

УДК 624.011/014

**РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА ДЛЯ  
НЕАГРЕССИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СРЕДЫ**

**РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ КАРБОНІЗАЦІЇ БЕТОНУ  
ДЛЯ НЕАГРЕСИВНОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА**

**REGRESSION MODELS CARBONIZATION CONCRETE  
FOR NON-PRODUCTION ENVIRONMENTS**

**Васильев А. А., к.т.н., доц.** (УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель, Республика Беларусь)

**Васильев А. А., к.т.н., доц.** (УО «Білоруський державний університет транспорту», м Гомель)

**Vasilyev A. A., candidate of technical sciences, associate professor** (Belarusian State University of Transport, Republic of Belarus, Gomel)

На основании исследования карбонизации по сечению бетонов различных классов по прочности сразу после изготовления и в зоне расположения стальной арматуры железобетонных элементов (ЖБЭ), эксплуатировавшихся длительные сроки в условиях жилых и общественных зданий, предложены регрессионные модели карбонизации для неагрессивной эксплуатационной среды.

На підставі дослідження карбонізації по перетину бетонів різних класів по міцності відразу після виготовлення і в зоні розташування сталеві арматури залізобетонних елементів (ЗБЕ), експлуатувавшихся тривалі терміни в умовах житлових і громадських будівель, запропоновані регресивні моделі карбонізації для неагресивного експлуатаційного середовища.

On the basis of investigation of different strength class concrete carbonation at cross section right after fabrication and in the area of reinforced concrete elements (RCE) steel reinforcement location which were exploited for a long time in the conditions of residential and civil buildings there were offered regression carbonation models for nonaggressive environment.

**Ключові слова:**

Карбонизация, бетон, модель.

Карбонізація, бетон, модель.

Carbonation, concrete, model.

**Постановка задачи.** Полученные в результате исследования развития карбонизации бетона в условиях агрессивной среды регрессионные

зависимости [1] разработаны для усредненных значений толщин защитного слоя бетона и но-сят общий характер: не учитывают начальной карбонизации, прочность бетона на сжатие, а также различные факторы, в значительной степени определяющие скорость и степень карбонизации, что не позволяет с необходимой и достаточной точностью прогнозировать развитие карбонизации бетона.

Целью данной работы явилось построение модели развития карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности для неагрессивных условий эксплуатации (жилых и общественных зданий).

**Объекты и методы исследования.** Объектами исследования служили железобетонные элементы (ЖБЭ) различных типов, эксплуатировавшиеся длительные сроки в условиях жилых и общественных зданий, свежизготовленные бетонные кубики сечением 100×100×100 мм.

Для анализа из ЖБЭ отбирали образцы бетона в зоне расположения стальной арматуры, а также, порошки, получаемые выбуриванием по сечению бетона до глубины 100 мм. Аналогично выбуриванием до глубины 50 мм получали образцы из бетонных кубиков. Исследовали цементно-песчаную фракцию бетона. Карбонатную составляющую (показатель КС) определяли объемно-газовым методом [2, 3]. Статистическую обработку экспериментальных данных производили при помощи табличного процессора «Excel».

**Результаты исследований. Исследование начальной карбонизации бетона.** Для определения начальные параметры карбонизации, исследовали кубики сечением 100×100×100 мм, выполненные в заводских условиях из бетонов основных классов по прочности  $C^{16}/_{20}$ ,  $C^{18}/_{22,5}$ ,  $C^{20}/_{25}$ ,  $C^{25}/_{30}$  различных составов. После изготовления кубики подвергали тепловлажностной обработке (ТВО) по стандартному режиму. Составы бетона приведены в таблице 1.

Таблица 1

Составы образцов бетона

| Класс бетона по прочности на сжатие | В/Ц  | Состав смеси, кг/м <sup>3</sup> |      |      |      |             |
|-------------------------------------|------|---------------------------------|------|------|------|-------------|
|                                     |      | Ц                               | П    | Щ    | В    | С-3, κ=10 % |
| $C^{16}/_{20}$                      | 321  | 758                             | 1197 | 125  | 3,90 | 321         |
|                                     | 361  | 733                             | 1139 | 147  | 4,30 | 361         |
| $C^{18}/_{22,5}$                    | 0,35 | 355                             | 733  | 1203 | 124  | 4,30        |
|                                     | 0,38 | 406                             | 699  | 1111 | 156  | 4,90        |
| $C^{20}/_{25}$                      | 0,45 | 383                             | 710  | 1196 | 127  | 4,60        |
|                                     | 0,35 | 450                             | 664  | 1099 | 160  | 5,40        |
| $C^{25}/_{30}$                      | 0,32 | 420                             | 620  | 1270 | 135  | 5,25        |
|                                     | 0,28 | 469                             | 651  | 1168 | 132  | 5,60        |

