

УДК 691.32:624.012.45/46

DOI 10.62595/1819-5245-2026-2-48-57

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЛУБИНЫ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ДЛЯ БЕТОНОВ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ АГРЕССИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

А. А. ВАСИЛЬЕВ, К. Э. АГЕЕВА, М. И. ТКАЧЕВА

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

В. В. ЛОГВИН

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Показана значимость необходимости исследования коррозионных процессов в стальной арматуре и их влияние на техническое состояние железобетона. Приведены основные характеристики агрессивности эксплуатационной среды сельскохозяйственных помещений – наиболее агрессивной среды в народном хозяйстве. Выполнено исследование, получены и приведены зависимости глубины коррозии стальной арматуры от расчетного содержания цемента для различных толщин защитного слоя, бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 для бетона класса по прочности на сжатие С18/22,5 эксплуатационных условий атмосферы сельскохозяйственных помещений. Получены математические зависимости глубины коррозии стальной арматуры от расчетного содержания цемента для различных толщин защитного слоя бетона классов по прочности на сжатие С12/15–С50/60, железобетонных изделий, эксплуатирующихся в условиях сельскохозяйственных помещений ($h = f(C_p, t_{cp}, s)$), бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2. Выведены зависимости глубины коррозии стальной арматуры от гарантированной прочности бетона на сжатие ($h = f(f_{c, cube}^G, t_{cp}, s)$) для бетонных смесей различных марок по удобоукладываемости.

Ключевые слова: бетон, толщина защитного слоя, стальная арматура, коррозия, агрессивная среда.

Для цитирования. Прогнозирование глубины коррозионных повреждений стальной арматуры для бетонов различных классов по прочности на сжатие в условиях повышенной агрессивности эксплуатационной воздушной среды / А. А. Васильев, К. Э. Агеева, М. И. Ткачева, В. В. Логвин // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 2 (105). – С. 48–57. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-48-57>

PREDICTION OF THE CORROSION DAMAGE DEPTH TO STEEL REINFORCEMENT FOR CONCRETE OF VARIOUS CLASSES ACCORDING TO COMPRESSIVE STRENGTH UNDER CONDITIONS OF INCREASED AGGRESSIVENESS OF THE OPERATIONAL AIR ENVIRONMENT

A. A. VASILYEV, K. E. AGEeva, M. I. TKACHEVA

Belarusian State University of Transport, Gomel

V. V. LOGVIN

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

The importance of investigating corrosion processes in steel reinforcement and their influence on the service condition of reinforced concrete structures is demonstrated. The main characteristics of the aggressive service environment of agricultural buildings, which represents one of the most aggressive environments in civil engineering practice, are presented. A study was carried out, and relationships describing the dependence of steel reinforcement corrosion depth on the design cement content were obtained for various concrete cover thicknesses, concrete mixtures with workability classes P1, Zh1 and Zh2 (P1 – low-slump concrete mixture; Zh1 and Zh2 – stiff concrete mixtures), and concrete of compressive strength class C18/22,5 under the exposure conditions of agricultural buildings. Mathematical relationships between the depth of steel reinforcement corrosion and the design cement content were obtained for various concrete cover thicknesses and concrete compressive strength classes C12/15–C50/60 for reinforced concrete elements operating in agricultural buildings: $h = f(Cr, tgr, s)$, where Cr is the design cement content, tgr is the service life, and s is the concrete cover thickness. Concrete mixtures with workability classes P1, Zh1 and Zh2 were considered. Relationships describing the dependence of steel reinforcement corrosion depth on the guaranteed compressive strength of concrete ($h = f(f_{c,cube}^G, t_{sp}, s)$) were also derived for concrete mixtures with different workability classes.

Keywords: concrete, concrete cover thickness, steel reinforcement, corrosion, aggressive environment.

For citation. Vasilyev A. A., Ageeva K. E., Tkacheva M. I., Logvin V. V. Prediction of the corrosion damage depth to steel reinforcement for concrete of various classes according to compressive strength under conditions of increased aggressiveness of the operational air environment. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 2 (105), pp. 48–57 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-48-57>

Введение

Скорость и интенсивность коррозионных процессов в бетоне и стальной арматуре определяют техническое состояние (и его изменение во времени) железобетонных изделий (ЖБИ) [1–4]. Карбонизация бетона, являясь основным видом коррозии бетона, напрямую не вызывает коррозию стальной арматуры, но, нейтрализуя бетон и уменьшая (до полной потери) его защитные свойства по отношению к стальной арматуре, создает условия для возникновения и развития (различной степени интенсивности) коррозии стальной арматуры. В свою очередь, скорость и интенсивность карбонизации определяет в первую очередь агрессивность эксплуатационной среды, и во вторую – состав бетона (количество использованного цемента) [4, 5].

