

УДК 691.32:539.3/4.001.57

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-45-50

ПРОНИКНОВЕНИЕ ХЛОРИДОВ В БЕТОН: АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

д-р техн. наук, проф. С.Н. ЛЕОНОВИЧ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Е.Е. ШАЛЫЙ

(Инженерной школы ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток)

Д.А. ЛИТВИНОВСКИЙ

(ООО «ИнжСпецСтройПроект», Минск)

А.В. СТЕПАНОВА

(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

А.В. ЖУРАВСКАЯ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

В.В. МАЛЮК

(ООО «Трансстрой-Трест», Корсаков)

Железобетонные конструкции подвергаются воздействию агрессивной среды. В этом случае комбинированные механические и экологические воздействия могут действовать одновременно, и их синергетические влияния должны быть учтены. В этой статье представлены и проанализированы результаты испытаний на двух различных типах бетонов. Определено капиллярное поглощение карбонизированного и некарбонизированного бетона. Изучено влияние механической нагрузки на капиллярное всасывание. Умеренная сжимающая нагрузка снижает коэффициент капиллярного всасывания, в то время как капиллярное всасывание усиливается более высокими механическими нагрузками по мере образования микротрещин. Диффузия хлоридов была оценена с помощью теста диффузионной ячейки. Коэффициент диффузии в карбонизированном бетоне на порядок выше, чем в некарбонизированном бетоне.

Ключевые слова: хлоридная диффузия, капиллярное всасывание, карбонизация, комбинированное действие.

Введение. Железобетонные конструкции часто подвергаются воздействию агрессивной среды. В большинстве случаев существует не один доминирующий процесс, такой как карбонизация или проникновение хлорида, который в конечном итоге ограничит срок службы конструкции, а сочетание механических и экологических нагрузок. Однако некоторые концепции прогнозирования или проектирования срока службы железобетонных конструкций не учитывают синергетические эффекты комбинаций нагрузок. При значительном ускорении деструктивных процессов при комбинированных нагрузках срок службы, прогнозируемый на основе одного доминирующего механизма, превышает реальный срок службы.

Имеется множество экспериментальных данных и прогностических моделей карбонизации и проникновения хлоридов в бетон [1–5]. В большинстве случаев был исследован один единственный механизм. Изучались температурное влияние и солевое загрязнение на карбонизацию цементных материалов. Обнаружена более высокая скорость карбонизации в загрязненном хлоридами бетоне. Нагао и Уэда [6] выяснили, что содержание растворимых хлоридов на карбонизированной поверхности вблизи зоны выше, чем в некарбонизированном бетоне. Пуатацананон и Саума [7] исследовали связь карбонизации и диффузии хлоридов с помощью численного моделирования. Они изучали роль образования и разложения соли Фриделя, в частности, в контексте карбонизации. Но до сих пор существуют спорные мнения о связывании хлоридов при карбонизации [6–8].

Проникновение хлорида в бетон регулируется двумя различными механизмами переноса: капиллярным всасыванием и диффузией. Поэтому было изучено влияние карбонизации и сжимающей нагрузки на капиллярное всасывание и влияние карбонизации на диффузию хлоридов.

Экспериментальные исследования. Подготовка образцов. Для серии испытаний были подготовлены два различных типа бетона. Состав приведен в таблице 1. В качестве минеральных вяжущих использовались портландцемент типа Р.О 52,5, доменный шлак типа S95 и зола-унос типа F. Добавлен речной песок с модулем крупности 2,6 и измельченные гранитные заполнители с максимальным диаметром 20 мм. После смешивания свежего бетона с водоредуцирующим агентом заполняются стальные формы с внутренним диаметром 100 мм и высотой 200 мм. Кроме того, образцы того же размера были подготовлены путем высевания крупных заполнителей из свежего бетона. В возрасте 21 дня цилиндры были разрезаны алмазной пилой пополам высотой 100 мм для испытания на капиллярное всасывание и в срезах толщиной 10 мм для испытания на диффузию и капиллярное всасывание. Некоторые цилиндры в возрасте 28 суток были загружены на 60% и 85% от предельной сжимающей нагрузки в течение 10 мин до испытания на капиллярное всасывание. В возрасте 28 дней все образцы высушены в печи при 50 °С в течение недели до постоянного веса. Затем половину образцов поместили в климатический шкаф для ускоренной карбонизации при 20 °С, 80% относительной влажности и 20% концентрации CO₂. После полной карбонизации снова высушивали перед измерением капиллярного всасывания.

