

ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

УДК 691.32:624.012.45/46

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Н. В. БАНДЮК, старший преподаватель, К. Э. АГЕЕВА, аспирант, Я. В. ШУТОВ, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; В. В. ЛОГВИН, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

АНАЛИЗ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАПИЛЛЯРНОЙ ПОРИСТОСТИ БЕТОНА КЛАССА ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ $C^{20}_{/25}$

Показана значимость объективной оценки и прогнозирования капиллярной пористости бетона (P_k). Получены зависимости $P_k = f(W, V/C, \alpha)$ для граничных значений отпускной прочности бетона R бетона класса по прочности на сжатие $C^{20}_{/25}$. Приведены в графическом виде зависимости $P_k = f(W, V/C_{гр}, \alpha_{гр})$ для подвижных и жестких смесей ($R = 80\%$). Путем математической обработки зависимости $P_k = f(W, V/C_{гр}, \alpha_{гр})$ для подвижных и жестких смесей получены выражения $P_k = f(R)$ бетона класса по прочности на сжатие $C^{20}_{/25}$. Приняв граничные условия по составу бетонных смесей для реальных железобетонных изделий, получили граничные прогнозные значения P_k для подвижных и жестких бетонных смесей бетона класса по прочности на сжатие $C^{20}_{/25}$.

Введение. Капиллярная пористость определяет, в значительной степени, не только физико-механические свойства бетона, но и его коррозионные свойства, соответственно – долговечность [1, 2].

Сегодня капиллярную пористость бетона рассчитывают по различным выражениям. Одной из самых объективных, максимально учитывающих важнейшие параметры бетонной смеси, является зависимость проф. В. В. Бабицкого [3]:

$$P_k = \frac{W[0,98(V/C) - 0,0094 - 0,369\alpha]}{1000}, \quad (1)$$

где P_k – капиллярная пористость бетона, %; W – содержание цемента, кг/м³; V/C – водоцементное отношение бетона; α – степень гидратации цемента, %.

Для дальнейших расчетов принимали значение степени гидратации цемента в возрасте 28 суток α_{28}^{20} , %.

При $X > 1,65$

$$\alpha_{28}^{20} = 70 + 5(X - 1,65), \quad (2)$$

где X – относительное водосодержание цементного теста.

Относительное водосодержание цементного теста

$$X = \frac{0,98(V/C)_6 - 0,0094}{H/100}, \quad (3)$$

где H – нормальная густота цементного теста, %.

Используя выражения (1)–(3) можно рассчитать капиллярную пористость любого (известного) состава бетона.

Обычно в расчетах железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК) используют значение прочности бетона на сжатие, соответственно, параметр «класс бетона по прочности на сжатие» (C), т. е. для выбранного (рассчитанного) класса бетона по прочности на сжатие принимается (при необходимости) значение K_{tr} .

С учетом исследований проф. В. В. Бабицкого [4], показывающих, что бетон любого заданного класса по прочности на сжатие для реальных ЖБЭ и ЖБК можно получить сотнями (!) составов, представляет интерес выполнение анализа изменения P_k бетона (любого

класса по прочности на сжатие) для бетонных смесей различных марок по удобоукладываемости. Кроме того, необходимо определить и оценить изменение величин P_k для возможности использования данного параметра в прогнозных методиках коррозии бетона и железобетона.

Основная часть. Выполним исследование показателя P_k для бетона класса по прочности на сжатие $C^{20}_{/25}$, как бетона, массово применявшегося и применяемого при изготовлении ЖБЭ (ЖБК). Расчеты P_k будем производить для бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1–П5 ($OK = 1...25$ см) и Ж1–Ж4 ($5-40$ с).

Составы бетона класса по прочности на сжатие $C^{20}_{/25}$ рассчитывали с использованием вычислительного комплекса «Технолог», основанного на многофакторном методе подбора состава бетона, разработанного проф. В. В. Бабицким (принимали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, для которого: содержание СаО – 66 %; активность – 50,0 МПа; нормальная густота НГ = 26,5 %).