*Примечания:* 1 В/Ц – водоцементное отношение.  
2 Ц, П, Щ, В, С-3 – массы цемента, песка, щебня, воды, добавки, кг, принятые по данным заводской лаборатории без учета влажности заполнителей

Для различных составов бетона по прочности на один класс бетона получены зависимости одного характера с близкими, но не одинаковыми значениями  $КС_0$ . Для дальнейшего анализа усредняем значения  $КС_0$  для

каждого класса бетона по прочности. Полученные зависимости  $l$ – $KC_0$  представлены на рисунке 1.

Для построения математической модели при подборе уравнения зависимости  $KC(l)$  наилучшие результаты (хорошее сглаживание точек, большой  $R^2$ , соответствие здравому смыслу и заданным выше требованиям) дали пятипараметрические уравнения вида

$$KC_0(l) = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot l) / (\alpha_3 + \alpha_4 \cdot l^3); \quad (1)$$

$$KC_0(l) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \exp(-((l - \beta_2) / \beta_3)^{\beta_4}), \quad (2)$$

где параметры  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  ( $i=0, 1, \dots, 4$ ) определяются методом наименьших квадратов, известным в математической статистике и реализованным, например, в пакетах Statgraphics или MathCAD.

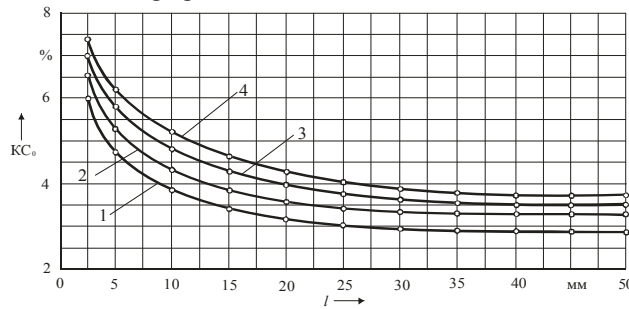


Рис. 1 Распределение показателя  $KC$  по сечению образцов бетона сразу после ТВО для классов бетона по прочности: 1 –  $C^{16}/_{20}$ , 2 –  $C^{18}/_{22,5}$ , 3 –  $C^{20}/_{25}$ , 4 –  $C^{25}/_{30}$

Достоинством уравнения (1) является возможность аналитического определения параметров  $\beta_i$  методом наименьших квадратов, а уравнения (2) – бо-льшее, как правило, по сравнению с уравнением (1), значение  $R^2$ ; функция удовлетворяет предъявляемым требованиям на всем множестве значений параметров; наличие конкретного физического смысла ее параметров  $\beta_i$ .

При разработке модели карбонизации принимали, что после глубины 50 мм скорость развития карбонизации постоянна для любого класса бетона по прочности. За граничное значение  $l_{(\infty)}$  принимали  $l=100$  мм.

Регрессионная зависимость изменения показателя  $KC_0$  по сечению для свежеизготовленных бетонов (после ТВО) в общем виде

$$KC_0(l/t=0) = \beta_0 + \beta_1 e^{\left( - \left( \frac{l - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} \right)}, \quad (3)$$

где  $\beta_0$  – коэффициент, определяющий наименьшее значение  $KC(l)$  [обычно,  $\beta_0 = KC(l > 100$  мм)];

$\beta_1$  – коэффициент, определяющий разность минимального и максимального значений  $KC(l)$ ,

- $\beta_2$  – коэффициент, определяющий минимальное значение глубины  $l$  (обычно,  $\beta_2 = 0$ ),
- $\beta_3$  – коэффициент, определяющий форму кривой и координаты точек перегиба,  $\beta_3 > 0$ ;
- $\beta_4$  – коэффициент, определяющий форму кривой и координаты точек перегиба,  $\beta_4 > 0$ .

Параметры  $\beta_i$  ( $i = 0, 1, \dots, 4$ ) нелинейной функции (3) определялись численно на ЭВМ методом наименьших квадратов [4].

