

УДК 691.32:624.012.45/46

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, М. И. ТКАЧЕВА, аспирант, К. Э. АГЕЕВА, магистрант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; В. В. ЛОГВИН, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

### ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ ПРИ ЕЕ ИСПАРЕНИИ ПО СЕЧЕНИЮ БЕТОНА КЛАССА ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ $C^{20}_{/25}$

Показана значимость исследования процессов влагонасыщения и испарения по сечению бетонов в развитии карбонизации бетона. Выполнено исследование методом измерения электросопротивления кинетики распределения влаги во времени по сечению бетона класса по прочности на сжатие  $C^{20}_{/25}$ . Получены графические зависимости изменения электросопротивления при испарении влаги по сечению класса по прочности на сжатие  $C^{20}_{/25}$  для граничных значений времени и кинетики испарения влаги по сечению для граничных значений сечений. Предложена математическая зависимость изменения электросопротивления во времени по сечению бетона класса по прочности на сжатие  $C^{20}_{/25}$ . Показано, что наибольшая скорость переноса влаги присутствует в поверхностных слоях бетона, определяя скорость карбонизации защитного слоя бетона.

**Введение.** Карбонизация бетона – один из важнейших факторов, определяющих техническое состояние и его изменение во времени подавляющего большинства железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в любых атмосферных средах. В многочисленных работах [1–6] показано, что общепринятое положение о линейном распространении карбонизации по сечению бетона и его конечном характере во времени не просто ошибочно, оно приводит к неверной оценке состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и их изменению во времени, соответственно, является причиной неверных оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК, что зачастую влечёт создание и развитие аварийных ситуаций. В масштабах страны такое состояние вопроса приводит не только к огромным материальным потерям. Простой производства, учебного процесса, лечебных учреждений – это далеко не только материальные потери. А как оценить потерю здоровья, жизни?

Начальная карбонизация бетона в первую очередь определяется количеством использованного цемента, во времени – агрессивностью эксплуатационных условий. Агрессивность эксплуатационной среды – это не только концентрация  $CO_2$  воздуха и степень влажности, это, в первую очередь, частота изменений температуры и влажности, определяющая интенсивность протекания реакции карбонизации в зоне взаимодействия  $CO_2$  воздуха с  $Ca(OH)_2$  поровой жидкости бетона [1, 3, 7, 8].

В условиях открытой атмосферы периодичность увлажнения-высыхания защитного слоя бетона в значительной степени будет определять его карбонизацию, соответственно, нейтрализацию бетона, уменьшение его защитных свойств по отношению к стальной арматуре вплоть до полной потери.

**Основная часть.** Кинетику распределения влаги по сечению образцов бетона при испарении воды изучали по изменению электросопротивления бетона от времени контакта твердой фазы с газообразной или жидкой средой.

Метод измерения электросопротивления наиболее приемлем для изучения массопереноса жидких элект-

ролитов в твердых пористых телах при смене влажностного режима и температуры, поскольку насыщение и испарение поровой влаги сопровождается сменой объема электролита, что изменяет электросопротивление  $R_s$  в пористом теле [9].

Растворы электролитов подчиняются закону Ома, подобно проводникам первого рода (металлам).

Закон Ома при расчете на единицу площади поперечного сечения проводника в общем виде [9]

$$I = \frac{E}{\rho}, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока, А;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\rho$  – удельное сопротивление проводника.

Электросопротивление электролита, Ом, прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально поперечному сечению, в нашем случае – объему пористого тела бетона [9]:

$$R_s = \rho \frac{l}{S}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина проводника, см;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника, см<sup>2</sup>.

Исследования изменения распределения влаги по сечению бетона в процессе испарения воды проводили на образцах бетона класса по прочности на сжатие  $C^{20}_{/25}$ .

Состав бетона класса по прочности на сжатие  $C^{20}_{/25}$  приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав образцов бетона

| В/Ц   | Осадка конуса, см | Состав бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup> |     |      |     |
|-------|-------------------|--|-----|------|-----|
|       |                   | Ц  | П   | Щ    | В   |
| 0,546 | 4                 | 334                                      | 718 | 1163 | 182 |

Примечание – В/Ц – водоцементное отношение; Ц, П, Щ, В – массы цемента, песка, щебня, воды, добавки, кг.

Для исследований было изготовлено 3 образца – куба бетона с размерами 100×100×100 мм. При формировании образцов в тело бетона каждого образца заделывали электроды (пластины фольгированного гетинакса, размерами 10×10 мм, т. е.  $S = 1 \text{ см}^2$ ) по оси кубов на расстоянии 5; 25 и 50 мм от боковой грани каждого куба.

После изготовления образцы-кубы подвергали тепловлажностной обработке (ТВО) по стандартному режиму.

Электросопротивление образцов бетона измеряли в соответствии с методикой [9].

При проведении эксперимента применялся измеритель иммитанса цифровой Е7-21. Данный прибор позволяет измерять сопротивление в пределах  $10^{-10} - 10^6$  Ом с точностью 0,001 Ом при частоте тока 1000 Гц.