Исследование коррозионных повреждений стальной арматуры в условиях повышенной агрессивности эксплуатационной среды позволяет прямо судить о скорости и значимости коррозии стальной арматуры для любых существующих условий эксплуатации железобетонных элементов и конструкций.

Целью данной работы является прогнозирование глубины коррозии стальной арматуры в защитном слое бетонов различных классов по прочности на сжатие в условиях повышенной агрессивности воздушной среды.

Материалы и методы исследования

Использовались экспресс-методы определения карбонатной составляющей и показателя pH поровой жидкости бетона [6, 7] и построение зависимостей с применением программного комплекса «Microsoft Excel».

Результаты и обсуждение

Среди наиболее часто встречающихся существующих эксплуатационных сред (открытой атмосферы, общественных и промышленных зданий с неагрессивной эксплуатационной средой, сельскохозяйственных помещений) наиболее агрессивными (по отношению и к бетону, и к стальной арматуре) являются условия сельскохозяй-

ственных помещений. В коровниках и свинарниках концентрация CO_2 определяется в первую очередь жизнедеятельностью животных. Так, в выдыхаемом животными воздухе содержится по сравнению с атмосферным более чем в 100 раз углекислого газа и менее чем на 25 % кислорода [8]. В коровниках относительная влажность – 80–99 %, содержание углекислого газа – 0,31–0,50 %. В свинарниках, в зависимости от периода года, относительная влажность – до 72 %, содержание углекислого газа – до 0,39 % [9]. При тщательном обследовании железобетонных элементов коровников (в зимний период) автором [4] зафиксировано содержание CO_2 до 1,2 %.

В таких условиях происходит ускоренная (значительно) карбонизация бетона защитного слоя, снижающая его защитные свойства по отношению к стальной арматуре, создавая все условия для возникновения и развития коррозии стальной арматуры. Кроме того, такие атмосферные условия способствуют ускоренному развитию электрохимической коррозии стальной арматуры.

Стальная арматура (рабочая, конструкционная) в бетоне, под воздействием агрессивности эксплуатационной среды, подвергается прежде всего электрохимической коррозии – самопроизвольному разрушению металлов под действием электролитов, при котором окисление металла и восстановление окислителя протекают в виде двух сопряженных электрохимических процессов.

Электрохимическая коррозия возникает при контакте металла с электролитом, а именно в жидких электролитах. При электрохимической коррозии устанавливается коррозионный ток и происходит растворение металла вследствие электрохимического взаимодействия с электролитом.

Поверхность любого металла (сплава) в электролите электрохимически гетерогенна (неоднородна), что приводит к образованию микрогальванического коррозионного элемента и состоит из множества короткозамкнутых микроэлектродных элементов.

Перечислим причины возникновения электрохимической неоднородности: неоднородность структуры металла (в углеродистых сталях присутствуют фазы – феррит и цементит, структурные составляющие – перлит, цементит и феррит, имеющие различные электродные потенциалы); наличие на поверхности сталей оксидных пленок, загрязнений, неметаллических включений; неравномерное распределение окислителя на границе «металл–электролит», например, различные влажность и аэрация на разных участках поверхности металла; неравномерность распределения температуры; контакт разнородных металлов.

В железобетонных элементах и конструкциях (ненапрягаемых) наиболее часто применяют стальную арматуру марок А240 и А400, выполняемую из низкоуглеродистых сталей СтЗсп и СтЗпс с содержанием углерода 0,14–0,22 %; А500 С (25Г2С, 35ГС, 32Г2Рпс) с содержанием углерода 0,22–0,37 %. В углеродистых сталях присутствуют две фазы – феррит (твердый раствор углерода в α -железе с растворимостью 0,02 %) и цементит (соединения Fe_3C с содержанием углерода 6,67 %). Структурными составляющими являются: феррит, цементит и перлит. Такая структура придает конструкционным сталям необходимые эксплуатационные и технологические свойства, одновременно с этим она же и способствует коррозии, так как все структурные составляющие углеродистых сталей имеют разные электродные потенциалы. Вместе с тем разница потенциалов возникает на границе зерен стали.

