

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА КЛАССА ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ $C^{18}/_{22,5}$

А. А. ВАСИЛЬЕВ, Ю. К. КАБЫШЕВА

Белорусский государственный университет транспорта

### Введение.

Многолетние исследования карбонизации бетона [2; 3; 5; 8 и др.] показывают, что существующие методики ее оценки и прогнозирования (основанные на фенолфталеиновом тесте) не позволяют ни оценивать, ни тем более прогнозировать карбонизацию по сечению бетона и ее влияние на изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, таким образом, оценивать и прогнозировать техническое состояние железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), определяющих долговечность и остаточный ресурс подавляющего большинства эксплуатируемых (проектируемых) зданий и сооружений.

### Постановка задачи.

Исследование карбонизации бетона необходимо выполнять на основе определения карбонатной составляющей (показателя КС), что не только логично, но и подтверждено результатами многолетних исследований [1; 4]. Поскольку основным фактором, определяющим скорость и интенсивность карбонизации бетона, является количество использованного цемента, целесообразно расчетно-экспериментальные зависимости прогнозирования карбонизации во времени по сечению бетона получать, в первую очередь, на основе исследования и получения зависимостей изменения показателя КС от изменения расхода цемента (показателя Ц).

### Основная часть.

На результатам исследования по сечению образцов бетона классов по прочности на сжатие  $C^{12}/_{15}-C^{30}/_{37}$  – кубов  $100 \times 100 \times 100$  мм, изготовленных из составов марок по удобоукладываемости П1 (ОК = 1 и 4 см) с применением ТВО методами регрессионного и корреляционного анализа была получена зависимость начальной карбонизации [5].

Составы бетона образцов и для исследований, определялись с использованием вычислительного комплекса «Технолог», разработанного проф. В. В. Бабицким.

Карбонатная составляющая (показатель КС) определялся при помощи разработанного в НИЛ «Диагностика, испытание и исследование строительных материалов и конструкций» им. профессора И. А. Кудрявцева Белорусского Государственного университета транспорта, на основании многолетних исследований реакции и «механизма» карбонизации бетона и ее влияния на изменение коррозионных (защитных) свойств бетона экспресс-метода определения карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона [7].

Регрессионная зависимость изменения показателя  $КС_0$  (начальной карбонизации) по сечению бетона:

$$КС_0(l/t=0) = \beta_0 + \beta_1 e^{\left( - \left( \frac{l - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} \right)}, \quad (1)$$

где  $\beta_0 - \beta_4$  – коэффициенты, определяющие:  $\beta_0$  – наименьшее значение  $КС(l)$ , % [обычно,  $\beta_0 = КС(l > 100 \text{ мм})$ ];  $\beta_1$  – разность минимального и максимального значений  $КС(l)$ , %;  $\beta_2$  – минимальное значение глубины  $l$ , мм, (обычно,  $\beta_2 = 0$ );  $\beta_3$  – форму кривой и координаты точек перегиба, мм,  $\beta_3 > 0$ ;  $\beta_4$  – форму кривой и координаты точек перегиба, д. ед.,  $\beta_4 > 0$ ;  $l$  – расчетное значение глубины бетона, мм.

На основе многолетних исследований карбонизации бетона по сечению железобетонных элементов (ЖБЭ), изготовленных из бетонов разных классов по прочности на сжатие, эксплуатирующихся различные длительные сроки в разных атмосферных условиях (сельскохозяйственных зданий (СХ), общественных зданий и производственных с неагрессивной эксплуатационной средой (ОПЗ) и открытой атмосферы (А) и зон с обычной (О) и ускоренной карбонизацией (У)), с учетом значений начальной карбонизации получена расчетно-экспериментальная зависимость карбонизации в зоне расположения стальной арматуры:

$$K C_B = \alpha_1 + \alpha_2 \sqrt{t}, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент, определяющий начальную карбонизацию, %;  $\alpha_2$  – коэффициент, определяющий развитие карбонизации во времени, %/лет<sup>1/2</sup>.

Объединяя выражения (1) и (2) в [5] получена эвристическая модель изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетона

$$K C(t, l) = \beta_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 \sqrt{t} - \beta_0) e^{\left( \left( \frac{15 - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} - \left( \frac{l - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} \right)}. \quad (3)$$

После преобразований, с учетом значений коэффициентов  $\beta_0$ – $\beta_4$ , на основании выражения (3) принята расчетно-экспериментальная зависимость развития карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие для разных типов эксплуатационных условий:

$$K C(l, t) = \gamma_1 + (\gamma_2 + \gamma_3 \sqrt{t}) e^{\left( 14,2 - \left( \frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)}, \quad (4)$$

где  $\gamma_1$ – $\gamma_3$  – коэффициенты;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , %;  $\gamma_3$ , %/лет<sup>1/2</sup>.

