

Рисунок 3 – Зависимость  $h = f(t = 50 \text{ лет}, s, \text{Ц}_p)$  для бетонной смеси марки по удобоукладываемости Ж2

Использование зависимости (1) позволяет с достаточно высокой точностью определять глубину коррозионных повреждений стальной арматуры (S500) в карбонизированном бетоне, однако ее практическое применение не только не совсем удобно, для ее использования необходимо для каждого класса бетона по прочности на сжатие знать (рассчитать) значение  $\text{Ц}_p$ .

Для возможности использования зависимости (1) в нормативных документах без дополнительных (достаточно сложных) расчетов содержания цемента необходимо получить зависимость  $h = f(\text{Ц}_p, s, t_{\text{тр}})$  для различных классов бетона по прочности на сжатие с учетом особенностей получения (назначения) параметра  $\text{Ц}_p$ .

При использовании бетонов с отпускной прочностью 70–100 % необходимо пользоваться зависимостью  $\text{Ц}_p = f(R)$ , полученной на базе исследования значений  $\text{Ц}_p$  от граничных значений отпускной прочности, которая в общем виде имеет следующий вид:

$$\text{Ц}_p = k_1 R + k_2, \quad (2)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, аппроксимирующие линейную зависимость;  $k_1, \text{м}^3 \cdot \% / \text{кг}$ ;  $k_2, \text{кг} / \text{м}^3$ .

Зависимости  $\text{Ц}_p = f(R)$  для марок бетонных смесей по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость  $\text{Ц}_p = f(R)$  для бетонных смесей различных марок по удобоукладываемости

Класс бетона по прочности на сжатие	$\text{Ц}_p = f(R)$ для бетонной смеси марки по удобоукладываемости		
	П1	Ж1	Ж2
$C^{12}/_{15}$	$1,742R + 90,56$	$1,580R + 83,07$	$1,526R + 80,21$
$C^{16}/_{20}$	$2,295R + 114,1$	$2,045R + 107,5$	$1,970R + 104,1$
$C^{18}/_{22,5}$	$2,735R + 112,4$	$2,189R + 127,1$	$2,011R + 132,9$
$C^{20}/_{25}$	$3,249R + 105,7$	$2,729R + 111,7$	$2,533R + 115,4$
$C^{22}/_{27,5}$	$3,759R + 100,8$	$3,267R + 98,93$	$3,039R + 103,3$
$C^{25}/_{30}$	$3,915R + 120,7$	$3,504R + 107,8$	$3,300R + 108,2$
$C^{28}/_{35}$	$5,029R + 111,0$	$4,512R + 97,99$	$4,330R + 93,29$
$C^{30}/_{37}$	$5,362R + 112,7$	$4,822R + 99,24$	$4,633R + 94,77$
$C^{32}/_{40}$	$5,868R + 116,5$	$5,286R + 101,8$	$5,077R + 96,95$
$C^{35}/_{45}$	$6,727R + 119,4$	$6,046R + 104,9$	$5,797R + 99,99$
$C^{40}/_{50}$	$7,593R + 120,4$	$6,820R + 106,2$	$6,548R + 101,3$
$C^{45}/_{55}$	$8,421R + 121,9$	$7,577R + 107,0$	$7,273R + 102,0$
$C^{50}/_{60}$	$9,254R + 123,1$	$8,329R + 107,7$	$8,003R + 102,8$

Так как массово применяются железобетонные изделия, выполненные из бетонов с отпускной прочностью 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 см (Ж1) и 15 см (Ж2) (таблица 2).

Таблица 2 – Значения  $\text{Ц}_p$  для различных классов бетона по прочности на сжатие

Класс бетона по прочности на сжатие	$\text{Ц}_p, \text{кг} / \text{м}^3$ , 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
$C^{35}/_{45}$	592	528	506
$C^{40}/_{50}$	654	584	560
$C^{45}/_{55}$	714	637	611
$C^{50}/_{60}$	774	691	663

Используя значения  $\text{Ц}_p$  (см. таблицу 1) и зависимость (1) для бетонов классов по прочности на сжатие  $C^{12}/_{15} - C^{50}/_{60}$  для граничных значений  $s = 10 \dots 25$  мм с шагом 1 мм рассчитаны значения  $h$ .

