

УДК 691.321.544

DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-26-33

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ АДсорбЦИИ И ДЕСорбЦИИ ПАРОВ ВОДЫ ОБРАЗЦАМИ БЕТОНОВ И РАСТВОРОВ

А. А. ВАСИЛЬЕВ, К. Э. АГЕЕВА

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

В. В. ЛОГВИН, Л. В. ВЕППЕР

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Показаны значимость и необходимость исследования воздействия агрессивных факторов эксплуатационной среды (паров воды) на бетон. Выполнено исследование кинетики адсорбции и десорбции паров воды методом измерения электросопротивления в образцах растворов различных составов. Получены зависимости адсорбции и десорбции паров влаги во времени ($R_s - t$), указывающие на то, что характеры адсорбции и десорбции паров влаги схожи для образцов растворов любых составов. Скорость адсорбции значительно выше скорости десорбции для образцов растворов любых составов и зависит от процентного соотношения вяжущего и наполнителя. Аналогично выполнено исследование кинетики адсорбции и десорбции паров воды по сечению образцов бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов). Выведены зависимости $R_s = f(t, l)$, устанавливающие, что скорость адсорбции и десорбции паров воды значительно выше в поверхностных слоях и зависит от капиллярной пористости бетона.

Ключевые слова: адсорбция, десорбция, электропроводность, раствор, бетон.

Для цитирования. Исследование кинетики адсорбции и десорбции паров воды образцами бетонов и растворов / А. А. Васильев, К. Э. Агеева, В. В. Логвин, Л. В. Веппер // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 4 (103). – С. 26–33. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-26-33

STUDY OF THE KINETICS OF ADSORPTION AND DESORPTION OF WATER VAPOR BY CONCRETE AND MORTAR SAMPLES

A. A. VASILIEV, K. E. AGEeva

Belarusian State University of Transport, Gomel

V. V. LOGVIN, L. V. VEPper

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The importance and necessity of studying the impact of aggressive environmental factors (water vapor) on concrete are demonstrated. The kinetics of water vapor adsorption and desorption were studied using electrical resistance measurements in mortar samples of various compositions. The obtained dependences of moisture vapor adsorption and desorption over time ($R_s - t$), indicate that the patterns of moisture vapor adsorption and desorption are similar for mortar samples of all compositions. The adsorption rate is significantly higher than the desorption rate for mortar samples of all compositions and depends on the binder-to-filler ratio. Similarly, the kinetics of water vapor adsorption and desorption were studied

across the cross-section of concrete samples of various compressive strength classes (compositions). The dependences were derived $R_s = f(t, l)$, establishing that the rate of water vapor adsorption and desorption is significantly higher in the surface layers and depends on the capillary porosity of the concrete.

Keywords: adsorption, desorption, electrical conductivity, solution, concrete.

For citation. Vasiliev A. A., Ageeva K. E., Logvin V. V., Vepper L. V. Study of the kinetics of adsorption and desorption of water vapor by concrete and mortar samples. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 4 (103), pp. 26–33 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-26-33

Введение

Коррозия эксплуатируемых железобетонных элементов и конструкций, в первую очередь, определяется воздействием внешней среды [1–3]. Компоненты эксплуатационной среды по-разному воздействуют на бетон и стальную арматуру. Однако есть такие, которые оказывают агрессивное воздействие и на бетон, и на стальную арматуру.

К указанным компонентам относится вода в различных ее агрегатных состояниях [1]. Кроме того, вода, растворяя значительную часть агрессивных компонентов эксплуатационной воздушной среды, облегчает и ускоряет их проникновение в тело бетона на различную глубину.

Исследование кинетики адсорбции и десорбции паров воды позволяет прояснить механизм и интенсивность распределения паров влаги по сечению бетона (раствора), что играет значительную роль в построении модели карбонизации бетона [4].

Целью данной работы является исследование кинетики адсорбции и десорбции паров воды по сечению бетонов различных составов.

Материалы и методы исследования

Использовался метод измерения электросопротивления и построение зависимостей с применением программного комплекса «Microsoft Excel».

Результаты и обсуждение

Насыщение и испарение поровой влаги сопровождается сменой объема электролита, что изменяет электросопротивление R_s в пористом теле растворов и бетонов.

Изучение кинетики адсорбции и десорбции паров влаги выполняли по методике [5], поскольку метод измерения электросопротивления наиболее приемлем для изучения массопереноса жидких электролитов в твердых пористых телах при изменении влажностного режима.