Образцы бетона исследовались в помещении лаборатории, в которой во время эксперимента поддерживались постоянные климатические условия: температура  $18 \pm 1$  °С; относительная влажность воздуха 60–62 %.

Для исследования кинетики испарения влаги образцы бетона погружались в воду до полного водонасыщения, после чего они устанавливались на деревянные подкладки для обеспечения объемного испарения влаги.

Измерения  $R_s$  выполняли по порядку расположения электродов от грани к середине образцов.

При проведении эксперимента для получения результатов измерений с достаточной точностью и объективностью соблюдали постоянство площадей поверхности электродов и расстояния между ними.

Измерения электросопротивления бетона проводили по трем образцам. Для построения экспериментальных зависимостей использовали средние значения результатов измерений.

На рисунке 1 приведены результаты изменения показателя  $R_s$  по сечению образцов бетона.

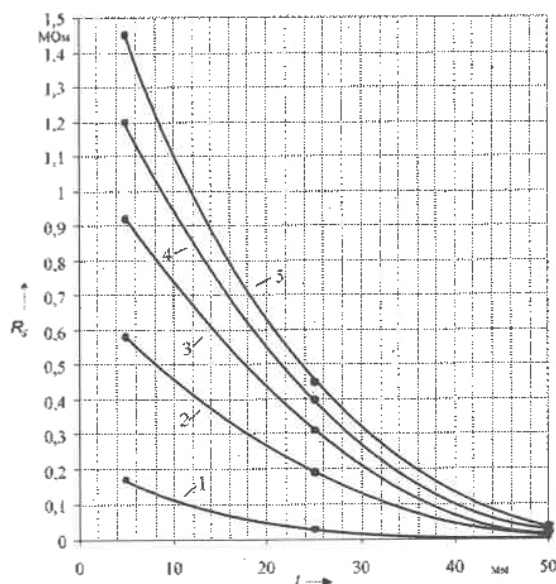


Рисунок 1 – Зависимость  $R_s = f(l)$  при испарении влаги по глубине образцами бетона класса по прочности на сжатие  $C^{20}_{25}$ : 1–5 – соответственно 6, 12, 18, 24, 30 суток

Полученные значения  $R_s$  для каждого расчетного значения сечения достаточно хорошо описывает полиномиальная зависимость второго порядка.

В общем виде

$$R_s = k_1 l^2 - k_2 l + k_3, \quad (3)$$

где  $k_1 - k_3$  – коэффициенты, аппроксимирующие полиномиальную зависимость второй степени:  $k_1, \frac{\text{Ом}}{\text{мм}^2}$ ;

$k_2, \frac{\text{Ом}}{\text{мм}}$ ;  $k_3, \text{Ом}$ ;  $l$  – сечение образца, мм.

Полученные зависимости  $R_s = f(l, t = \text{const})$  представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимости  $R_s = f(l, t = \text{const})$

| $t$ , сут | $R_s = f(l, t = \text{const})$ | Коэффициент детерминации $R^2$ |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|
| 6         | $0,0001l^2 - 0,011l + 0,2222$  | 1,000                          |
| 12        | $0,0003l^2 - 0,0277l + 0,7117$ |                                |
| 18        | $0,0004l^2 - 0,0426l + 1,124$  |                                |
| 24        | $0,0005l^2 - 0,0563l + 1,468$  |                                |
| 30        | $0,0007l^2 - 0,0716l + 1,790$  |                                |

Путем математической обработки значений коэффициентов  $k_1 - k_3$  для граничных значений  $t = 6; 12; 18; 24$  и 30 сут получены зависимости  $k_i = f(t)$ .

$$k_1 = 2 \cdot 10^{-5} t - 2 \cdot 10^{-5}; \quad R^2 = 0,9800. \quad (4)$$

$$k_2 = -0,0025t + 0,0030; \quad R^2 = 0,9990. \quad (5)$$

$$k_3 = 0,0649t - 0,1044; \quad R^2 = 0,9922. \quad (6)$$

Таким образом, зависимость  $R_s = f(l, t)$  имеет вид

$$R_s = (2 \cdot 10^{-5} t - 2 \cdot 10^{-5}) l^2 - (0,0025t + 0,0030) l + 0,0649t - 0,1044. \quad (7)$$

Характер изменения скоростей переноса поровой влаги в разных сечениях исследованных образцов приведен на рисунке 2.

Капиллярную пористость бетона рассчитывали по зависимости проф. В. В. Бабицкого с учетом водоцементного отношения бетона  $(В/Ц)_6$  и степени гидратации цемента  $\alpha$ :

$$П_k^6 = \frac{Ц [0,98(В/Ц)_6 - 0,0094 - 0,369\alpha]}{1000}, \quad (8)$$

где  $(В/Ц)_6$  – водоцементное отношение бетона;  $\alpha$  – степень гидратации цемента, %.