Полученные регрессионные зависимости изменения показателя  $KC_0$  по сечению для свежизготовленных бетонов (после ТВО) приведены в таблице 2. Таблица 2 Регрессионные зависимости карбонизации по сечению различных классов бетона по прочности сразу после ТВО

| Класс бетона по прочности на сжатие | Регрессионная зависимость   |
|-------------------------------------|---|
| $C^{12}/_{15}$                      | $KC_0(l/t = 0) = 2,42 + 4,79e^{\left(-\left(\frac{l-1,0}{3,5}\right)^{0,65}\right)}$  |
| $C^{16}/_{20}$                      | $KC_0(l/t = 0) = 2,86 + 10,0e^{\left(-\left(\frac{l+2,0}{3,0}\right)^{0,60}\right)}$  |
| $C^{18}/_{22,5}$                    | $KC_0(l/t = 0) = 3,31 + 13,5e^{\left(-\left(\frac{l+3,0}{2,75}\right)^{0,60}\right)}$ |
| $C^{20}/_{25}$                      | $KC_0(l/t = 0) = 3,47 + 16,5e^{\left(-\left(\frac{l+4,0}{2,6}\right)^{0,55}\right)}$  |
| $C^{25}/_{30}$                      | $KC_0(l/t = 0) = 3,60 + 20,1e^{\left(-\left(\frac{l+4,1}{2,3}\right)^{0,51}\right)}$  |
| $C^{30}/_{37}$                      | $KC_0(l/t = 0) = 3,87 + 24,0e^{\left(-\left(\frac{l+4,7}{2,1}\right)^{0,5}\right)}$   |

Для уточнения скорости карбонизации исследовали зоны с обычной и ускоренной карбонизацией.

Суммарная регрессионная зависимость  $\sqrt{t} - KC$  для различных классов бетона по прочности для области ускоренной карбонизации приведена на рисунке 2, области обычной карбонизации – на рисунке 3.

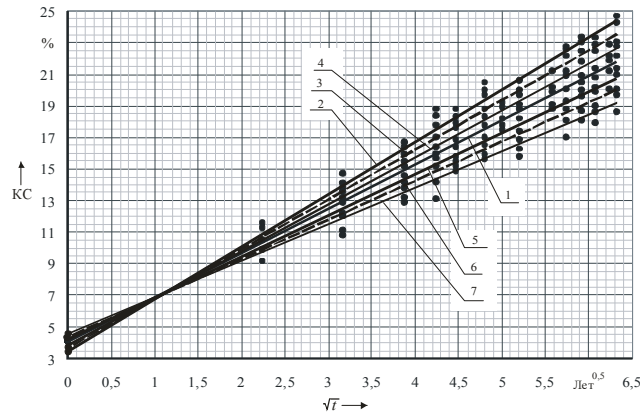


Рис. 2 – Регрессионная зависимость  $\sqrt{t} - КС$  для условий общественных зданий и области ускоренной карбонизации:  
 1– Общая для области ускоренной карбонизации; 2 – бетон класса  $C^{16}/_{20}$ ; 3 – усредненная для бетонов классов по прочности  $C^{16}/_{20}$  и  $C^{18}/_{22,5}$ ; 4 – бетон класса  $C^{18}/_{22,5}$ ; 5 – бетон класса  $C^{20}/_{25}$ ; 6 – средняя для бетонов классов по прочности  $C^{20}/_{25}$  и  $C^{25}/_{30}$ ; 7 – бетон класса  $C^{25}/_{30}$

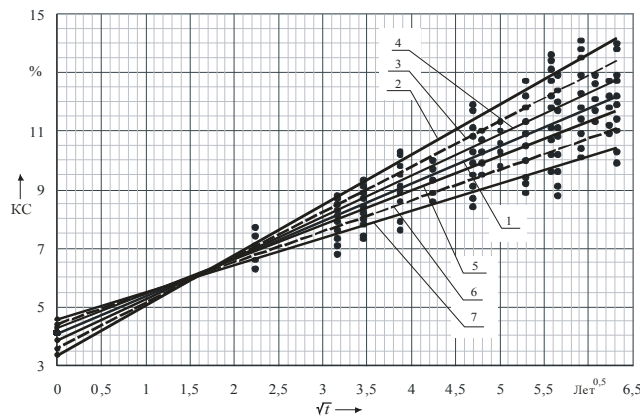


Рис. 3 – Регрессионная зависимость  $\sqrt{t} - КС$  для условий общественных зданий и области обычной карбонизации:  
 1– Общая для области повышенной карбонизации; 2 – бетон класса  $C^{16}/_{20}$ ; 3 – средняя для бетонов классов по прочности  $C^{16}/_{20}$  и  $C^{18}/_{22,5}$ ; 4 – бетон класса  $C^{18}/_{22,5}$ ; 5 – бетон класса  $C^{20}/_{25}$ ; 3 – средняя для бетонов классов по прочности  $C^{20}/_{25}$  и  $C^{25}/_{30}$ ; 4 – бетон класса  $C^{25}/_{30}$