Поскольку для прочностных и коррозионных характеристик бетона основным показателем является содержание цемента (W , кг/м³), будем исследовать зависимость $P_k = f(W)$ для граничных значений V/C и α .

Необходимо отметить (и учитывать), что величины W , V/C и α не являются постоянными для отдельно взятого класса бетона по прочности на сжатие (при изменении отпускной прочности бетона (R) изменяются V/C и α , а изменение показателя W еще весомее, с учетом марок бетонных смесей по удобоукладываемости, при каждом значении R он имеет 61 значение).

Параметры бетонных смесей бетона класса по прочности на сжатие $C^{20}_{/25}$ для граничных значений отпускных прочностей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры бетонных смесей

$R, \%$	$W, \text{кг/м}^3$		V/C	$\alpha, \%$
	П1–П5	Ж1–Ж4		
70	306–428	311–266	0,5460	0,7167
80	331–470	336–282	0,5030	0,7087
90	357–513	396–310	0,4660	0,7019
100	389–558	396–333	0,4340	0,6904

Получим зависимости $\Pi_k = f(\Pi, B/\Pi, \alpha)$ для граничных значений отпускной прочности бетона $R = 70, 80, 90$ и 100 %. Следовательно, расчет Π_k выполним для 244 составов бетона ($C^{20/25}$).

В общем виде зависимость $\Pi_k = f(\Pi, B/\Pi_{гр}, \alpha_{гр})$ для любых граничных значений R

$$\Pi_k = k_1 \Pi + k_2, \quad (4)$$

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

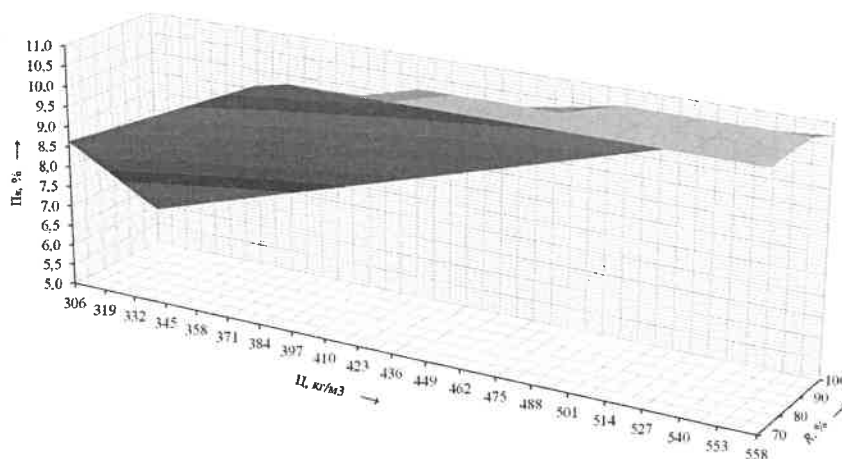
Зависимости $\Pi_k = f(\Pi, B/\Pi_{гр}, \alpha_{гр})$ для граничных значений R приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимости $\Pi_k = f(\Pi, B/\Pi_{гр}, \alpha_{гр})$ для бетона класса по прочности на сжатие $C^{20/25}$

$R, \%$	Зависимость $\Pi_k = f(\Pi, B/\Pi, \alpha)$ для бетонных смесей			
	подвижных	R^2	жестких	R^2
70	$0,0261 \cdot \Pi + 3 \cdot 10^{-13}$	1,0	$0,0261 \cdot \Pi - 6 \cdot 10^{-13}$	1,0
80	$0,0222 \cdot \Pi + 2,5 \cdot 10^{-13}$	1,0	$0,0219 \cdot \Pi - 5 \cdot 10^{-13}$	1,0
90	$0,0188 \cdot \Pi + 2 \cdot 10^{-13}$	1,0	$0,0183 \cdot \Pi + 1 \cdot 10^{-12}$	1,0
100	$0,0161 \cdot \Pi + 1,5 \cdot 10^{-13}$	1,0	$0,0151 \cdot \Pi + 3,3 \cdot 10^{-12}$	1,0

Путем интерполяции значений коэффициентов k_1 и k_2 для граничных значений отпускной прочности бетона (70, 80, 90 и 100 %) получены линейные зависимости коэффициентов k_1 и k_2 для различных отпускных прочностей бетона.