Исследования адсорбции и десорбции паров влаги проводили на образцах растворов и бетонов. Составы образцов растворов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Составы образцов

Номер серии	Соотношение материалов			
	И	Ц	П	В
1	–	1,0	2,0	0,50
2	–	1,0	3,0	0,50
3	–	1,0	4,0	0,50
4	–	1,0	5,0	0,50
5	1,0	–	6,0	0,50

Примечание. И, Ц, П, В – известь, цемент, песок, вода.

В экспериментах использовали образцы растворов различных составов размера-ми $70 \times 70 \times 70$ мм. Было изготовлено по три образца каждого состава. При изготовлении в тело каждого образца заделывали по два электрода (пластины фольгированного гетинакса размерами 10×10 мм ($S = 1 \text{ см}^2$)).

Первый электрод располагали на расстоянии 0,5 см от грани куба, второй – в центре образца.

Образцы растворов на цементном вяжущем (серии 1–4) выдерживали во влажных условиях трое суток. После этого их устанавливали на решетчатые подставки, на которых происходила их сушка в естественных условиях за счет наличия разности относительных влажностей раствора и помещения. Для образцов серии 5 контакт с атмосферой поддерживали сразу после приготовления, поскольку в них гидроокись кальция введена не за счет гидролиза, как в растворах на цементных вяжущих.

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

Электросопротивление по сечению образцов бетона измеряли в соответствии с методикой [5].

Изучение адсорбции и десорбции паров влаги проводили в помещении лаборатории в изотермических условиях: температура воздуха поддерживалась в пределах 7 ± 1 °С, но разных значений относительной влажности – соответственно 100 и 72 %.

До проведения эксперимента эксикатор с водой и закрытой крышкой выдерживали двое суток для установления равновесного состояния влажности.

При проведении эксперимента для создания 100%-й влажности дно эксикатора заливали 0,5 л дистиллированной воды. После чего размещали фаянсовую перегородку с отверстиями и на нее помещали треугольные подкладки из дерева, на которые устанавливали испытуемые образцы для обеспечения контакта паров воды со всеми гранями кубиков. После установки образцов в эксикатор токоотводы электродов выводили через центральное отверстие крышки наружу.

После изучения адсорбции по изменению R_s во времени образцы извлекаются из эксикатора и переносятся на решетчатую подставку в помещении для изучения десорбции поровой влаги.

Об изменении влажности в бетоне судили по изменению R_s , а скорости – по изменению $R_s/\text{сут}$.

Результаты, полученные в первые часы твердения образцов, в работе не рассматривались и не оценивались, так как зависимости $R_s - t$ подробно изучены и объяснены на стадии геле- и кристаллизационного структурообразования в работах [5] и др.

Зависимости $R_s - t$ при адсорбции и десорбции паров влаги в образцах различных составов растворов отражены на рис. 1.

Характер кривых $R_s - t$ при адсорбции и десорбции паров влаги в образцах различных составов однотипен. Адсорбция в начальной фазе по скорости достаточно велика, а в последующем медленно падает, приближаясь к равновесному состоянию (рис. 1).

Скорость десорбции паров воды ниже у цементно-песчаных растворов, у известкового раствора – выше. Скорость десорбции паров воды у цементно-песчаных растворов возрастает с уменьшением доли наполнителя. Такая же зависимость наблюдается при адсорбции.

Адсорбцию паров влаги по сечению образцов бетона исследовали аналогично.