Путем математической обработки коэффициентов  $\beta_0$  и  $\beta_1$  получены зависимости их значений от количества использованного цемента для смесей марок по удобоукладываемости П и Ж:

$$\beta_0 = 0,0077Ц + 0,7932; \quad (5)$$

$$\beta_1 = 1769Ц + 409077. \quad (6)$$

Значения коэффициентов  $\beta_2$ – $\beta_4$  приняты постоянными для различных составов бетона [5].

Значения коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  для различных эксплуатационных условий приведены в табл. 1.

В качестве объекта исследований, рассмотрим прогнозирование карбонизации во времени по сечению бетона класса по прочности  $C^{18}/_{22,5}$  для эксплуатационных условий сельскохозяйственных зданий, поскольку они являются самыми «жесткими» (концентрация  $CO_2$  достигает 1 и более %, относительная влажность – до 100 %, периодическое замораживание-оттаивание бетона одних элементов и постоянное нахождение в условиях положительной температуры и значительной относительной влажности других [4]). Выбран бетон класса по прочности на сжатие  $C^{18}/_{22,5}$  (М300), поскольку он массово применялся при изготовлении ЖБЭ сельскохозяйственного назначения (колонн (серия 1.823.1-2); балок (серия 1.862-2); многопустотных плит (серия 1.141-1).

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  для различных эксплуатационных условий

Условия эксплуатации	$\alpha_1$	$\alpha_2$
СХ О	$\alpha_1 = 0,0088Ц + 1,063$	$\alpha_2 = - 0,0008Ц + 0,7932$
СХ У	$\alpha_1 = 0,0088Ц + 1,058$	$\alpha_2 = - 0,0010Ц + 1,364$
ОПЗ О	$\alpha_1 = 0,0088Ц + 1,058$	$\alpha_2 = - 0,0010Ц + 0,5240$
ОПЗ У	$\alpha_1 = 0,0089Ц + 1,023$	$\alpha_2 = - 0,0012Ц + 1,138$
А О	$\alpha_1 = 0,0089Ц + 1,034$	$\alpha_2 = - 0,0009Ц + 0,8730$
А У	$\alpha_1 = 0,0088Ц + 1,065$	$\alpha_2 = - 0,0011Ц + 1,199$

Поскольку для бетона любого класса по прочности на сжатие, для смесей марок по удобоукладываемости П1...П5 существует 25 бездобавочных составов ( $OK = 1...25$  см) на одно значение отпускной прочности, смесей марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4 ( $5...40$  с) 35 составов, у которых значения количества использованного цемента для составов марок по удобоукладываемости П1...П5 отличаются до 35 %, марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4 – до 18 % [6], логично было бы в зависимостях (2) и (3) использовать средние значения количества цемента ( $C_{cp}$ ). Логично, но не корректно, поскольку для изготовления ЖБЭ и ЖБК используются составы не всех марок по подвижности. Базовые зависимости для средних значений показателя КС (для бездобавочных бетонов) для наиболее часто выпускаемых сборных железобетонных изделий целесообразно получить для подвижных смесей марки по удобоукладываемости П1, для жестких – Ж1 и Ж2. Причем, для марки П1, с учетом массовости применяемых составов с  $OK = 3$  (4) см, целесообразно принимать не среднее значение количества цемента, а соответствующее верхней границе ( $OK = 4$  см). Таким образом, для состава бетонной смеси марки по удобоукладываемости П1 расчетное содержание цемента принято  $C_{p, П1} = 305$  кг/м<sup>3</sup>; для состава бетонной смеси марки по удобоукладываемости Ж2 –  $C_{p, Ж2} = 268$  кг/м<sup>3</sup>.

Зависимость начальной карбонизации, для смесей:

– марки по удобоукладываемости П1

$$K C_0 = 3,14 + 948744 e^{\left( - \left( \frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)}; \quad (7)$$

– марки по удобоукладываемости Ж2

$$K C_0 = 2,86 + 883276 e^{\left( - \left( \frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)}. \quad (8)$$

Зависимость развития карбонизации во времени в зоне расположения стальной арматуры с учетом начальной карбонизации, для смесей:

– марки по удобоукладываемости П1

$$K C_B = 3,74 + 1,06 \sqrt{t}; \quad (9)$$

– марки по удобоукладываемости Ж2

$$K C_B = 3,42 + 1,10 \sqrt{t}. \quad (10)$$

Зависимость развития карбонизации во времени по сечению бетона для смесей:

– марки по удобоукладываемости П1

$$K C(C, l, t) = 3,14 + (0,600 + 1,06 \sqrt{t}) e^{\left( 14,2 - \left( \frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)}; \quad (11)$$

– марки по удобоукладываемости Ж2

$$K C(C, l, t) = 2,86 + (0,560 + 1,10 \sqrt{t}) e^{\left( 14,2 - \left( \frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)}. \quad (12)$$

Полученные зависимости позволяют прогнозировать развитие карбонизации цементно-песчаной фракции бетона класса по прочности на сжатие  $C^{18}/_{22,5}$  для основных типов ЖБЭ.