а)



б)

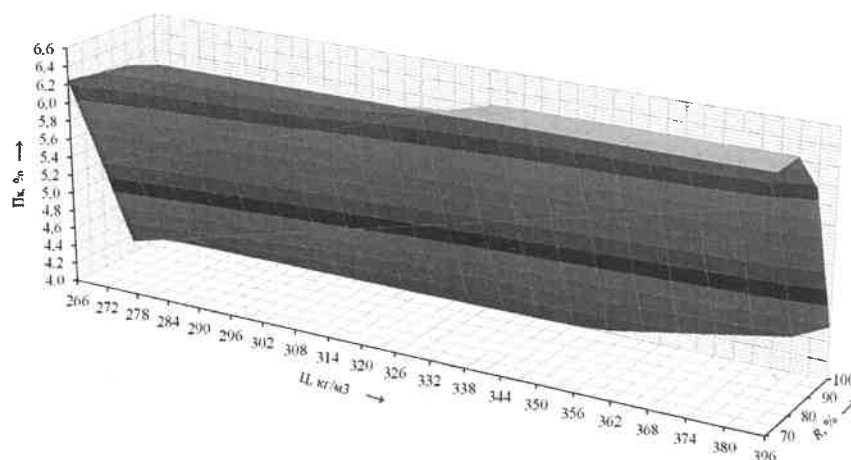


Рисунок 1 – Зависимость $\Pi_k = f(R)$ для бетона класса по прочности на сжатие $C^{20/25}$:

а – подвижные смеси; б – жесткие смеси

В общем виде зависимость коэффициентов k_1 и k_2 от отпускной прочности бетона следующая:

$$k_1 = k_3 R + k_4, \quad (5)$$

$$k_2 = k_5 R + k_6, \quad (6)$$

где k_3-k_6 – коэффициенты, аппроксимирующие линейную зависимость; $k_3, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $k_4, \frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$; $k_5, \text{ден. ед.}$; $k_6, \%$.

Таким образом, для подвижных смесей (П1–П5)

$$k_1 = -0,0003R + 0,0492; R^2 = 0,9936, \quad (7)$$

$$k_2 = -5 \cdot 10^{-15} R + 6 \cdot 10^{-13}; R^2 = 1,000; \quad (8)$$

жестких смесей (Ж1–Ж4) –

$$k_1 = -0,0004R + 0,0515; R^2 = 0,9963, \quad (9)$$

$$k_2 = 5 \cdot 10^{-15} R^2 - 8 \cdot 10^{-13} R + 3 \cdot 10^{-11}; R^2 = 0,9982. \quad (10)$$

С учетом зависимостей (5)–(8) получены выражения $\Pi_k = f(R)$, уже с учетом $\Pi, B/\Pi, \alpha$ для бетона класса по прочности на сжатие $C^{20/25}$ для подвижных смесей

$$\Pi_k = (-0,0003R + 0,0492)\Pi + (-5 \cdot 10^{-15} R + 6 \cdot 10^{-13}); \quad (11)$$

жестких смесей –

$$\Pi_k = (-0,0004R + 0,0515)\Pi + (5 \cdot 10^{-15} R^2 - 8 \cdot 10^{-13} R + 3 \cdot 10^{-11}). \quad (12)$$

В графическом виде зависимость $\Pi_k = f(R)$ для подвижных и жестких смесей для бетона класса по прочности на сжатие $C^{20/25}$ представлена на рисунке 1.

В соответствии с зависимостями (11) и (12) при использовании бетона с отпускной прочностью от 70 до 100 % получим пределы значений для подвижных смесей $\Pi_k = 8,63...10,71$ %; для жестких – $\Pi_k = 3,83...7,31$ %. Таким образом, значения капиллярной пористости в одном классе бетона по прочности на сжатие ($C^{20/25}$) отличаются от средних значений, для подвижных смесей (П1–П5) до 11 %, для жестких смесей (Ж1–Ж4) – до 31 %.