Регрессионная зависимость изменения показателя КС в зоне расположения арматуры для постоянного значения толщины защитного слоя

$$КС(t/l = \text{const}) = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t}, \quad (4)$$

где  $\alpha_0$  – показатель начальной карбонизации, %;  
 $\alpha_1$  – показатель скорости карбонизации;  
 $t$  – величина прогнозного периода, лет;

Параметры  $\alpha_i$  ( $i = 0, 1$ ) линейной функции регрессии (4) определяли по экспериментальным данным методом наименьших квадратов.

Регрессионные зависимости развития карбонизации в условиях различной агрессивности воздушных сред (таблица 3).

Таблица 3

Регрессионные зависимости изменения показателя КС в защитном слое бетона

| Класс бетона по прочности на сжатие | Область ускоренной карбонизации          | Область обычной карбонизации             |
|-------------------------------------|--|--|
| $C^{16}/_{20}$                      | $КС_{\text{прог}} = 3,48 + 3,30\sqrt{t}$ | $КС_{\text{прог}} = 3,45 + 1,68\sqrt{t}$ |
| $C^{18}/_{22,5}$                    | $КС_{\text{прог}} = 3,82 + 2,99\sqrt{t}$ | $КС_{\text{прог}} = 3,80 + 1,42\sqrt{t}$ |
| $C^{20}/_{25}$                      | $КС_{\text{прог}} = 4,25 + 2,62\sqrt{t}$ | $КС_{\text{прог}} = 4,25 + 1,17\sqrt{t}$ |
| $C^{25}/_{30}$                      | $КС_{\text{прог}} = 4,55 + 2,34\sqrt{t}$ | $КС_{\text{прог}} = 4,59 + 0,90\sqrt{t}$ |

Полученные регрессионные зависимости показывают, что скорость карбонизации независимо от степени агрессивности эксплуатационной среды зависит от класса бетона по прочности (количества использованного цемента).

В результате объединения двух предложенных моделей получена общая расчетно-экспериментальная модель карбонизации во времени по сечению бетона  $КС(t, l)$

$$КС(t, l) = \beta_0 + (\alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t} - \beta_0) e^{\left( \left( \frac{15 - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} - \left( \frac{1 - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} \right)}, \quad (5)$$

где  $l$  – исследуемая толщина защитного слоя бетона, мм.

Полученные на основании выполненных исследований и расчетов регрессионные модели карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности для воздушных сред жилых и общественных зданий представлены в таблице 4.

В качестве примера на рисунке 4 приведены графические регрессионные модели карбонизации для бетона класса по прочности  $C^{25}/_{30}$  для различных степеней агрессивности эксплуатационной среды жилых и общественных зданий.

Таблица 4

Регрессионные модели карбонизации различных классов бетона по прочности для условий различной агрессивности среды

| Класс бетона по прочности на сжатие | Область | ускоренной карбонизации  |
|-------------------------------------|---------|--|
|                                     |         | обычной карбонизации   |
| $C^{16}/_{20}$                      |         | $KC(l,t) = 2,86 + (0,62 + 3,30\sqrt{t})e^{\left(2,83 - \left(\frac{l+2,0}{3,0}\right)^{0,6}\right)}$   |
|                                     |         | $KC(l,t) = 2,86 + (0,59 + 1,68\sqrt{t})e^{\left(2,83 - \left(\frac{l+2,0}{3,0}\right)^{0,6}\right)}$   |
| $C^{18}/_{22,5}$                    |         | $KC(l,t) = 3,31 + (0,51 + 2,99\sqrt{t})e^{\left(3,09 - \left(\frac{l+3,0}{2,75}\right)^{0,6}\right)}$  |
|                                     |         | $KC(l,t) = 3,31 + (0,49 + 1,42\sqrt{t})e^{\left(3,09 - \left(\frac{l+3,0}{2,75}\right)^{0,6}\right)}$  |
| $C^{20}/_{25}$                      |         | $KC(l,t) = 3,47 + (0,86 + 2,62\sqrt{t})e^{\left(2,99 - \left(\frac{l+4,0}{2,60}\right)^{0,55}\right)}$ |
|                                     |         | $KC(l,t) = 3,47 + (0,78 + 1,17\sqrt{t})e^{\left(2,99 - \left(\frac{l+4,0}{2,60}\right)^{0,55}\right)}$ |
| $C^{25}/_{30}$                      |         | $KC(l,t) = 3,6 + (0,95 + 2,34\sqrt{t})e^{\left(2,88 - \left(\frac{l+4,1}{2,3}\right)^{0,51}\right)}$   |
|                                     |         | $KC(l,t) = 3,6 + (0,99 + 0,90\sqrt{t})e^{\left(2,88 - \left(\frac{l+4,1}{2,3}\right)^{0,51}\right)}$   |