По результатам многолетних исследований карбонизации бетона и ее влияния на развитие коррозионных процессов в стальной арматуре ЖБИ была установлена взаимосвязь глубины коррозии с физико-химическими показателями цементно-песчаной фракции бетона защитного слоя в зоне расположения арматуры и получена зависимость развития коррозии во времени [5].

Глубина коррозии стальной арматуры для любой толщины защитного слоя:

$$h(t, s) = \left(b_0 + \frac{b_1}{s} \right) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(c_0 + \frac{c_1}{s} \right) t \right] \right\}, \quad (1)$$

где h – глубина коррозии стальной арматуры, мм; t – время эксплуатации, годы; s – толщина защитного слоя бетона, мм; b_0, b_1, c_0, c_1 – коэффициенты, аппроксимирующие экспоненциальную зависимость.

Для оценки и анализа глубины коррозионных повреждений использовали бетон класса по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ как бетон, из которого массово возведены и проектируются железобетонные элементы для сельскохозяйственных зданий и сооружений.

Путем анализа и математической обработки зависимости (1), для бетона класса по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ с учетом расчетных содержаний цемента (Π_p , кг/м³) для подвижных и жестких бетонных смесей, для нормативного срока эксплуатации помещений сельскохозяйственного назначения – 25 лет, получена зависимость $h = f(\Pi_p, s, t_{rp})$:

$$h = (0,0024s^3 - 0,0844s^2 + 0,6382s + 3,771) \exp(-0,0020 \cdot \exp(0,0789s) \Pi_p). \quad (2)$$

Зависимость (2) является кривой второго рода.

На рис. 1а–1в представлена зависимость $h = f(t_{rp} = 25 \text{ лет}, s, \Pi_p)$ для марок бетонной смеси по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 соответственно.

В графических зависимостях $h = f(t_{rp} = 25 \text{ лет}, s, \Pi_p)$ (рис. 1а–1в) представлены значения Π_p по отношению к конкретной марке бетонной смеси по удобоукладываемости, охватывающие весь интервал значений цемента для отпускной прочности бетона $R = 70\text{--}100 \%$.

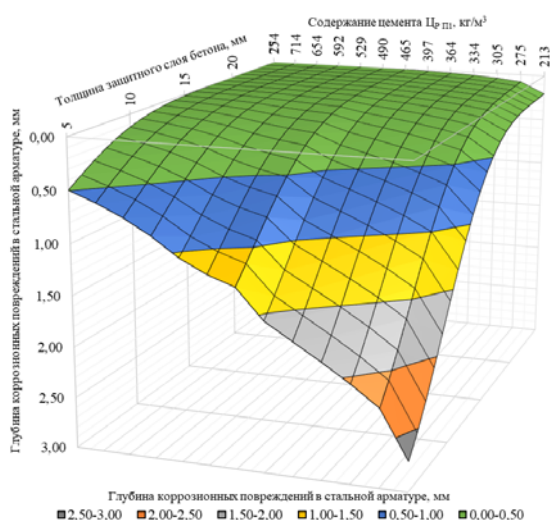


Рис. 1а. Зависимость $h = f(t = 25 \text{ лет}, s, \Pi_p)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости (П1)

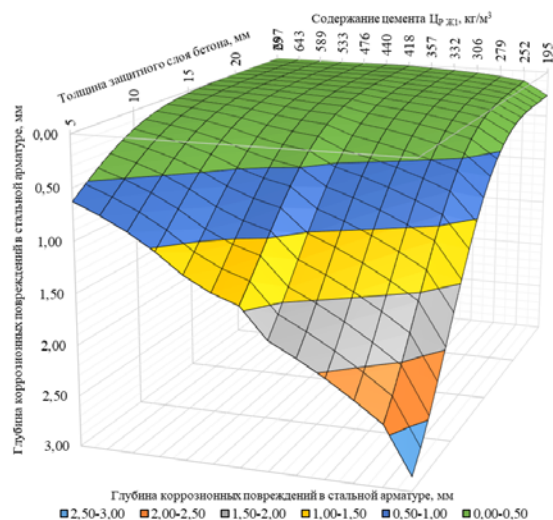


Рис. 1б. Зависимость $h = f(t = 25 \text{ лет}, s, \Pi_p)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости (Ж1)