По полученным значениям, с учетом математической обработки, получены зависимости  $h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{тр}}, s)$  для толщин защитного слоя бетона 5–50 мм, что наиболее приемлемо как для эксплуатируемых, так и для проектируемых железобетонных изделий.

В общем виде зависимость  $h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{тр}}, s)$  будет представлена как

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

где  $k_1 - k_5$  – коэффициенты, аппроксимирующие полиномиальную кривую 4-й степени;  $k_1, \text{мм} / \text{мм}^4$ ;  $k_2, \text{мм} / \text{мм}^3$ ;  $k_3, \text{мм} / \text{мм}^2$ ;  $k_4, \text{мм} / \text{мм}$ ;  $k_5, \text{мм}$ .

Зависимости  $h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{тр}}, s)$  для бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 представлены соответственно в таблицах 3–5.

Таблица 3 – Зависимость  $h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{тр}}, s)$  для бетонной смеси марки по удобоукладываемости П1

Класс бетона по прочности на сжатие	$h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{тр}}, s)$	$R^2$
$C^{12}/_{15}$	$h = 5 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 69 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0355s^2 - 0,8044s + 7,0129$	0,9983
$C^{16}/_{20}$	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 60 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0308s^2 - 0,6948s + 5,8736$	0,9989
$C^{18}/_{22,5}$	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 57 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0292s^2 - 0,6515s + 5,4077$	0,9990
$C^{20}/_{25}$	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 55 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0278s^2 - 0,6126s + 4,9945$	0,9989
$C^{22}/_{27,5}$	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 52 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0264s^2 - 0,5744s + 4,5993$	0,9988
$C^{25}/_{30}$	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 50 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0248s^2 - 0,5342s + 4,1979$	0,9985
$C^{28}/_{35}$	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 44 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0218s^2 - 0,4567s + 3,4674$	0,9975
$C^{30}/_{37}$	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 42 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0207s^2 - 0,4301s + 3,2285$	0,9970
$C^{32}/_{40}$	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 39 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0190s^2 - 0,3906s + 2,8850$	0,9961
$C^{35}/_{45}$	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 35 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0164s^2 - 0,3324s + 2,3992$	0,9941
$C^{40}/_{50}$	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 30 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0142s^2 - 0,2819s + 1,9954$	0,9916
$C^{45}/_{55}$	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 26 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0122s^2 - 0,2392s + 1,6657$	0,9889
$C^{50}/_{60}$	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 22 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0104s^2 - 0,2022s + 1,3879$	0,9855

Таблица 4 – Зависимость  $h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{гр}}, s)$  для бетонной смеси марки по удобоукладываемости Ж1

Класс бетона по прочности на сжатие	$h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{гр}}, s)$	R <sup>2</sup>
C <sup>12</sup> /15	$h = 5 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 73 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0374s^2 - 0,7455s + 7,4086$	0,9980
C <sup>16</sup> /20	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 63 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0323s^2 - 0,7313s + 6,2636$	0,9988
C <sup>18</sup> /22,5	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 59 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0306s^2 - 0,6888s + 5,8089$	0,9989
C <sup>20</sup> /25	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 57 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0292s^2 - 0,6501s + 5,3929$	0,9990
C <sup>22</sup> /27,5	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 55 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0279s^2 - 0,6152s + 5,0219$	0,9989
C <sup>25</sup> /30	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 53 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0267s^2 - 0,5831s + 4,6888$	0,9988
C <sup>28</sup> /35	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 48 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0239s^2 - 0,5095s + 3,9590$	0,9982
C <sup>30</sup> /37	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 46 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0229s^2 - 0,4844s + 3,7218$	0,9979
C <sup>32</sup> /40	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 44 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0213s^2 - 0,4449s + 3,3604$	0,9973
C <sup>35</sup> /45	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 39 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0188s^2 - 0,3867s + 2,8517$	0,9960
C <sup>40</sup> /50	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 35 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0166s^2 - 0,3350s + 2,4205$	0,9942
C <sup>45</sup> /55	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 31 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0145s^2 - 0,2904s + 2,062$	0,9921
C <sup>50</sup> /60	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 27 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0127s^2 - 0,2507s + 1,7535$	0,9896