Приведенные модели показывают развитие карбонизации с момента изготовления бетона до возраста 100 лет по сечению бетона до глубины 100 мм. Они построены для дискретных значений возраста бетона. Для получения величин карбонатной составляющей промежуточных значений возраста бетона необходимо интерполировать значения двух ближайших кривых к искомому возрасту.

В предлагаемых моделях максимальную величину карбонизации  $KC_{\max}$  определяли с учетом предельной величины карбонизации (ПВК) бетона и изменения степени гидратации цемента ( $\alpha$ ) во времени.

Значения ПВК рассчитывали в соответствии с [2] для каждого класса бетона по прочности по известному составу. Степень гидратации цемента и ее изменение во времени определяли по зависимостям, полученным профессором В.В. Бабицким [5].

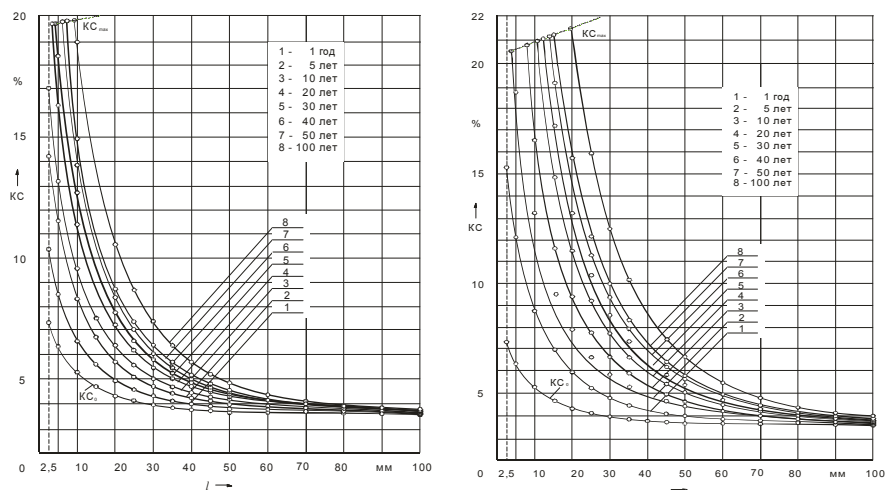


Рис. 4. Регрессионная модель карбонизации во времени по сечению бетона класса по прочности  $C^{25}/_{30}$  для областей обычной и ускоренной карбонизации

**Выводы.** 1. По результатам многолетних исследований развития карбонизации во времени по сечению реально эксплуатируемых ЖБЭ, а также образцов бетона сразу после изготовления с применением ТВО получены регрессионные расчетно-экспериментальные модели развития карбонизации во времени по сечению бетонов классов по прочности  $C^{16}/_{20}$  –  $C^{25}/_{30}$  для различных степеней агрессивности воздушных сред жилых и общественных зданий.

2. Полученные модели показывают, что независимо от степени агрессивности воздушной среды, с повышением прочности на сжатие бетона скорость карбонизации снижается.

3. Предлагаемые модели достаточно хорошо коррелируют с результатами исследования карбонизации по сечению ЖБЭ, эксплуатируемых длительные сроки в условиях жилых и общественных зданий.

1. Неразрушающие методы оценки и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах : практ. пособие / Т. М. Пецольд [и др.] ; под. ред. А. А. Васильева. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 146 с. 2. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с. 3. Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 304 с. 4. Герасимович, А. И. Математическая статистика / А. И. Герасимович. – Минск : Выш. шк., 1983. – 275 с. 5. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона : дис. д-ра техн. наук : 05.23.05 / В. В. Бабицкий ; БНТУ. – Минск, 2005. – 540 с.