С учетом того, что эксперимент проводился в течение 30 суток, что практически соответствует расчетному значению срока твердения бетона в нормальных условиях, для дальнейших расчетов принимали стандартное значение степени гидратации цемента в возрасте 28 суток.

Степень гидратации цемента в возрасте 28 суток твердения  $\alpha_{28}^{20}$ , %, в соответствии с [3], рассчитана в зависимости от  $X$ : при  $X > 1,65$

$$\alpha_{28}^{20} = 70 + 5(X - 1,65), \quad (9)$$

где  $X$  – относительное водосодержание цементного теста.

Относительное водосодержание цементного теста

$$X = \frac{0,98(В/Ц)_6 - 0,0094}{НГ/100}, \quad (10)$$

где НГ – нормальная плотность цементного теста, %.

Для использованного бетона  $W_G = 26,5\%$ ; с учетом зависимостей (3)–(5) капиллярная пористость бетона класса по прочности на сжатие  $C^{20}_{/25}$  составляет  $8,70\%$ .

Полученные результаты показывают, что у исследованного бетона изменение  $R_s$  носит нелиней-

ный характер (см. рисунок 1). В интервале глубин от 5 до 25 мм наблюдается более резкое снижение  $R_s$ , чем в глубине от 25 до 50 мм. Этот нелинейный характер сохраняется и по мере испарения влаги.

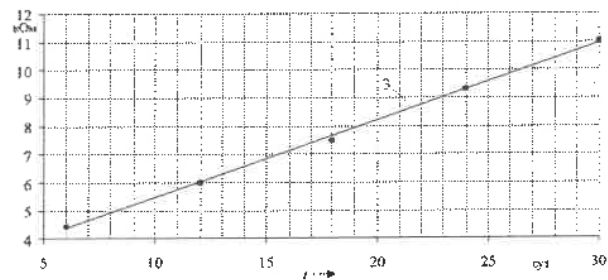
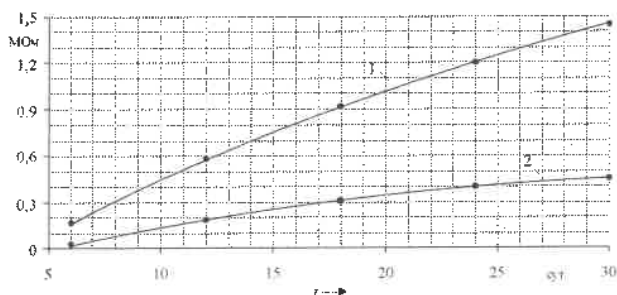


Рисунок 2 – Кинетика испарения влаги по глубине образцами бетона класса по прочности на сжатие  $C^{20}_{/25}$ :  
1–3 – соответственно глубина 5, 25, 50 мм

С момента начала испарения скорость переноса влаги на глубине 5 мм со временем возрастает, в то время как на глубине 25 мм ее рост значительно заторможен (см. рисунок 2, кривые 1, 2). Поэтому в интервале глубин 5–25 мм наблюдается более резкое изменение влажности, чем в интервале глубин 25–50 мм.

Аналогично будет происходить распределение влаги при испарении в любых бетонах, с тем условием, что чем выше будет капиллярная пористость бетона, тем более характер кривых испарения будет приближаться к линейному.

**Заключение.** Наибольшая скорость переноса влаги присутствует в поверхностных слоях (до 25 мм), что практически соответствует толщине защитного слоя бетона. Именно в поверхностных слоях бетона, под воздействием атмосферных осадков, будут наиболее часто происходить процессы попеременных увлажнений и высыхания бетона, приводя к ускоренной карбонизации защитного слоя бетона.

#### 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. 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.

6 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. – 2020. – № 1. – С. 77–80.

7 Васильев, А. А. Прогнозирование фактической карбонизации с учетом технологических параметров бетона : монография / А. А. Васильев, А. М. Няковский. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 205 с.

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

9 Ахвердов, И. Н. Неразрушающий контроль качества бетона по электропроводности / И. Н. Ахвердов, Л. Н. Маргулис. – Минск : Наука и техника, 1975. – 176 с.

Получено 02.12.2024

A. A. Vasilyev, M. I. Tkacheva, K. E. Ageeva, V. V. Logvin. Moisture evaporation distribution kinetics study by section of concrete of compression strength class  $C^{20}_{/25}$ .

The significance of the study of moisture saturation and evaporation processes along the concrete cross-section in the development of concrete carbonization is shown. A study was carried out by measuring the electrical resistance of the kinetics of moisture distribution over time across the section of concrete of compression strength class  $C^{20}_{/25}$ . There are obtained graphical dependences of change of electrical resistance at moisture evaporation by section of compression strength class  $C^{20}_{/25}$  for boundary values of time and kinetics of moisture evaporation by section for boundary values of sections. Mathematical dependence of electrical resistance change in time on concrete section of  $C^{20}_{/25}$  compression strength class is proposed. It is shown that the highest rate of moisture transfer is present in the surface layers of concrete, determining the rate of carbonization of the protective layer of concrete.