Таблица 5 – Зависимость  $h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{гр}}, s)$  для бетонной смеси марки по удобоукладываемости Ж2

Класс бетона по прочности на сжатие	$h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{гр}}, s)$	R <sup>2</sup>
C <sup>12</sup> /15	$h = 5 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 75 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0384s^2 - 0,8658s + 7,5973$	0,9978
C <sup>16</sup> /20	$h = 5 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 64 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0331s^2 - 0,7502s + 6,4624$	0,9987
C <sup>18</sup> /22,5	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 61 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0312s^2 - 0,7056s + 5,9890$	0,9989
C <sup>20</sup> /25	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 58 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0298s^2 - 0,6684s + 5,5889$	0,9990
C <sup>22</sup> /27,5	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 56 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0285s^2 - 0,6338s + 5,2183$	0,9989
C <sup>25</sup> /30	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 54 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0274s^2 - 0,6035s + 4,8995$	0,9989
C <sup>28</sup> /35	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 50 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0248s^2 - 0,5342s + 4,1979$	0,9985
C <sup>30</sup> /37	$h = 4 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 48 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0238s^2 - 0,5083s + 3,9480$	0,9982
C <sup>32</sup> /40	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 46 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0224s^2 - 0,4710s + 3,5977$	0,9977
C <sup>35</sup> /45	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 41 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0199s^2 - 0,4126s + 3,0746$	0,9966
C <sup>40</sup> /50	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 37 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0177s^2 - 0,3611s + 2,6358$	0,9952
C <sup>45</sup> /55	$h = 3 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 33 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0157s^2 - 0,3162s + 2,2681$	0,9934
C <sup>50</sup> /60	$h = 2 \cdot 10^6 \cdot s^4 - 29 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 0,0138s^2 - 0,2751s + 1,9423$	0,9912

В графическом виде зависимости  $h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{гр}}, s)$  для класса бетона по прочности на сжатие C<sup>20</sup>/25 и бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 приведена на рисунке 4.

**Заключение.** Полученные зависимости  $h = f(\text{Ц}_p, t_{\text{гр}}, s)$  позволяют прогнозировать с достаточно высокой точностью глубину коррозии стальной арматуры в карбонизированном бетоне. Их использование в НД значительно повысит объективность оценки долговеч-

ности и остаточного ресурса железобетонных изделий, эксплуатирующихся в условиях открытой атмосферы.

Кроме того, приведенный алгоритм дает возможность прогнозировать коррозию стальной арматуры для любых сроков эксплуатации железобетона.