Оценку значимости полученных расчетно-экспериментальных зависимостей выполняли методами математической статистики в программе «Statgraphics».

При оценке адекватности регрессионных расчетно-экспериментальных зависимостей изменения во времени по сечению бетона показателя КС использовали следующие положения:

- соответствие характера предлагаемой зависимости, определяемой моделью  $КС(t, l)$ , полученным научным и экспериментальным представлениям о карбонизации;
- отличие экспериментальных данных (т. е. фактических значений  $КС_{ф}$ , полученных для целей проверки адекватности полученной зависимости) от предлагаемых значений  $КС_{прог}$  не более чем на 30 %, что соизмеримо с погрешностью измерения степени карбонизации фенолфталеиновым тестом (ФФТ);
- значение коэффициента детерминации, значимо отличающегося от нуля (в соответствии со статистическим критерием F-Фишера), свидетельствующего о том, что модель в значительной степени описывает реально существующую зависимость;
- наличие остатков (т. е. отклонений фактических ( $КС_{ф}$ ) и прогнозируемых ( $КС_{пр}$ ) значений) как взаимно независимых случайных величин;
- наличие остатков одинаково распределенных (по нормальному закону) случайных величин с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией.

Проверка остатков на «независимость» проводилась по критериям «серий», на «нормальность» – по критериям согласия  $\chi^2$ -Пирсона,  $\lambda$ -Колмогорова и Шапиро-Вилка, на «отсутствие систематической ошибки» – с использованием статистического критерия  $t$ -Стьюдента. Все проверки выполнялись для принятого в инженерной практике уровня значимости  $\alpha = 0,05$ .

Для каждой проверки адекватности предлагаемой зависимости подбирались по два реально эксплуатируемых ЖБЭ (колонны и плиты покрытия) с одинаковыми сроками эксплуатации и схожими эксплуатационными условиями.

В качестве примера на рис. приведены фактические значения показателя КС, полученные при исследовании бетона колонн (класса по прочности на сжатие  $C^{18}/_{22,5}$ ), эксплуатировавшихся в условиях повышенной карбонизации сельскохозяйственных помещений 10 и 30 лет, и прогнозные кривые. Аналогично исследовался бетон плит покрытия.

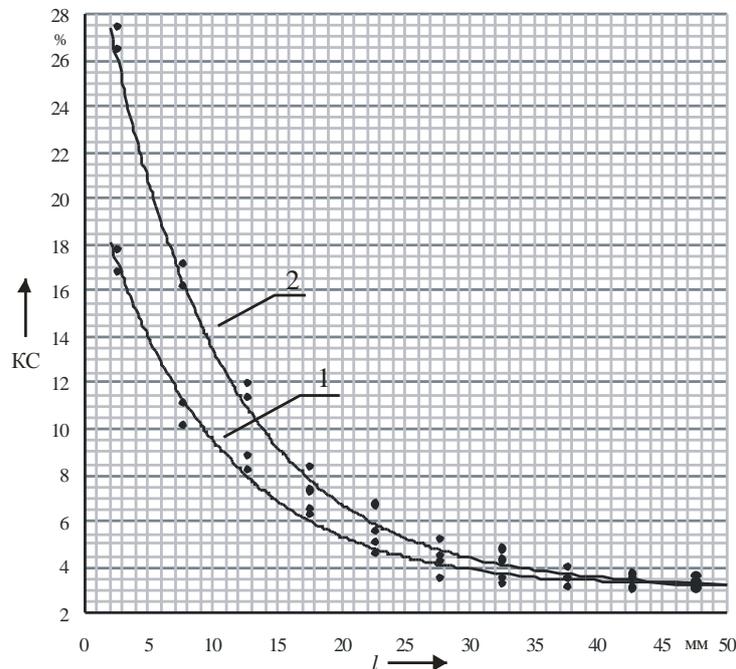


Рисунок. Проверка адекватности расчетно-экспериментальных зависимостей карбонизации во времени по сечению бетона класса по прочности на сжатие  $C^{18}/_{22,5}$  в условиях эксплуатационной среды коровника:

- 1 – прогнозная зависимость  $КС(l, t)$  для 10 лет эксплуатации;
- 2 – прогнозная зависимость  $КС(l, t)$  для 30 лет эксплуатации;
- – фактические значения показателя карбонатной составляющей ( $КС_{ф}$ )

Образцы бетона отбирали и определяли фактические значения карбонатной составляющей по сечению бетона с шагом 5 мм, до глубины 50 мм (по два образца для каждого значения сечения бетона) в соответствии с методикой [1].