Таблица 1. – Соотношение смесей двух типов бетона, кг/м³

Код	Минеральные вяжущие	Портланд Цемент	Микро-кремнезем	Шлак	Песок	Гравий	Водоредуцирующая добавка	Вода
СС1	476	238	100	138	683	1025	5,1	152
СС2	357	201	75	81	721	1082	2,8	161

Капиллярное всасывание. При контакте бетона с водой количество поглощенной воды ΔW описывается следующим уравнением [9]:

$$\Delta W = \left[A_0 + \frac{A_1 t}{(A_2 + t)} \right] \sqrt{t}, \quad (1)$$

где A_0 , A_1 и A_2 являются константами. В идеализированной системе прямых цилиндрических капилляров A_1 и A_2 равны нулю в уравнении (1), а поглощение воды капиллярным всасыванием как функция времени $\Delta W(t)$ может быть описано с помощью следующего уравнения:

$$\Delta W(t) = A\sqrt{t}. \quad (2)$$

В уравнении (2) коэффициент капиллярного всасывания A обозначает:

$$A = \psi \rho \sqrt{\frac{r_{eff} \sigma \cos \theta}{2\eta}}. \quad (3)$$

В уравнении (3):

ψ обозначает емкость воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$ – это максимальное содержание воды, которое может быть поглощено капиллярной системой;

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

η – вязкость, $(\text{Н}\cdot\text{с})/\text{м}^2$ (в зависимости от температуры);

θ – угол смачивания;

r_{eff} – распределение по размерам пор цементного камня на одну характерную длину, м. Если распределение пор по размерам смещено в сторону более крупных пор, коэффициент увеличивается и, следовательно, увеличивается A . Капиллярное всасывание является чувствительным методом исследования пористых систем [10].

Испытание диффузионной ячейки. Использованы обычные диффузионные ячейки для определения коэффициента диффузии хлоридов в бетоне и растворе [11–13]. Верхнюю клетку заполняли насыщенным раствором $\text{Ca}(\text{OH})_2$, содержащим 5% NaCl . Последующую клетку заполняли насыщенным раствором $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Концентрация хлоридов в последующей ячейке была определена с помощью калиброванного электрода. Из устойчивого состояния потока хлоридов J коэффициент диффузии D может быть получен с помощью первого закона Фика:

$$J = D \, dC/dx. \quad (4)$$

Из измеренных данных D можно вычислить в соответствии с соотношением:

$$D = b(VT/C_0A), \quad (5)$$

где T – толщина образца;

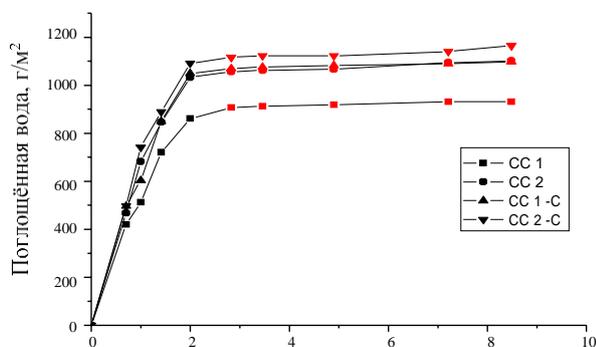
C_0 – начальная концентрация хлоридов в верхнем коллекторе;

A – поперечное сечение образца;

V – объем нисходящего коллектора;

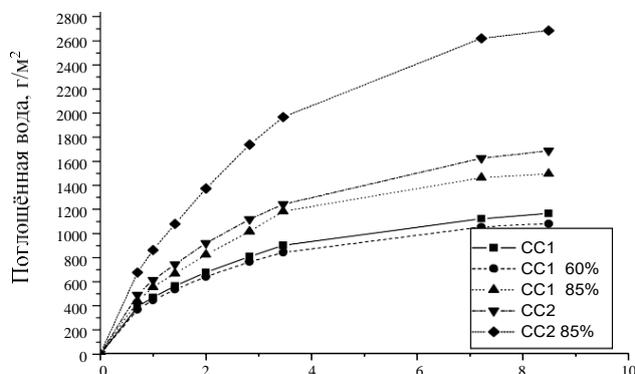
b – постоянный градиент концентрации хлоридов в образце.