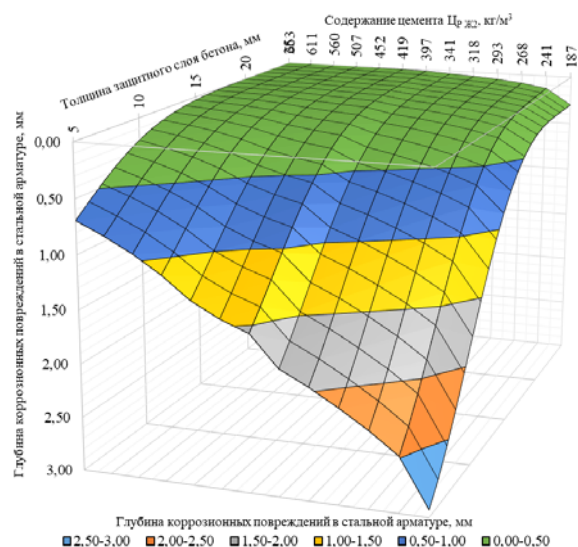


Рис. 1в. Зависимость $h = f(t = 25 \text{ лет, } s, \text{Ц}_p)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости (Ж2)

Выполним исследование зависимости (1) с учетом практической сложности ее использования и максимально применительно к реальным ЖБИ. С учетом того, что наиболее часто применяются ЖБИ с отпускной прочностью бетона 70 %, в которых использованы бетонные смеси марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2, расчетные содержания цемента получены для ОК = 4 см (марка смеси по удобоукладываемости П1), 8 с (Ж1) и 15 с (Ж2).

Расчетные содержания цемента для рассматриваемых классов бетона по прочности на сжатие получали определением составов бетонов на основе зависимостей и вычислительного комплекса «Технолог», разработанных доктором технических наук, профессором В. В. Бабицким.

Значения Ц_p для различных классов бетона по прочности на сжатие при отпускной прочности бетона $R = 70 \%$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения Ц_p для различных классов бетона по прочности на сжатие при отпускной прочности бетона $R = 70 \%$

Класс бетона по прочности на сжатие	Ц_p , кг/м ³ , для марки бетонной смеси по удобоукладываемости		
	П1	Ж1	Ж2
$C^{12}/_{15}$	213	194	187
$C^{16}/_{20}$	275	251	242
$C^{18}/_{22,5}$	305	280	274
$C^{20}/_{25}$	334	303	293
$C^{22}/_{27,5}$	365	328	316
$C^{25}/_{30}$	397	353	339
$C^{28}/_{35}$	464	414	396
$C^{30}/_{37}$	490	437	419
$C^{32}/_{40}$	529	472	452

Окончание табл. 1

Класс бетона по прочности на сжатие	Π_p , кг/м ³ , для марки бетонной смеси по удобоукладываемости		
	П1	Ж1	Ж2
C ³⁵ / ₄₅	592	528	506
C ⁴⁰ / ₅₀	654	584	560
C ⁴⁵ / ₅₅	714	637	611
C ⁵⁰ / ₆₀	774	691	663

Используя значения Π_p (табл. 1) и зависимость (1) для бетонов классов по прочности на сжатие C¹²/₁₅–C⁵⁰/₆₀ для граничных значений $s = 10$ – 50 мм с шагом 1 мм и нормативного срока эксплуатации $t_{rp} = 25$ лет, рассчитаем значения глубины коррозии стальной арматуры.

Используя рассчитанные значения h , с учетом математической обработки, получим зависимости $h = f(\Pi_p, t_{rp}, s)$ для толщин защитного слоя бетона 5–50 мм, что наиболее приемлемо как для эксплуатируемых, так и проектируемых железобетонных изделий.

В общем виде зависимость $h = f(\Pi_p, t_{rp}, s)$:

$$h = k_1 s^4 + k_2 s^3 + k_3 s^2 + k_4 s + k_5, \quad (3)$$

где k_1 – k_5 – коэффициенты, аппроксимирующие полиномиальную кривую 4-й степени; k_1 , мм/мм⁴; k_2 , мм/мм³; k_3 , мм/мм²; k_4 , мм/мм; k_5 , мм.