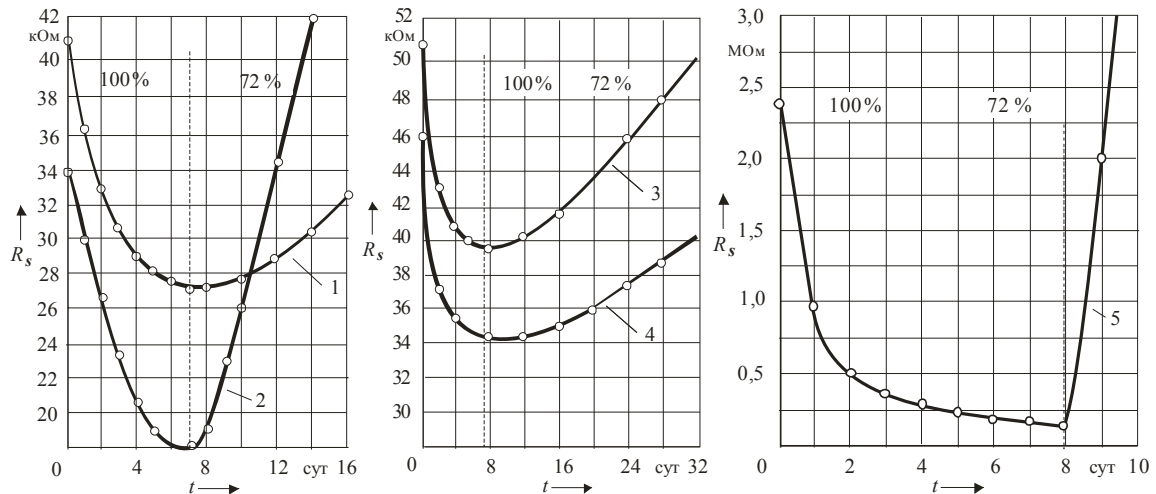


Рис. 1. Зависимости $R_s - t$ при адсорбции и десорбции паров влаги в образцах растворов:
1 – серия 1; 2 – серия 2; 3 – серия 3; 4 – серия 4; 5 – серия 5

Состав образцов бетона представлен в табл. 2.

Таблица 2

Состав образцов бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	В/Ц	Осадка конуса, см	Состав бетонной смеси, кг/м ³			
			Ц	П	Щ	В
C ⁸ / ₁₀	1,275	4	145	913	1122	185
C ¹⁸ / _{22,5}	0,599		305	741	1165	183
C ²⁰ / ₂₅	0,546		334	718	1163	182
C ²⁵ / ₃₀	0,466		397	670	1149	185
C ³⁰ / ₃₇	0,332		595	547	1069	198

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

Подбор составов бетонов осуществляли многофакторным методом профессора В. В. Бабицкого с использованием вычислительного комплекса «Технолог». При расчете компонентов для бетонной смеси за основу принимали портландцемент ПЦ 500 Д0 (ОАО «Белорусский цементный завод»), для которого: процентное содержание СаО в цементе – 0,66; активность цемента – 50,0 МПа; нормальная густота НГ = 26,5 %.

Для исследований было изготовлено по 3 образца – кубы бетона с размерами 100 × 100 × 100 мм для каждого класса бетона по прочности на сжатие. 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.

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.

На рис. 2 отображена кинетика изменения R_s при адсорбции и десорбции паров воды на разных глубинах образцов бетонов классов по прочности – соответственно $C^{8/10}$ и $C^{20/25}$. Представлены средние результаты измерения значений R_s каждой серии образцов бетона каждого класса по прочности на сжатие.