Результаты и обсуждение. Капиллярное всасывание. Результаты капиллярного всасывания показаны на рисунках 1 и 2. Масса поглощенной воды, отнесенная к поперечному сечению образцов, является функцией квадратного корня времени. Линейное отношение, заданное уравнением (1), действительно только в течение короткого периода капиллярного всасывания. Бетон СС2 с В/Ц = 0,45 поглощает больше воды, чем бетон СС1 с В/Ц = 0,32. Объемное содержание цементного камня в СС1 составляет 33,7%, а в СС2 – 30,2%. Это означает, что более высокое водоцементное отношение в полной мере компенсирует меньшее содержание пасты. Если коэффициент капиллярного всасывания цементного камня оценивать по объемной концентрации в бетонах, получают значения на чистом цементном камне.



Длительность капиллярного всасывания, 0.5ч.

Рисунок 1. – Забор воды капиллярным всасыванием



Длительность капиллярного всасывания, 0.5ч

Рисунок 2. – Капиллярное всасывание ненагруженного и загруженного карбонизированного и некарбонизированного бетона. Уровень нагружения бетона 60% и 85% прочности

При длительном контакте с водой карбонизированный бетон поглощает больше воды, чем некарбонизированный. Йоханнессон и Утгенант [14] изучали изменения микроstructures в результате карбонизации. Они обнаружили, что объем капиллярных пор с радиусом от 0,2 до $0,7 \times 10^{-8}$ м увеличивается во время карбонизации.

Коэффициенты капиллярного всасывания A в течение первых 4 часов приведены в таблице 2. Очевидно, что коэффициент капиллярного всасывания для СС1 после ускоренной карбонизации на 19,8% выше, чем у некарбонизированного бетона, в то время как коэффициент капиллярного всасывания СС2 на 6,1% выше после ускоренной карбонизации. Емкость воды Ψ может быть определена на рисунке 1 равной 90 кг/м^3 для СС1 и 108 кг/м^3 для СС2. С помощью Ψ можно вычислить глубину проникновения x жидкости: $x(t) = Bt^{1/2} = A/\Psi \rho t^{1/2}$.

Таблица 2. – Коэффициент капиллярного всасывания бетона (нагружаемые образцы некарбонизированы)

Код	Коэффициент поглощения A , $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2}\right]$ при различных уровнях нагрузки				
	Некарбонизированный	Ускоренная карбонизация	Не загружено	Уровень нагрузки 60%	Уровень нагрузки 85%
СС1	473,5	567,4	387,2	366,4	461,3
СС2	570,0	604,7	514,2	-	749,0

Капиллярное всасывание было определено после загрузки цилиндров в течение 10 минут на 60% и 85% от максимальной сжимающей нагрузки (см. рисунок 2). Образцы представляют собой цилиндры высотой 100 мм. Компрессионная нагрузка в 60% уменьшает капиллярное всасывание, но при приложении более высокой сжимающей нагрузки капиллярное всасывание снова увеличивается. Это изменение объема может быть выражено в терминах ползучести. При нагрузках 85% и выше снижение объема перекомпенсируется и будут образовываться новые микро-трещины [14–23].

Испытание диффузионной ячейки. Изменение концентрации хлоридов в нисходящем коллекторе во времени представлено на рисунках 3–6. Результаты измерений в бетоне показаны на рисунке 3 и 4. Эквивалентные результаты на образцах раствора показаны на рисунках 5 и 6. На основе этих данных были рассчитаны коэффициенты диффузии хлоридов с помощью уравнений (3) и (4).