Зависимости $h = f(\Pi_p, t_{rp}, s)$ для бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 представлены соответственно в табл. 2–4.

Таблица 2

Зависимость $h = f(\Pi_p, t_{rp}, s)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости П1

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость $h = f(\Pi_p, t_{rp}, s)$	R^2
C ¹² / ₁₅	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 45,50 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0242 s^2 - 0,5744 s + 5,224$	0,9932
C ¹⁶ / ₂₀	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 40,50 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0216 s^2 - 0,5067 s + 4,418$	0,9956
C ¹⁸ / _{22,5}	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 39,50 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0209 s^2 - 0,4807 s + 4,088$	0,9963
C ²⁰ / ₂₅	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 38,70 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0202 s^2 - 0,4564 s + 3,792$	0,9967
C ²² / _{27,5}	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 37,80 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0194 s^2 - 0,4317 s + 3,506$	0,9970
C ²⁵ / ₃₀	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 36,60 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0185 s^2 - 0,4046 s + 3,211$	0,9972
C ²⁸ / ₃₅	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 33,60 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0166 s^2 - 0,3500 s + 2,667$	0,9970
C ³⁰ / ₃₇	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 32,30 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0158 s^2 - 0,3306 s + 2,487$	0,9967
C ³² / ₄₀	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 30,20 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0146 s^2 - 0,3015 s + 2,227$	0,9961
C ³⁵ / ₄₅	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 26,70 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0128 s^2 - 0,2578 s + 1,857$	0,9945
C ⁴⁰ / ₅₀	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 23,40 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0110 s^2 - 0,2194 s + 1,547$	0,9923
C ⁴⁵ / ₅₅	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 20,40 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0095 s^2 - 0,1866 s + 1,294$	0,9895
C ⁵⁰ / ₆₀	$h = 1,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 17,60 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0081 s^2 - 0,1581 s + 1,080$	0,9862

Таблица 3

Зависимость $h = f(\sigma_p, t_{гр}, s)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости Ж1

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость $h = f(\sigma_p, t_{гр}, s)$	R^2
C ¹² /15	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 48,90 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0257 s^2 - 0,6036 s + 5,515$	0,9919
C ¹⁶ /20	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 41,60 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0224 s^2 - 0,5284 s + 4,692$	0,9950
C ¹⁸ /22,5	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 40,40 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0215 s^2 - 0,5031 s + 4,372$	0,9957
C ²⁰ /25	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 39,50 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0209 s^2 - 0,4798 s + 4,077$	0,9963
C ²² /27,5	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 38,80 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0202 s^2 - 0,4581 s + 3,812$	0,9967
C ²⁵ /30	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 38,00 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0196 s^2 - 0,4375 s + 3,571$	0,9969
C ²⁸ /35	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 35,80 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0179 s^2 - 0,3875 s + 3,034$	0,9972
C ³⁰ /37	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 34,80 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0173 s^2 - 0,3698 s + 2,857$	0,9971
C ³² /40	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 33,00 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0162 s^2 - 0,3414 s + 2,586$	0,9969
C ³⁵ /45	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 30,00 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0145 s^2 - 0,2986 s + 2,202$	0,9960
C ⁴⁰ /50	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 28,90 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0128 s^2 - 0,2598 s + 1,873$	0,9946
C ⁴⁵ /55	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 24,00 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0113 s^2 - 0,2259 s + 1,599$	0,9927
C ⁵⁰ /60	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 21,20 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0099 s^2 - 0,1955 s + 1,361$	0,9904

Таблица 4

Зависимость $h = f(\sigma_p, t_{гр}, s)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости Ж2