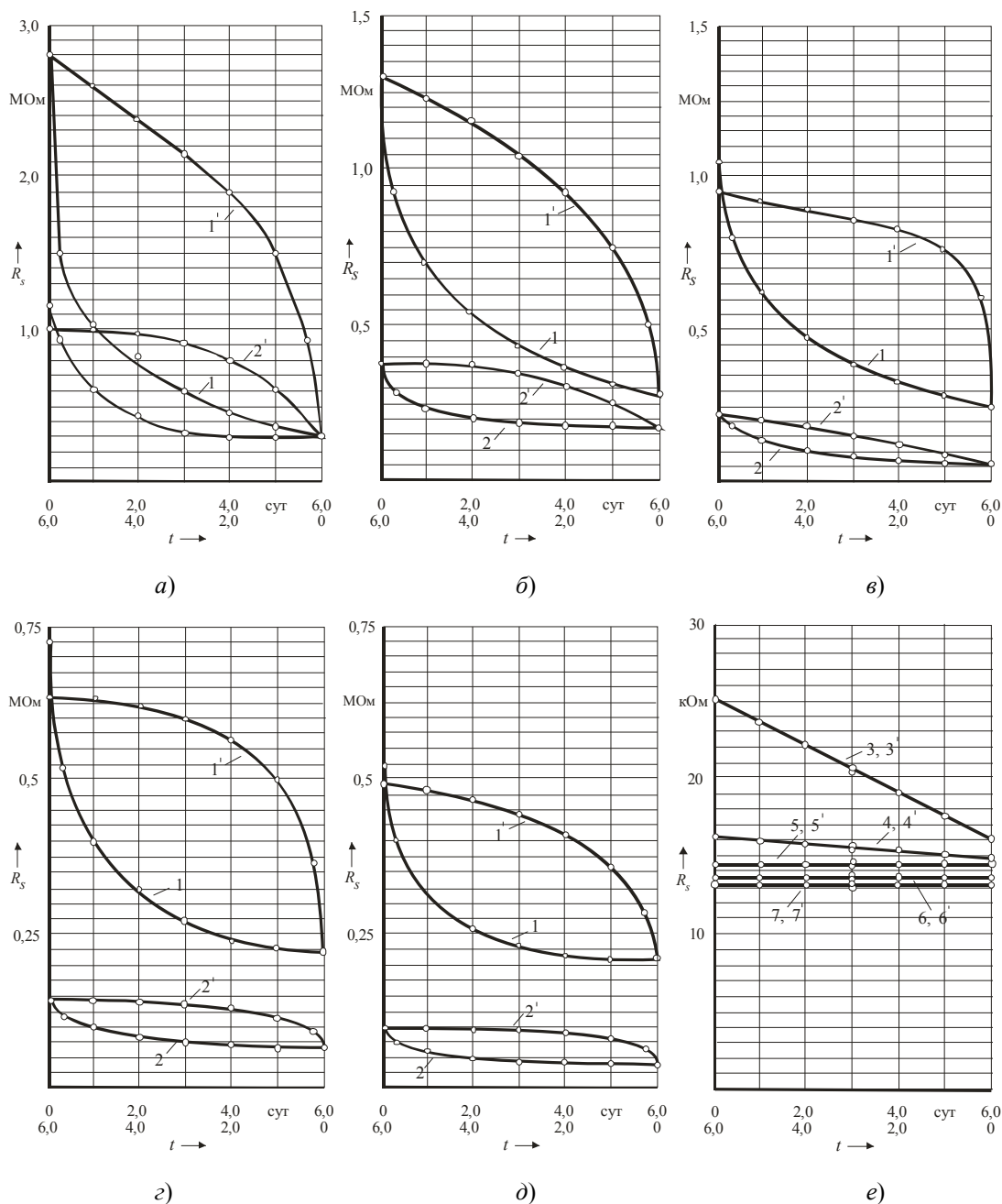


Рис. 2. Кинетика адсорбции (кривые 1–7) и десорбции (кривые 1'–7') паров воды в образцах бетонов классов по прочности на сжатие $C^{8/10}$ – $C^{30/37}$:
 а – класс бетона по прочности на сжатие $C^{8/10}$; б – класс бетона по прочности на сжатие $C^{18/22,5}$; в – класс бетона по прочности на сжатие $C^{20/25}$; г – класс бетона по прочности на сжатие $C^{25/30}$; д – класс бетона по прочности на сжатие $C^{30/37}$;
 1, 1' – глубина 5 мм; 1, 2' – глубина 25 мм; е – 3, 3' – глубина 50 мм для бетона класса по прочности на сжатие $C^{8/10}$; 4, 4' – глубина 50 мм для бетона класса по прочности на сжатие $C^{18/22,5}$; 5, 5' – глубина 50 мм для бетона класса по прочности на сжатие $C^{20/25}$;
 6, 6' – глубина 50 мм для бетона класса по прочности на сжатие $C^{25/30}$;
 7, 7' – глубина 50 мм для бетона класса по прочности на сжатие $C^{30/37}$

Выполненные исследования показали, что, как и в случае изучения распределения поровой влаги по глубине бетонов и кинетики ее массопереноса за счет испарения из образцов бетонов различных классов по прочности на сжатие [4], наибольшая скорость процессов адсорбции и десорбции наблюдается в ближайших от поверхности слоях.

В двенадцатидневных циклах адсорбции и десорбции образуются гистерезисные петли, размеры которых определяются классом бетона по прочности на сжатие (составом) и степенью пористости образцов (рис. 2).

Чем выше пористость бетона, тем больше его адсорбционная способность. Начиная с бетона класса по прочности на сжатие C^{20}_{25} на глубине 50 мм значение R_s остается величиной постоянной, свидетельствуя об отсутствии процесса конденсации в капиллярных порах паров воды (рис. 2, кривые 5, 5'; 6, 6'; 7, 7').

Капиллярную пористость бетона (Π^6_k) определяли по зависимости профессора В. В. Бабицкого:

$$\Pi^6_k = \frac{\Pi[0,98(B/C)_6 - 0,0094 - 0,369\alpha]}{1000}, \quad (1)$$

где $(B/C)_6$ – водоцементное отношение бетона; α – степень гидратации цемента, %.