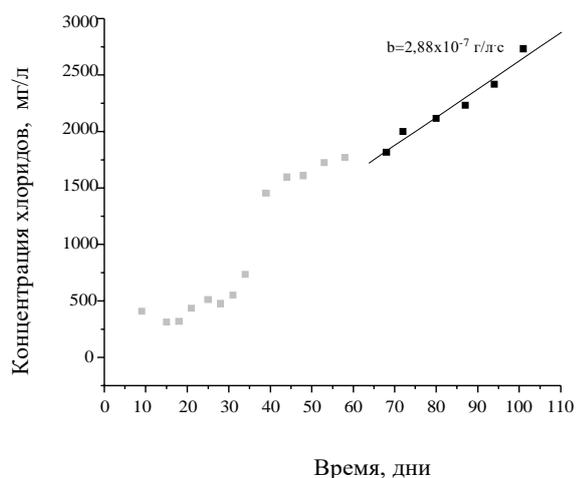


Рисунок 3. – Содержание хлоридов в нижнем резервуаре из бетона СС1 в зависимости от времени

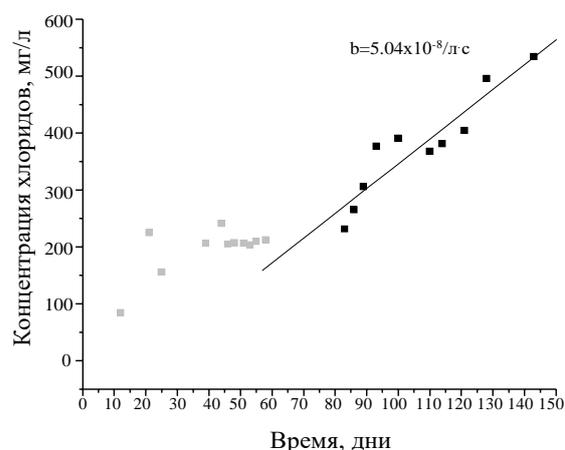


Рисунок 4. – Содержание хлоридов в нижнем резервуаре из бетона СС2 в зависимости от времени

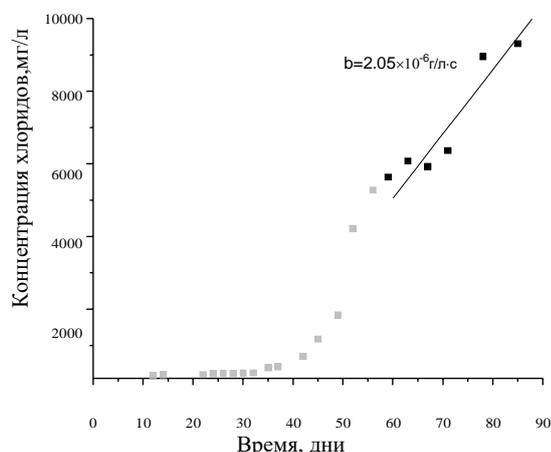


Рисунок 5. – Содержание хлоридов в нижнем резервуаре раствора СС1 в зависимости от времени

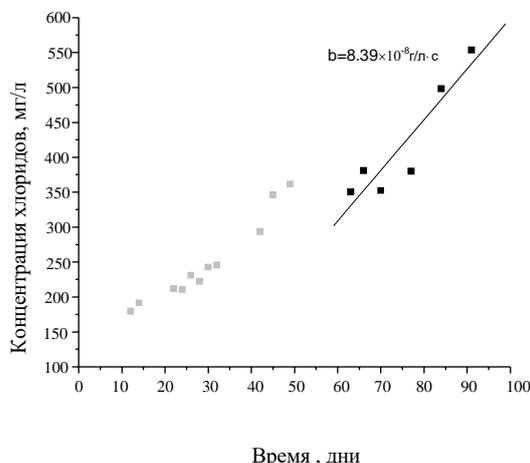


Рисунок 6. – Содержание хлоридов в нижнем резервуаре раствора СС2 в зависимости от времени