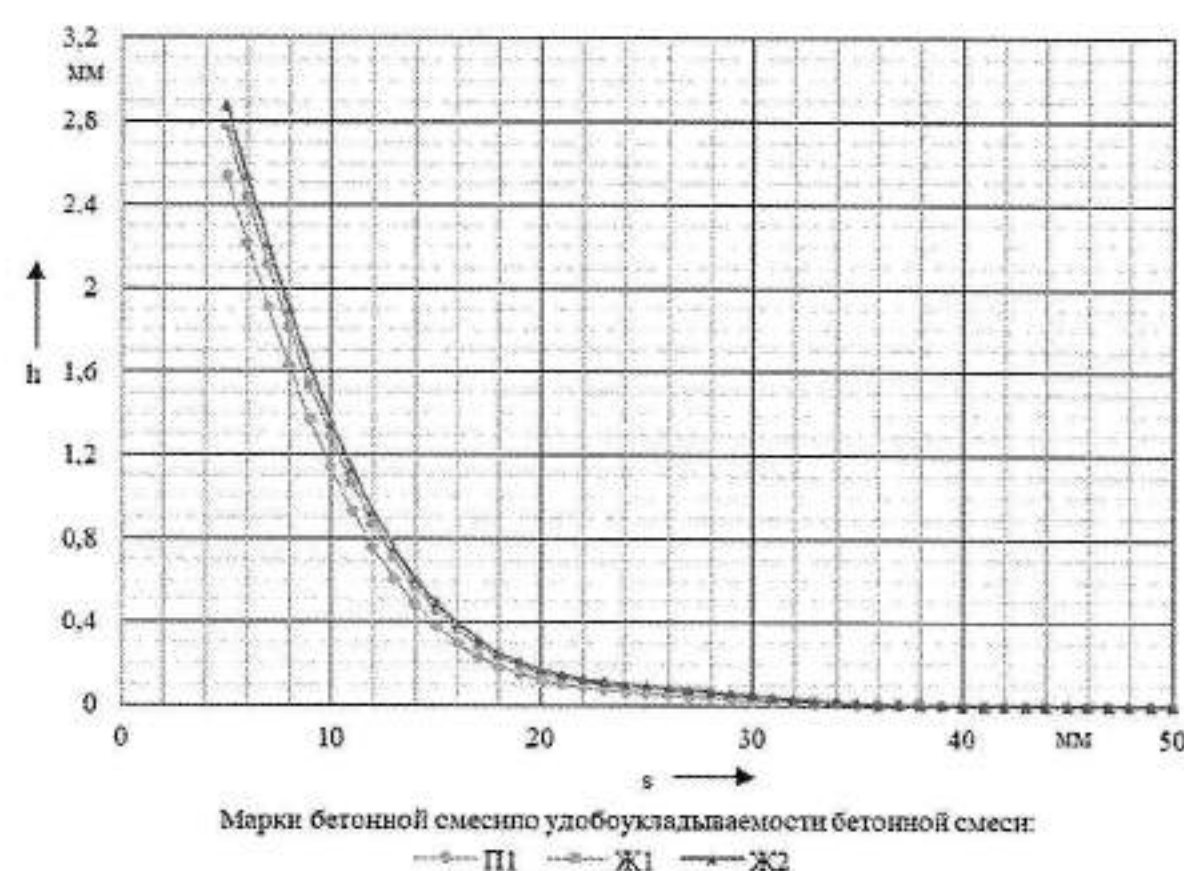


Рисунок 4 – Зависимость  $h = f(t = 50 \text{ лет}, s, \text{Ц}_p)$  для класса бетона по прочности на сжатие C<sup>20</sup>/25

#### Список литературы

- 1 Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : монография / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
- 2 Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : монография / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 303 с.
- 3 Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : монография / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.
- 4 Васильев, А. А. Оценка существующей модели карбонизации бетона / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2009. – № 1 (22). – С. 54–58.
- 5 Васильев, А. А. Прогнозирование фактической карбонизации с учетом технологических параметров бетона : монография / А. А. Васильев, А. М. Нияковский. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 206 с.
- 6 Васильев, А. А. К вопросу необходимости учета карбонизации бетона в нормативных документах Республики Беларусь по оценке технического состояния железобетонных элементов и конструкций / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 87–88.
- 7 Васильев, А. А. Прогнозирование степени коррозионных повреждений стальной арматуры от расчетного содержания цемента для эксплуатационных условий открытой атмосферы / А. А. Васильев, М. И. Ткачева, С. В. Хрищанович // Лучшая научно-исследовательская работа 2025 : сб. статей VII Междунар. науч.-исслед. конф. – Пенза : Наука и Просвещение, 2025. – С. 45–50.

Получено 05.05.2025

**A. A. Vasilyev, M. I. Tkacheva, K. A. Ageeva, A. V. Savelyeva.** Prediction of steel reinforcement corrosion damage depth for concretes of different compressive strength classes in open atmosphere.

The significance of assessment and prediction of the degree of corrosion damage of steel reinforcement in reinforced concrete products is shown. The relationships between the depth of corrosion of steel reinforcement in an open atmosphere and the calculated cement content for different thicknesses of the protective layer of concrete of concrete mixtures of grades by the workability of П1, Ж1 and Ж2 are given in graphic form. For the possibility of use in НД, mathematical dependencies of the depth of corrosion of steel reinforcement from the calculated content of cement for different thicknesses of the protective layer of concretes of compression strength classes of C<sup>12</sup>/15–C<sup>50</sup>/60 operating in an open atmosphere (concrete mixtures of grades П1, Ж1 and Ж2) were obtained. The obtained relationships for concrete of compression strength class C<sup>20</sup>/25 are given in graphical form.