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость $h = f(\sigma_p, t_{гр}, s)$	R^2
C ¹² /15	$h = 4,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 51,00 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0266 s^2 - 0,6192 s + 5,658$	0,9912
C ¹⁶ /20	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 42,40 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0228 s^2 - 0,5399 s + 4,832$	0,9946
C ¹⁸ /22,5	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 40,80 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0218 s^2 - 0,5131 s + 4,499$	0,9955
C ²⁰ /25	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 39,90 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0212 s^2 - 0,4909 s + 4,216$	0,9960
C ²² /27,5	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 39,20 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0206 s^2 - 0,4697 s + 3,953$	0,9965
C ²⁵ /30	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 38,50 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0200 s^2 - 0,4507 s + 3,724$	0,9968
C ²⁸ /35	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 36,60 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0185 s^2 - 0,4046 s + 3,211$	0,9972
C ³⁰ /37	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 35,70 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0179 s^2 - 0,3867 s + 3,026$	0,9972
C ³² /40	$h = 3,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 34,20 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0169 s^2 - 0,3602 s + 2,765$	0,9971
C ³⁵ /45	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 31,40 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0153 s^2 - 0,3177 s + 2,371$	0,9965
C ⁴⁰ /50	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 28,50 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0137 s^2 - 0,2794 s + 2,037$	0,9954
C ⁴⁵ /55	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 25,70 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0122 s^2 - 0,2455 s + 1,756$	0,9939
C ⁵⁰ /60	$h = 2,000 \cdot 10^{-6} s^4 - 22,90 \cdot 10^{-5} s^3 + 0,0108 s^2 - 0,2142 s + 1,507$	0,9919

Для возможности визуального анализа изменения граничных значений величины h в графическом виде зависимости $h = f(\Pi_p, t_{гр}, s)$ для классов бетона по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$, $C^{18}/_{22,5}$ и $C^{50}/_{60}$ бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 приведены на рис. 2.