Таблица 3. – Расчет коэффициента диффузии хлоридов

Код	Коэффициент диффузии хлоридов, D , [$\times 10^{-6} \text{мм}^2/\text{с}$]			
	Некарбонизированный		Ускоренная карбонизация	
	Бетон	Мелкозернистый цементный бетон	Бетон	Мелкозернистый цементный бетон
СС1	2,06	3,38	14,8	81,6
СС2	7,39	7,56	54,9	79,4

По аналогии с капиллярным всасыванием коэффициент диффузии хлоридов бетона в мелкозернистом цементном бетоне СС2 выше, чем у СС1. После карбонизации коэффициент диффузии значительно возрастает. Это можно объяснить тем, что в мелкозернистом цементном бетоне наблюдается более высокая концентрация цементного камня, который подвергается карбонизации.

Выводы. Карбонизация оказывает значительное влияние на капиллярное всасывание и диффузию хлоридов. Это важнейшие механизмы переноса хлоридов в бетон. Коэффициент капиллярного всасывания и коэффициент диффузии увеличиваются за счет карбонизации. Это объясняется распределением пор по размерам. Исчезают нанопоры, и образуются более грубые капиллярные поры. Ускоряется миграция хлоридов в карбонизированном бетоне. Кроме того, умеренная сжимающая нагрузка снижает коэффициент капиллярного всасывания. В то же время капиллярное всасывание увеличивается за счет более высоких механических нагрузок по мере образования микротрещин. Если для прогнозирования срока службы бетонных конструкций в естественной среде используются коэффициенты диффузии хлоридов, которые были определены на некарбонизированном или ненагруженном бетоне, прогноз не будет реалистичным [16–22].