Результаты проверки адекватности полученных расчетно-экспериментальных зависимостей карбонизации бетона колонн (марка бетонной смеси по удобоукладываемости П1) и плит покрытия (марка бетонной смеси по удобоукладываемости Ж2) коровников для различных сроков эксплуатации сведены в табл. 2–4.

Таблица 2 – Проверка адекватности расчетно-экспериментальных зависимостей

Срок эксплуатации, лет	Марка по удобоукладываемости	«Нормальность» остатков		
		Статистика Шапиро-Вилка, P-Value	Критерий $\chi^2$ -Пирсона, P-Value	Критерий $\lambda$ -Колмогорова, P-Value
10	П1	0,430354	0,551890	0,903634
30	П1	0,629214	0,797215	0,966398
10	Ж2	0,350462	0,509315	0,819975
30	Ж2	0,114783	0,042699	0,214959

Таблица 3 – Проверка адекватности расчетно-экспериментальных зависимостей

Срок эксплуатации, лет	Марка по удобоукладываемости	Независимость «остатков»		
		Критерий пересечений медианы, P-Value	Критерий спадов и возрастных, P-Value	Критерий Бокса-Пирса, P-Value
10	П1	0,250691	0,164431	0,516808
30	П1	0,038677	0,780959	0,004197
10	Ж2	0,250691	0,164431	0,471139
30	Ж2	1,00000	1,00000	0,181965

Таблица 4 – Проверка адекватности расчетно-экспериментальных зависимостей

Срок эксплуатации, лет	Марка по удобоукладываемости	Отсутствие систематической ошибки	Значимость коэффициента детерминации
		t-статистика Стьюдента, P-Value	Статистика Фишера
10	П1	0,929438	178,559
30	П1	0,014529	368,043
10	Ж2	0,781955	260,504
30	Ж2	0,279411	171,020

По результатам проверки значимости предлагаемых расчетно-экспериментальных зависимостей прогнозирования изменения во времени по сечению

– проверка гипотез о равенстве математического ожидания «остатков» нулю (t-статистика Стьюдента; P-Value = 0,014529...0,929438) показала, что гипотеза об отсутствии «систематической ошибки» согласуется с экспериментальными данными;

– проверка гипотезы о нормальном распределении «остатков» (критерии Шапиро-Вилка, P-Value = 0,114783...0,629214 ;  $\chi^2$ -Пирсона, P-Value = 0,042699...0,797215; Колмогорова-Смирнова, P-Value = 0,214959...0,966398), – что по данному критерию гипотеза о нормальном распределении согласуется с экспериментальными данными;

– проверка гипотезы о взаимной независимости «остатков» (критерии пересечений медианы, P-Value = 0,038677...1,00000; спадов и возрастных, P-Value = 0,164431...1,00000; Бокса-Пирса, P-Value = 0,004197...0,516808), – что по данному критерию гипотеза о независимости «остатков» согласуется с экспериментальными данными.

Таким образом, выполненные проверки показывают, что предлагаемое расчетно-экспериментальное регрессионное выражение значимо по всем критериям, в нем корректно учтены все основные факторы, значимо влияющие на изменение карбонатной составляющей бетона. Влияние прочих неучтенных факторов незначимо и взаимно компенсируется.

#### **Заключение.**

Расчетно-экспериментальные зависимости изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетона класса по прочности на сжатие  $C^{18}/_{22,5}$  для составов различных марок по удобоукладываемости позволяют достаточно объективно прогнозировать карбонизацию бетона.

Их использование дает возможность исследовать и прогнозировать карбонизацию в любом сечении бетона (что особенно важно, в любой точке защитного слоя).

#### **Литература:**

1. Васильев, А. А. К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода. / А. А. Васильев // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – Брест, 2020. – № 1. – С. 77–80.

2. Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2013. – 303 с.

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

4. Васильев, А. А. О необходимости разработки Белорусского нормативного документа по оценке карбонизации бетона. А. А. Васильев // Проблемы современного строительства Минск. Сб. науч. трудов. Мн. БНТУ, 2022. – С. 184–196.

5. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2019. – 215 с.

6. Васильев, А. А. Прогнозирование начальной карбонизации бетона различных классов по прочности на сжатие / А. А. Васильев, Ю. К. Кабышева, Н. А. Леонов // Современные научные знания: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2023. – С. 21–24.

7. Васильев, А. А. Экспресс-метод определения карбонатной составляющей (показателя КС) цементно-песчаной фракции бетона / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – Гомель: БелГУТ, 2021. – № 1 (42). – С. 94–97.

8. Неразрушающие методы оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах : практическое пособие / Т. М. Пецольд [и др.] ; под ред. А. А. Васильева. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 146 с.