов зданий Гомельской области Республики Беларусь.

Анализ поврежденности выполняли для основных типов ЖБЭ: колонн, полурам, балок покрытия, стропильных ферм, плит покрытия (перекрытия), стеновых панелей для каждого вида условий эксплуатации: сельскохозяйственных зданий (коровники), промышленных (цеха с неагрессивной средой), открытой атмосферы (недостроенные здания каркасного типа).

Оценивали поврежденность ЖБЭ для десяти зданий каждого типа эксплуатационных условий. Выявленные по результатам детального обследования дефекты и повреждения всех ЖБЭ были классифицированы и сгруппированы.

Для каждого типа ЖБЭ определяли количество видов повреждений и от общего количества – доли каждого вида повреждений. Затем, для дальнейшего анализа выделили повреждения ЖБЭ, вызванные коррозией бетона и (или) стальной арматуры.

Полученные результаты для всех типов ЖБЭ и различных условий эксплуатации представлены, соответственно, в таблицах 2–4.

Таблица 2 – Доля коррозионных повреждений в бетоне и (или) стальной арматуре ЖБЭ, эксплуатировавшихся в условиях сельскохозяйственных зданий

Конструктивные элементы	Срок эксплуатации, лет									
	10	12	15	18	20	24	27	30	33	36
	Коррозионные повреждения, %									
Колонны (стоечная часть полурам)	25,5	26,2	25,9	25,8	27,6	30,3	31,4	39,2	37,2	40,8
Балки (балочная часть полурам)	7,55	17,0	21,5	20,1	31,2	35,1	38,1	61,2	54,0	62,4
Стеновые панели	38,0	44,5	41,9	45,9	55,4	55,8	61,1	54,4	63,8	69,4
Плиты покрытия	59,7	59,6	66,2	73,5	69,7	77,2	78,8	85,8	82,8	87,2

Таблица 3 – Доля коррозионных повреждений в бетоне и (или) стальной арматуре ЖБЭ, эксплуатировавшихся в условиях общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой

Конструктивные элементы	Срок эксплуатации, лет									
	6	10	12	16	19	23	25	28	33	37
	Коррозионные повреждения, %									
Колонны	12,8	21,5	25,7	22,2	30,0	28,3	39,2	37,3	42,3	50,5
Стропильные фермы	12,1	15,2	25,8	22,0	33,3	34,7	30,9	46,9	45,6	50,1
Стеновые панели	10,7	18,9	15,6	23,1	25,0	22,5	30,8	35,3	33,9	37,6
Плиты покрытия	8,80	17,2	13,4	29,2	28,7	28,5	40,9	35,5	47,9	57,2

Таблица 4 – Доля коррозионных повреждений в бетоне и (или) стальной арматуре ЖБЭ, эксплуатировавшихся в условиях открытой атмосферы

Конструктивные элементы	Срок эксплуатации, лет									
	5	8	10	12	15	18	20	21	23	25
	Коррозионные повреждения, %									
Колонны	18,1	16,5	29,9	25,5	31,1	47,8	44,3	33,8	43,9	56,7
Стропильные фермы	21,1	34,9	34,8	34,5	44,2	50,3	48,5	54,4	65,1	62,8
Стеновые панели	13,8	22,1	26,5	21,8	31,7	30,4	42,5	38,2	39,9	48,6
Плиты покрытия	30,2	38,5	31,2	37,7	59,4	41,0	52,3	62,7	60,7	62,8

## Список литературы

На основе проведенного анализа были получены регрессионные зависимости изменения во времени коррозионных повреждений в бетоне и (или) стальной арматуре для различных типов ЖБЭ, эксплуатирующихся в разных атмосферных средах.

Полученные регрессионные зависимости носят линейный характер.

В общем виде они описываются следующим выражением:

$$\Pi = \alpha_0 + \alpha_1 t,$$

где  $\Pi$  – коррозионные повреждения бетона и (или) стальной арматуры, %;  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  – коэффициенты;  $t$  – прогнозный период, лет.

В таблице 5 представлены полученные аналитическим путем коэффициенты  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  для различных эксплуатационных условий.

Таблица 5 – Значения коэффициентов  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$

Конструктивный элемент	С/Х		А		ОПЗ	
	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_0$	$\alpha_1$
Колонны	17,0	0,620	7,33	1,75	8,60	1,07
Стропильные балки (фермы)	11,7	2,07	13,8	1,99	5,80	1,24
Стеновые панели	28,9	1,07	7,68	1,52	7,83	0,840
Плиты покрытия	49,5	1,09	21,0	1,70	0,345	1,45

*Примечание – С/Х; ОПЗ; А – условия, соответственно, сельскохозяйственных зданий, открытой атмосферы; общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой.*

Проверка значимости полученных регрессионных зависимостей для различных типов ЖБЭ показала, что предлагаемые модели адекватны, поскольку параметр  $P$ -Value  $\ll 0,05$  – уровня значимости, принятого в инженерной практике.