ЛИТЕРАТУРА

1. Цзинь, В.Л. Долговечность бетонной конструкции / В.Л. Цзинь, Ю.Х. Чжао. – Пекин : Сайенс Пресс, 2002. – С. 29–34.
2. Нью, Д.Т. Прогноз долговечности и ресурса железобетонных конструкций / Д.Т. Нью. – Пекин : Сайенс Пресс, 2003. – С. 16–22.
3. Нагеш, М. Моделирование диффузии хлоридов в бетоне и определение коэффициентов диффузии / М. Нагеш, Б. Бхаттачарджи // Журнал материалов АСІ. – 1998. – № 4. – С. 113–120.
4. Си, Ю. Моделирование проникновения хлоридов в насыщенный бетон / Ю. Си, З. Базант // Журнал материалов в области гражданского строительства. – 1999. – № 1. – С. 58–65.
5. Маслехуддин, М. Влияние температурного и соляного загрязнения на карбонизацию цемента / М. Маслехуддин, К.Л. Пейдж, Ж.Г. Рашидузафар // Журнал материалов в области гражданского строительства. – 1996. – № 2. – С. 63–69.
6. Нагао, К. Применение опреснения для смешивания бетона с летучей золой или доменным шлаком / К. Нагао, Т. Уэда // Международный журнал современной физики В. – 2003. – Т. 17, № 8–9. – С. 1452–1457.
7. Пуатацананон, В. Нелинейная связь карбонизации и диффузии хлоридов в бетоне / В. Пуатацананон, В.Э. Саума // Журнал материалов в области гражданского строительства. – 2005. – № 3. – С. 264–275.
8. Гони, С. Ускоренная карбонизация соли Фриделя в цементной пасте из алюмината кальция / С. Гони, А. Герреро // Исследование цемента и бетона. – 2003. – № 33. – С. 21–26.
9. Чжань, Х. Связь между профилями илиевой смолы в водоотталкивающем обработанном бетоне и эффективностью в качестве хлоридного барьера / Х. Чжань, Ф.Х. Виттман, Т. Чжао // Реставрация зданий и памятников. – 2005. – № 11. – С. 35–45.
10. Ханжич, Л. Взаимосвязь между жидкостной сорбцией и капиллярностью в бетоне. Цемент и бетон / Л. Ханжич, Р. Илич // Исследование цемента и бетона. – 2003. – № 33. – С. 1385–1388.
11. Гласс, Г.К. Теоретическая оценка теста диффузионной ячейки устойчивого состояния / Г.К. Гласс, Н.Р. Буэнфельд // Журнал материаловедения. – 1998. – № 33. – С. 5111–5118.
12. Макдональд, К.А. Экспериментальные измерения скорости диффузии хлорид-ионов с использованием двухсравнительной диффузионной ячейки: эффекты материала и тестовых варивлов / К.А. Макдональд, Д.О. Нортвуд // Исследование цемента и бетона. – 1995. – № 25. – С. 1407–1416.
13. Буэнфельд, Н.Р. Диффузия хлоридов через образцы раствора, обработанные поверхностью / Н.Р. Буэнфельд и Й.З. Чжан // Исследование цемента и бетона. – 1998. – № 28. – С. 665–674.
14. Йоханнессон, Б. Микроструктурные изменения, вызванные карбонизацией цементного раствора / Б. Йоханнессон, П. Утгелант // Исследование цемента и бетона. – 2001. – № 31. – С. 925–931.
15. Нгала, В.Т. Влияние карбонизации на структуру пор и диффузионные свойства гидратированных паст / В.Т. Нгала, К.Л. Пейдж // Исследование цемента и бетона. – 1997. – № 27. – С. 995–1007.
16. Фан, Ю.Х. Влияние карбонизации на микроструктуру затвердевшей цементной пасты и раствора / Ю.Х. Фан, Я.Т. Чжан, У.С. Шнейдер // Журнал Хохайского университета (естественные науки). – 2005. – Т. 33, № 1. – С. 104–107.
17. Леонович, С.Н. Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии / С.Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь : сб. тр. VII Междунар. науч.-метод. семинара / М-во образования Респ. Беларусь, М-во архитектуры Респ. Беларусь, Брестский гос. техн. ун-т, Республиканский образовательный центр, Междунар. образовательный центр СФ БГПА, Белорус. инженерная акад. ; под ред. Н.П. Блещика, А.А. Борисевича, Т.М. Пецольда. – Брест, 2001. – С. 432–434.
18. Леонович, С.Н. Вероятностная оценка коррозии арматуры в существующих железобетонных конструкциях при хлоридной агрессии / С.Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь : сб. тр. VII Междунар. науч.-метод. семинара / М-во образования Респ. Беларусь, М-во архитектуры Респ. Беларусь, Брестский гос. техн. ун-т, Республиканский образовательный центр, Междунар. образовательный центр СФ БГПА, Белорус. инженерная акад. ; под ред. Н.П. Блещика, А.А. Борисевича, Т.М. Пецольда. – Брест, 2001. – С. 435–440.
19. Леонович, С.Н. Железобетон в условиях хлоридной коррозии: деформирование и разрушение / С.Н. Леонович, А.В. Прасол // Строительные материалы. – 2013. – № 5. – С. 94–95.

20. Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии на конструкционный бетон: вероятностная модель / Е.Е. Шалый [и др.] // Вестн. гражданских инженеров. – 2018. – Т. 3, № 68. – С. 123–131. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-123-131.
21. Шалый, Е.Е. Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчета-прогноза срока службы / Е.Е. Шалый, Л.В. Ким, С.Н. Леонович // Вестн. Белгородского гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 6. – С. 5–14. DOI: 10.12737/article_5b115a5ef027c2.76676320.
22. Шалый, Е.Е. Деградация железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии / Е.Е. Шалый, С.Н. Леонович, Л.В. Ким // Строительные материалы. – 2019. – № 5. – С. 67–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72.
23. Leonovich, S.N. Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction / S.N. Leonovich, E.E. Shalyi, L.V. Kim // Science & Technique. – 2019. – Vol. 18, № 14. – С. 284–291. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-284-291.