Для прогнозирования коррозионных характеристик бетона (при использовании класса бетона по прочности на сжатие без знания состава бетона) необходимо иметь абсолютные значения Π_k (пусть, даже укрупненные).

Поскольку подавляющее большинство железобетонных изделий изготавливают из подвижных смесей марки по удобоукладываемости П1 и жестких – Ж1 и Ж2, можно значительно сократить области значений Π_k . Кроме того, приняв в перечисленных марках бетонных смесей по удобоукладываемости наиболее применяемые значения осадки конуса (для П1 – ОК = 4 см) и времени вибрирования (для Ж1 – 8 с, Ж2 – 15 с) и то, что большинство сборных железобетонных элементов изготавливаются с отпускной прочностью 70 %, получим абсолютные значения капиллярной пористости, позволяющие их использовать с достаточной точностью и объективностью для вычисления различных параметров бетона (при неизвестном составе). Это, например часто необходимо при обследовании ЖБЭ и ЖБК. Так, для ЖБЭ, изготовленных из подвижных смесей П1 ($R = 70$ %) с достаточной степенью точности и достоверности, можно принимать $\Pi_k = 9,42$ %, выполненных из жестких бетонных смесей (Ж1 и Ж2), соответственно $\Pi_k = 6,98$ и $6,77$ %.

Получено 02.04.2026

A. A. Vasilyev, N. V. Banduk, K. A. Ageeva, Y. V. Shutov, V. V. Logvin. Concrete capillary porosity analysis compression strength class $C^{20/25}$.

The significance of objective assessment and prediction of capillary porosity of concrete (Π_k) is shown. The relationships $\Pi_k = f(\Pi, B/\Pi, \alpha)$ were obtained for the boundary values of the release strength of concrete R of concrete of compression strength class $C^{20/25}$. The relationships $\Pi_k = f(\Pi, B/\Pi_{rp}, \alpha_{rp})$ for mobile and rigid mixtures ($R = 80$ %) are given graphically. By mathematical processing of the relationship $\Pi_k = f(\Pi, B/\Pi_{rp}, \alpha_{rp})$ for movable and rigid mixtures, expressions $\Pi_k = f(R)$ of concrete of compression strength class $C^{20/25}$ are obtained. Taking the boundary conditions for the composition of concrete mixtures for real reinforced concrete products, the boundary forecast values of Π_k for movable and rigid concrete mixtures of concrete compression strength class $C^{20/25}$ were obtained.

Заключение. Полученные зависимости $\Pi_k = f(R)$, с учетом Π , B/Π и α , позволяют прогнозировать с достаточно высокой точностью значения капиллярной пористости бетона класса по прочности на сжатие $C^{20/25}$ для известного состава бетонной смеси, а рассчитанные граничные значения Π_k – при работе с реальными ЖБЭ и ЖБК.

Их использование при проектировании бетонных и железобетонных изделий под заданные эксплуатационные условия, при проектировании усиления, реконструкции эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК, значительно повысит объективность прогнозирования их технического состояния. Кроме того, представленный алгоритм дает возможность получить зависимости $\Pi_k = f(\Pi, B/\Pi, \alpha, R)$ и граничные значения Π_k для бетонов любых классов по прочности на сжатие, а по ним – зависимость $\Pi_k = f(f_{c, cube}^G)$.

Список литературы

- 1 **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.
- 2 **Несветаев, Г. В.** Бетоны : учеб. пособие / Г. В. Несветаев. – Ростов н/Д : Феникс, 2011. – 381 с.
- 3 Неразрушающие методы оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах : практическое пособие / Т. М. Пецольд, А. А. Васильев, В. П. Богданов [и др.] ; под ред. А. А. Васильева. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 146 с.
- 4 **Бабицкий, В. В.** Прогнозирование и повышение коррозионной стойкости железобетона в среде аэрозолей и растворов силивинита : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / В. В. Бабицкий ; БНТУ. – Минск, 1982. – 21 с.