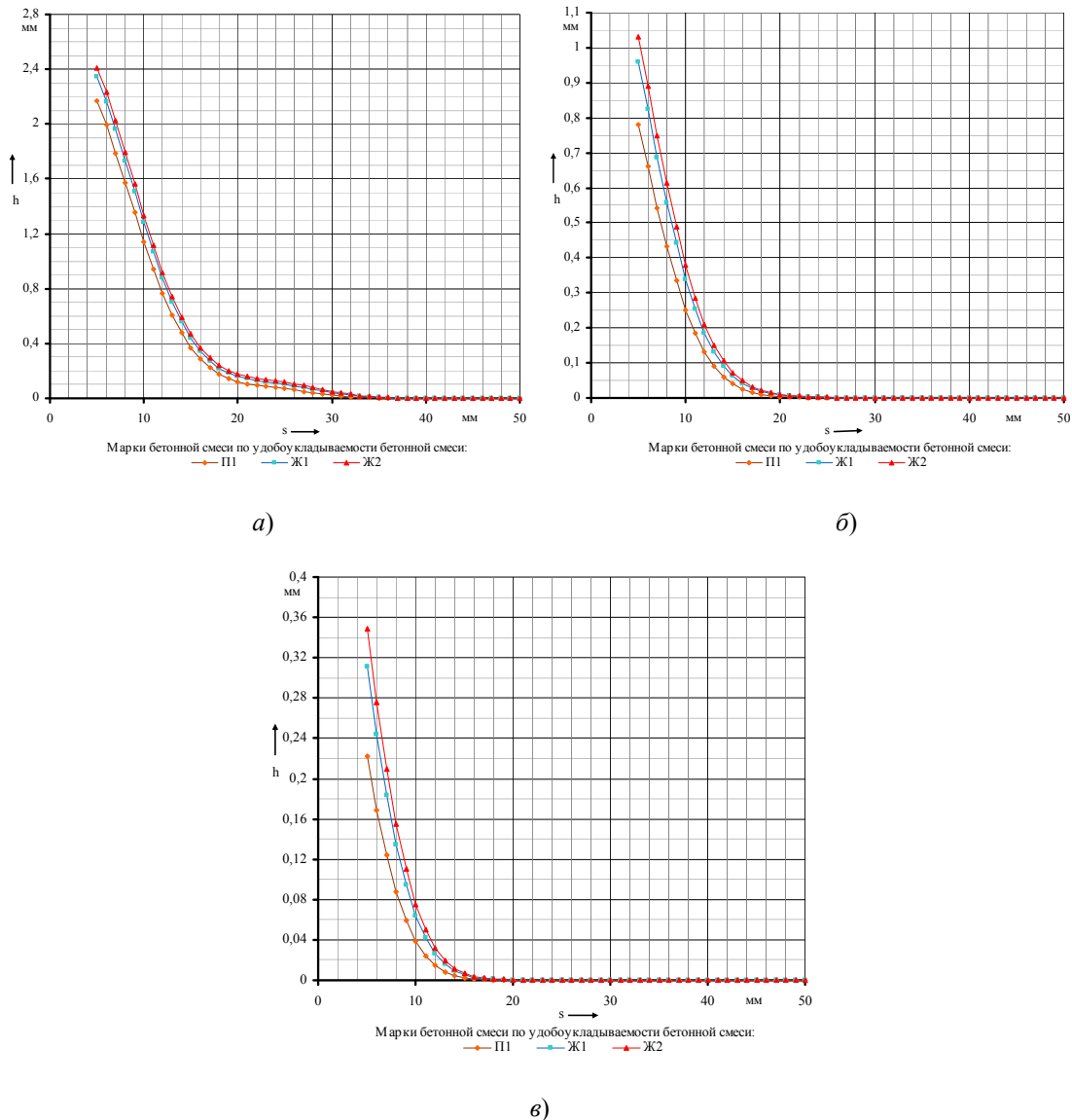


Рис. 2. Зависимость $h = f(t_{гр} = 25 \text{ лет}, s, \Pi_p)$ для бетонов классов по прочности на сжатие: а – $C^{12}/_{15}$; б – $C^{18}/_{22,5}$; в – $C^{50}/_{60}$

Зависимости $h = f(\Pi_p, t_{гр}, s)$ (табл. 1–3) дают возможность получить выражения для прогнозирования глубины коррозии стальной арматуры от гарантированной прочности бетона для различных марок бетонных смесей по удобоукладываемости.

Путем математического анализа значений коэффициентов k_1 – k_5 выражений $h = f(\Pi_p, t_{гр}, s)$ (табл. 2–4) получены значения коэффициентов k_1 – k_5 для бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 (табл. 5) и зависимости $h = f(f_{c,cube}^G, t_{гр}, s)$, где $f_{c,cube}^G$ – гарантированная прочность бетона на сжатие, МПа.

Значения коэффициентов k_1 – k_5 для различных марок бетонных смесей по удобоукладываемости

Значения k_n для марки бетонной смеси по удобоукладываемости			
k_n	П1	Ж1	Ж2
k_1	$-4,180 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 3,870 \cdot 10^{-6}$	$-3,090 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 3,715 \cdot 10^{-6}$	$-3,780 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 4,113 \cdot 10^{-6}$
k_2	$60,35 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 53,97 \cdot 10^{-6}$	$53,46 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 53,99 \cdot 10^{-6}$	$52,72 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 54,64 \cdot 10^{-6}$
k_3	$-0,0400 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 0,0291 \cdot 10^{-6}$	$-0,0300 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 0,0295 \cdot 10^{-6}$	$-0,0300 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 0,0297 \cdot 10^{-6}$
k_4	$0,930 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 0,6884 \cdot 10^{-6}$	$0,890 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 0,7063 \cdot 10^{-6}$	$-0,870 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 0,7145 \cdot 10^{-6}$
k_5	$-9,050 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 6,092 \cdot 10^{-6}$	$8,990 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 6,391 \cdot 10^{-6}$	$8,930 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 6,525 \cdot 10^{-6}$

Таким образом, зависимости $h = f(f_{c,cube}^G, t_{гр}, s)$ для условий сельскохозяйственных помещений, бетонных смесей марок по удобоукладываемости:

П1

$$h = (-4,180 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 3,870 \cdot 10^{-6})s^4 + (60,35 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 53,97 \cdot 10^{-6})s^3 + (-0,0400 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 0,0291 \cdot 10^{-6})s^2 + (0,930 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 0,6884 \cdot 10^{-6})s + (-9,050 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 6,092 \cdot 10^{-6}). \quad (4)$$

Ж1

$$h = (-3,090 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 3,715 \cdot 10^{-6})s^4 + (53,46 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 53,99 \cdot 10^{-6})s^3 + (-0,0300 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 0,0295 \cdot 10^{-6})s^2 + (0,890 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 0,7063 \cdot 10^{-6})s + (8,990 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 6,391 \cdot 10^{-6}). \quad (5)$$