REFERENCES

1. Tszin', V.L. & Chzhao Y.Kh. (2002). *Dolgovechnost' betonnoi konstruksii*. Pekin: Saiens Press. (In Chinese).
2. Nyu, D.T. (2003). *Prognoz dolgovechnosti i resursa zhelezobetonykh konstruksii*. Pekin: Saiens Press. (In Chinese).
3. Nagesh, M. & Bkhattachardzhi, B. (1998). Modelirovanie diffuzii khloridov v betone i opredelenie koeffitsientov diffuzii. *Zhurnal materialov ACI*, (4), 113–120. (In Russ.).
4. Si, Y. & Bazant, Z. (1999). Modelirovanie proniknoveniya khloridov v nasyshchennyi beton. *Zhurnal materialov v oblasti grazhdanskogo stroitel'stva*, (1), 58–65. (In Russ.).
5. Maslekhuddin, M., Peidzh, K.L. & Rashiduzzafar, Zh.G. (1996). Vliyanie temperaturnogo i solyanogo zagryazneniya na karbonizatsiyu tsementa. *Zhurnal materialov v oblasti grazhdanskogo stroitel'stva*, (2), 63–69. (In Russ.).
6. Nagao, K. & Ueda, T. (2003). Primenenie opresneniya dlya smeshivaniya betona s letuchej zoloi ili domennym shlakom. *Mezhdunarodnyi zhurnal sovremennoi fiziki B*, 17 (8–9), 1452–1457. (In Russ.).
7. Puatatsananon, V. & Sauma, V.E. (2005). Nelineinaya svyaz' karbonizatsii i diffuzii khloridov v betone. *Zhurnal materialov v oblasti grazhdanskogo stroitel'stva*, (3), 264–275. (In Russ.).
8. Goni, S. & Gerrero, A. (2003). Uskorennaya karbonizatsiya soli Fridelya v tsementnoi paste iz alyuminata kal'tsiya. *Issledovanie tsementa i betona*, (33), 21–26. (In Russ.).
9. Chzhan', Kh., Vittman, F.Kh. & Chzhao, T. (2005). Svyaz' mezhdu profilyami ilievoi smoly v vodoottalkivayushchem obrabotannom betone i effektivnost'yu v kachestve khloridnogo bar'era. *Restavratsiya zdanii i pamyatnikov*, (11), 35–45. (In Russ.).
10. Khanzhich, L. & Ilich, R. (2003). Vzaimosvyaz' mezhdu zhidkostnoi sorbtsiei i kapillyarnost'yu v betone. Tsement i beton. *Issledovanie tsementa i betona*, (33), 1385–1388. (In Russ.).
11. Glass, G.K. & Buenfel'd, N.R. (1998). Teoreticheskaya otsenka testa diffuzionnoi yacheiki ustoichivogo sostoyaniya. *Zhurnal materialovedeniya*, (33), 5111–5118. (In Russ.).
12. Makdonal'd, K.A. & Nortvud, D.O. (1995). Eksperimental'nye izmereniya skorosti diffuzii khlorid-ionov s ispol'zovaniem dvukhsravnitel'noi diffuzionnoi yacheiki: efekty materiala i testovykh variblov. *Issledovanie tsementa i betona*, (25), 1407–1416. (In Russ.).
13. Buenfel'd, N.R. & Chzhan, I.Z. (1998). Diffuziya khloridov cherez obratzysy rastvora, obrabotannye poverkhnost'yu. *Issledovanie tsementa i betona*, (28), 665–674. (In Russ.).
14. Iokhannesson, B. & Utgenannt, P. (2001). Mikrostrukturnye izmeneniya, vyzvannye karbonizatsiei tsementnogo rastvora. *Issledovanie tsementa i betona*, (31), 925–931. (In Russ.).
15. Ngala, V.T. & Peidzh, K.L. (1997). Vliyanie karbonizatsii na strukturu por i diffuzionnye svoistva gidratirovannykh past. *Issledovanie tsementa i betona*, (27), 995–1007. (In Russ.).
16. Fan, Y.Kh., Chzhan, Y.T. & Shneider, U.S. (2005). Vliyanie karbonizatsii na mikrostrukтуру zatverdevshei tsementnoi pasty i rastvora. *Zhurnal Khokhaiskogo universiteta (estestvennye nauki)*, 33 (1), 104–107. (In Chinese).
17. Leonovich, S.N. (2001). Algoritm rascheta dolgovechnosti zhelezobetonykh konstruksii pri khloridnoi agressii. In N.P. Bleshchik (Eds.), A.A. Borisevich (Eds.) & T.M. Petsol'd (Eds.) *Perspektivy razvitiya novykh tekhnologii v stroitel'stve i podgotovke kadrov Respubliki Belarus'*: sb. tr. VII Mezhdunar. nauch.-metod. seminar (432–434). Brest: BrGTU. (In Russ.).