Предложенные зависимости могут быть использованы для укрупненного прогнозирования поврежденности различных типов ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных атмосферных средах, как на стадии проектирования, так и при их общем и детальном обследовании.

**Заключение.** 1 Анализ поврежденности ЖБЭ, эксплуатировавшихся в различные сроки, показал, что за длительный период эксплуатации коррозионным повреждениям бетона и стальной арматуры различной степени опасности подвержены все элементы для любых эксплуатационных сред.

2 Основной причиной возникновения и развития повреждений ЖБЭ является коррозия бетона и (или) стальной арматуры. По результатам исследований, их доля в длительно эксплуатируемых ЖБЭ составляет до 90 %.

3 Полученные зависимости могут быть использованы для укрупненного прогнозирования поврежденности ЖБЭ, эксплуатирующихся в различных эксплуатационных условиях, как на стадии проектирования, так и при реконструкции, по результатам общего (детального) обследования.

Получено 14.01.2019

**A. A. Vasilyev.** Prediction of corrosion damage of reinforced concrete elements for different operating conditions.

Results of researches of damage of various types of reinforced concrete elements (RCE) for different serviceable conditions are given. For a possibility of the integrated assessment of development of corrosion damages of RCE regression dependences of time history of corrosion damages to concrete and (or) steel fittings for the RCE various types which are operated in different atmospheric environments are offered.

1 Железобетон в XXI веке: Состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России / Госстрой России; НИИЖБ. – М.: Готика, 2001. – 684 с.

2 **Добромыслов, А. Н.** Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений / А. Н. Добромыслов // Промышленное строительство. – 1990. – № 9. – С. 9–10.

3 **Шкинев, А. Н.** Аварии на строительных объектах, их причины и способы предупреждения / А. Н. Шкинев. – М.: Стройиздат, 1986. – 375 с.

4 ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко Госстроя СССР. Анализ причин аварий и повреждений строительных конструкций. Вып. 5 / под ред. А. А. Шишкина. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.

5 **Устинов, В. П.** Анализ причин аварий современных конструкций / В. П. Устинов, Б. В. Устинов // Будівництво: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2000. – Вип. 8. – С. 173–176.

6 Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования: учеб. пособие для студентов строительных специальностей / под ред. проф. Т. М. Пецольда и проф. В. В. Тура. – Брест: БГТУ, 2003. – 380 с.

7 **Васильев, А. А.** Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций: [монография] / А. А. Васильев. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 263 с.

8 **Васильев, А. А.** Дефекты и повреждения элементов и конструкций зданий и сооружений: практ. пособие: в 2 ч. / А. А. Васильев. – Гомель: БелГУТ, 2011. – Ч. 1. – 303 с.; Ч. 2. – 231 с.

9 Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.] // Совм. изд. СССР – ЧССР – ФРГ. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.

10 Textbook on behavior, design and performance, Structural Concrete: December 2009. – Bulletin 53. – Second edition. – Fid. 3. – 2010. – Vol. 3. – 381 p.

11 **Гроздов, В. Т.** Дефекты строительных конструкций и их последствия / В. Т. Гроздов. – СПб.: Общероссийский общественный фонд «Центр качества строительства», 2001. – 148 с.

12 **Бондаренко, В. М.** Износ, повреждения и безопасность железобетонных сооружений / В. М. Бондаренко, А. В. Боровских. – М.: ИД Русанова, 2000. – 144 с.

13 Оценка и прогнозирование коррозионной поврежденности железобетонных элементов и конструкций для различных эксплуатационных условий / А. А. Васильев [и др.] // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2019. – С. 19–21.

14 Климат в Беларуси [Электронный ресурс] // Справочник агротуризма в Беларуси – AgroTour.biz. – Режим доступа: <https://agrotour.biz/main/9-klimat-v-belarusi.html/>. – Дата доступа: 30.03.2019.

15 **Плященко, С. И.** Микроклимат и продуктивность животных / С. И. Плященко, И. И. Хохлова. – Л.: Колос (Ленингр. отд-ние), 1976. – 208 с.

16 **Юрков, В. М.** Микроклимат животноводческих ферм и комплексов / В. М. Юрков. – М.: Россельхозиздат, 1985. – 223 с.

17 **Кескюлла, Т. Э.** Коррозионное разрушение железобетонных конструкций животноводческих зданий / Т. Э. Кескюлла, Я. А. Мильян, В. И. Новгородский // Бетон и железобетон. – 1980. – № 9. – С. 43–45.