С учетом того, что использовали образцы бетонов после ТВО, набора 70%-й отпускной прочности, для дальнейших расчетов принимали стандартное значение степени гидратации цемента в возрасте 28 сут.

Степень гидратации цемента в возрасте 28 сут твердения (α^{20}_{28} , %) в соответствии с [3] рассчитывали в зависимости от относительного водосодержания цементного теста (X):

– при $X > 1,65$

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

– при $X \leq 1,65$

$$\alpha^{20}_{28} = 60X - \sqrt[3]{(1,65X)^2} \cdot e^{1,65X}, \quad (3)$$

где

$$X = \frac{0,98(B/C)_6 - 0,0094}{НГ/100}, \quad (4)$$

где НГ – нормальная густота цементного теста, %.

Значения капиллярной пористости для исследуемых бетонов даны в табл. 3.

Таблица 3

Значения капиллярной пористости, Π^6_k

Класс бетона по прочности на сжатие	B/C_6	α , %	X	Π^6_k , %
C^8_{10}	1,275	85,2	4,68	13,4
$C^{18}_{22,5}$	0,599	72,6	2,17	9,44
C^{20}_{25}	0,546	71,7	1,98	8,70
C^{25}_{30}	0,466	70,3	1,71	7,49
C^{30}_{37}	0,332	60,2	1,19	5,57

Заключение

На основе представленных исследований кинетики адсорбции и десорбции паров воды в образцах растворов и бетонов различных составов установлено, что:

- характеры адсорбции и десорбции паров влаги носят схожий характер для образцов растворов любых составов;
- скорость адсорбции значительно выше скорости десорбции для образцов растворов любых составов и зависит от процентного соотношения вяжущего и наполнителя;
- скорость адсорбции и десорбции паров воды значительно выше в поверхностных слоях бетонов любых классов по прочности на сжатие (составов) и зависит от капиллярной пористости бетона.

Результаты ранее выполненных исследований в области развития карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов) [1–3] показывают, что карбонизация бетона происходит по сложной экспоненциальной зависимости с уменьшением интенсивности вглубь сечения конструкции (элемента).

Приведенная выше информация свидетельствует о том, что характеры зависимостей адсорбции и десорбции паров воды по сечению бетона (как и зависимостей испарения влаги [4]) полностью совпадают с характером изменения карбонатной составляющей по сечению бетона. Таким образом, прямо указывается на то, что карбонизация по сечению бетона, в первую очередь, зависит от типа и характера влажности эксплуатационной среды. Наиболее интенсивно она происходит в поверхностных слоях (защитном слое бетона).

В результате проведенной работы получены данные, которые возможно (и необходимо) использовать в научных исследованиях при создании модели карбонизации бетона в части характера воздействия эксплуатационной среды и значений параметров влажности.

Литература

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 ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 303 с.
3. 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.
4. Неразрушающие методы оценки и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах : практ. пособие / Т. М. Пецольт, В. П. Богданов, В. В. Бабицкий [и др.] ; под ред. А. А. Васильева. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 146 с.
5. Ахвердов, И. Н. Неразрушающий контроль качества бетона по электропроводности / И. Н. Ахвердов, Л. Н. Маргулис. – Минск : Наука и техника, 1975. – 176 с.

References

1. Vasil'ev A. A. *Carbonation and damage assessment of reinforced concrete structures*. Gomel', Belorusskij gosudarstvennyj universitet transporta, 2012. 263 p. (in Russian).
2. Vasil'ev A. A. *Carbonation of concrete (assessment and forecasting)*. Gomel', Belorusskij gosudarstvennyj universitet transporta, 2013. 303 p. (in Russian).

3. Vasil'ev A. A. Assessment and forecasting of the technical condition of reinforced concrete structures taking into account the carbonation of concrete. Gomel', Belorusskij gosudarstvennyj universitet transporta, 2019. 215 p. (in Russian).
4. Pecol'd T. M., Bogdanov V. P., Babickij V. V., Vasil'ev A. A., Dzirko S. V. Non-destructive methods of assessment and forecasting of the technical condition of reinforced concrete structures operated in air environments. Ed. Vasil'eva A. A. Gomel', Belorusskij gosudarstvennyj universitet transporta, 2007. 146 p. (in Russian).
5. Ahverdov I. N., Margulis L. N., *Non-destructive testing of concrete quality by electrical conductivity*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 176 p. (in Russian).

Поступила 26.08.2025 г.