18. Leonovich, S.N. (2001). Veroyatnostnaya otsenka korrozii armatury v sushchestvuyushchikh zhelezobetonykh konstruksiyakh pri khloridnoi agressii. In N.P. Bleshchik (Eds.), A.A. Borisevich (Eds.) & T.M. Petsol'd (Eds.) *Perspektivy razvitiya novykh tekhnologii v stroitel'stve i podgotovke kadrov Respubliki Belarus'*: sb. tr. VII Mezhdunar. nauch.-metod. seminar (435–440). Brest: BrGTU. (In Russ.).
19. Leonovich, S.N. & Prasol, A.V. (2013). Zhelezobeton v usloviyakh khloridnoi korrozii: deformirovanie i razrushenie. *Stroitel'nye materialy*, (5), 94–95. (In Russ.).
20. Shalyi, E.E., Leonovich, S.N., Kim, L.V., Rumyantseva, V.E. & Budrevich, N.A. (2018). Sovmestnoe deistvie karbonizatsii i khloridnoi agressii na konstruksionnyi beton: veroyatnostnaya model' [Probabilistic model of the combined effect of carbonization and chloride aggression on structural concrete]. *Vestn. grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 3 (68), 123–131. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-123-131.
21. Shalyi, E.E., Kim, L.V. & Leonovich, S.N. (2018). Zhelezobeton pri vozdeistvii karbonizatsii i khloridnoi agressii: veroyatnostnaya model' rascheta-proгноza sroka sluzhby [Reinforced concrete under influence of carbonization and chloride aggression: probable model of service life calculation]. *Vestn. Belgorodskogo gos. tekhnol. un-ta im. V.G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]*, (6), 5–14. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.12737/article_5b115a5ef027c2.76676320.
22. Shalyi, E.E., Leonovich, S.N. & Kim, L.V. (2019). Degradatsiya zhelezobetonykh konstruksii morskikh sooruzhenii ot sovmestnogo vozdeistviya karbonizatsii i khloridnoi agressii [Degradation of Reinforced Concrete Structures of Marine Works from the Combined Impact of Carbonation and Chloride Aggression]. *Stroitel'nye materialy*, (5), 67–72. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72.
23. Leonovich, S.N., Shalyi, E.E. & Kim, L.V. (2019). Reinforced Concrete under the Action of Carbonization and Chloride Aggression: a Probabilistic Model for Service Life Prediction. *Science & Technique*, 18 (14), 284–291. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-284-291.

**PENETRATION OF CHLORIDES INTO CONCRETE:
ANALYSIS OF EXPERIMENTAL STUDIES**

S. LEONOVICH

(Belarusian National Technical University, Minsk)

E. SHALY

(Engineering School of the Far Eastern Federal University, Vladivostok)

D. LITVINOVSKY

(LLC "Injpetsstroyproekt", Minsk)

A. STEPANOVA

(Belarusian State University of Transport, Gomel)

A. ZHURAVSKAYA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

V. MALYUK

(OOO "Transstroy-Trest", Korsakov)

Reinforced concrete structures are exposed to an aggressive environment. In this case, combined mechanical and environmental impacts can act simultaneously, and their synergistic effects should be taken into account. This article presents and analyzes the test results on two different types of concrete and mortar. The capillary absorption of carbonized and non-carbonized concrete was determined. The influence of mechanical load on capillary suction has been studied. Moderate compressive load reduces the capillary suction coefficient, while capillary suction is enhanced by higher mechanical loads as microcracks form. The diffusion of chlorides was evaluated using a diffusion cell test. The diffusion coefficient in carbonized concrete is an order of magnitude higher than in non-carbonized concrete.

Keywords: *chloride diffusion, capillary absorption, carbonation, combined action.*