Ж2

$$h = (-3,780 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 4,113 \cdot 10^{-6})s^4 + (52,72 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 54,64 \cdot 10^{-6})s^3 + (-0,0300 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 0,0297 \cdot 10^{-6})s^2 + (-0,870 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G - 0,7145 \cdot 10^{-6})s + (8,930 \cdot 10^{-8} f_{c,cube}^G + 6,525 \cdot 10^{-6}). \quad (6)$$

Заключение

Полученные зависимости $h = f(\Pi_p, t_{гр}, s)$ и $h = f(f_{c,cube}^G, t_{гр}, s)$ дают возможность оценивать развитие и прогнозировать с достаточной точностью глубину коррозии стальной арматуры в карбонизированном бетоне для эксплуатационных условий высокой агрессивности среды (сельскохозяйственных помещений). Их использование позволяет получить достаточно объективные картины развития коррозии стальной арматуры в карбонизированном бетоне (в настоящее время не существует), что при проектировании ЖБИ (в том числе при проектировании состава бетона) даст возможность значительно улучшить качество оценки долговечности и остаточного ресурса железобетонных изделий для эксплуатационных условий повышенной агрессивности сельскохозяйственных зданий.

Литература

1. Железобетон в XXI веке: Состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России / Госстрой России ; НИИЖБ. – М. : Готика, 2001. – 684 с.
2. Гроздов, В. Т. Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений / В. Т. Гроздов. – СПб. : Общерос. обществ. фонд «Центр качества строительства», 2001. – 141 с.
3. Добромыслов, А. Н. Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений / А. Н. Добромыслов // Промышленное строительство. – 1990. – № 9. – С. 9–10.
4. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона / А. А. Васильев ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.
5. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций / А. А. Васильев. – Гомель : Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
6. Васильев, А. А. Экспресс-метод определения карбонатной составляющей (показателя КС) цементно-песчаной фракции бетона / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2021. – № 1 (42). – С. 94–97.
7. Васильев, А. А. Экспресс-метод определения водородного показателя водной вытяжки цементного камня (показателя рН) / А. А. Васильев // EUROPEAN SCIENTIFIC CONFERENCE : сб. ст. XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Наука и Просвещение, 2019. – С. 52–57.
8. Юрков, В. М. Микроклимат животноводческих ферм и комплексов / В. М. Юрков. – М. : Россельхозиздат, 1985. – 223 с. : ил.
9. 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.

References

1. Reinforced concrete in the XXI century: State and development prospects of concrete and reinforced concrete in Russia. Moscow, Gotika Publ., 2001. 684 p. (in Russian).
2. Grozdov V. T. *Signs of emergency condition of load-bearing structures of buildings and structures*. St. Petersburg, Obshcherossiiskii obshchestvennyi fond “Tsentr kachestva stroitel'stva”, 2001. – 141 p. (in Russian).
3. Dobromyslov A. N. Accident analysis of industrial buildings and engineering structures. *Proyshlennoe stroitel'stvo*, 1990, no. 9, pp. 9–10 (in Russian).
4. Vasil'ev A. A. *Assessment and forecasting of the technical condition of reinforced concrete structures taking into account concrete carbonization*. Gomel', Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta, 2019. 215 p. (in Russian).
5. Vasil'ev A. A. *Carbonization and damage assessment of reinforced concrete structures*. Gomel', Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta, 2012. 263 p. (in Russian).
6. Vasil'ev A. A. Express method for determination of carbonate component (KS index) of cement-sand fraction of concrete. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta. Nauka i transport*, 2021, no. 1 (42), pp. 94–97 (in Russian).
7. Vasil'ev A. A. Express method for determination of hydrogen index of water extract of cement stone (pH index). *EUROPEAN SCIENTIFIC CONFERENCE: sb. st. XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [EUROPEAN SCIENTIFIC CONFERENCE: collection of articles of the XVI International Scientific and Practical Conference]. Penza, Nauka i Prosveshchenie, 2019, pp. 52–57 (in Russian).
8. Yurkov V. M. Microclimate of livestock farms and complexes. Moscow, Rossel'khozizdat Publ., 1985. 223 p. (in Russian).
9. Keskyulla T. E., Mil'yan Ya. A., Novgorodskii V. I. Corrosion destruction of reinforced concrete structures of livestock buildings. *Beton i zhelezobeton*, 1980, no. 9, pp. 43–45 (in Russian).

Поступила 28.04.2026 г.