

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-269-280>

УДК 691.32 (075.4)

## Долговечность бетона при комбинированном воздействии окружающей среды и механической нагрузки: анализ экспериментальных исследований

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович<sup>1)</sup>, инженеры Е. Е. Шалый<sup>2)</sup>, Д. А. Литвиновский<sup>3)</sup>, А. В. Степанова<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Инженерная школа ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет» (Владивосток, Российская Федерация),

<sup>3)</sup>ООО «ИнжСпецСтройПроект» (Минск, Республика Беларусь),

<sup>4)</sup>Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Сегодня существует несколько методов прогнозирования долговечности железобетонных конструкций. В большинстве случаев учитывается один из доминирующих процессов разрушения – либо карбонизация, либо проникновение хлоридов. Экспериментальные результаты и натурные наблюдения показывают, что это нереалистичный подход. Поэтому необходимо разработать метод определения долговечности бетона при комбинированных воздействиях, т. е. при проникновении в него хлоридов и механической нагрузке. В статье подробно описан экспериментальный метод исследования влияния механической нагрузки на проникновение хлоридов в поровое пространство материалов на основе цемента. Представлен метод испытаний, который позволяет определить реалистичные коэффициенты диффузии хлорид-ионов в бетоне при сжимающем или растягивающем напряжении. В результате проведенных экспериментов определено, что комбинация механических нагрузок и воздействий окружающей среды может быть намного более значимой, чем просто воздействия окружающей среды без влияния механической нагрузки. На самом деле срок службы железобетонных конструкций зависит от множества возможных сочетаний механических нагрузок и воздействий окружающей среды, в том числе циклов замораживания-оттаивания. Так, трещины, образующиеся во время циклического замораживания-оттаивания, должны быть приняты во внимание в испытаниях комбинированного воздействия окружающей среды и механической нагрузки для лучшего понимания и систематического описания влияния такого воздействия на долговечность бетона. Для надежного прогнозирования срока службы железобетонных конструкций необходимо также учитывать влияние приложенного циклического напряжения.

**Ключевые слова:** долговечность бетона, прогноз срока службы, диффузия ионов хлора, напряжение сжатия, напряжение растяжения, комбинированное воздействие

**Для цитирования:** Долговечность бетона при комбинированном воздействии окружающей среды и механической нагрузки: анализ экспериментальных исследований / С. Н. Леонович [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 269–280. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-269-280>

---

### Адрес для переписки

Леонович Сергей Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 368-61-56  
sleonovich@mail.ru

### Address for correspondence

Leonovich Sergey N.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 368-61-56  
sleonovich@mail.ru

## Durability of Concrete under Combined Impact Environment and Mechanical Load: Analysis of Experimental Studies

S. N. Leonovich<sup>1)</sup>, E. E. Shalyi<sup>2)</sup>, D. A. Litvinovskiy<sup>3)</sup>, A. V. Stepanova<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>School of Engineering Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation),

<sup>3)</sup>JSC “EngSpecStroiProject” (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>4)</sup>Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** Today, there are several methods for predicting the durability of reinforced concrete structures. In most cases, one of the dominant destruction processes is taken into account – either carbonization or chloride penetration. Experimental results and field observations show that this is an unrealistic approach. Therefore, it is necessary to develop a method for determining the durability of concrete under combined impacts, i. e. with the penetration of chlorides into it and mechanical load. The paper describes in detail an experimental method for studying the effect of mechanical load on the penetration of chlorides into the pore space of cement-based materials. A test method is presented that makes it possible to determine realistic diffusion coefficients of chloride ions in concrete under compressive or tensile stress. As a result of the experiments carried out, it has been determined that the combination of mechanical loads and environmental influences can be much more significant than just environmental influence without the influence of mechanical loading. In fact, the service life of reinforced concrete structures depends on many possible combinations of mechanical loads and environmental influences, including freeze-thaw cycles. Thus, cracks formed during freeze-thaw cycling should be taken into account in tests of combined environmental and mechanical stress in order to better understand and systematically describe the effect of such exposure on the durability of concrete. For reliable prediction of the service life of reinforced concrete structures, it is also necessary to take into account the influence of the applied cyclic stress.

**Keywords:** concrete durability, service life forecast, diffusion of chloride ions, compression stress, tensile stress, combined impact

**For citation:** Leonovich S. N., Shalyi E. E., Litvinovskiy D. A., Stepanova A. V. (2022) Durability of Concrete under Combined Impact Environment and Mechanical Load: Analysis of Experimental Studies. *Science and Technique*. 21 (4), 269–280. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-269-280> (in Russian)

### Введение

Проектирование несущих строительных конструкций имеет долгую историю. В Европе оно основано на Eurocode 2 [1]. Подобные нормы для проектирования конструкций существуют и в других регионах [2–4]. Типовой кодекс для расчета срока службы [5] составлен аналогично Eurocode 2. В [5] напряжение и механическое сопротивление заменены воздействиями окружающей среды, такими как карбонизация, проникновение хлоридов и циклы замораживания-оттаивания. На основе этой концепции можно сформулировать следующие предельные состояния железобетонных конструкций:

- 1 – иницирование коррозии, вызванное проникновением хлоридов или карбонизацией;
- 2 – растрескивание из-за коррозии стали;
- 3 – отслаивание бетонного покрытия из-за коррозии стали;
- 4 – конструкционные разрушения из-за коррозии арматуры.

Типовой кодекс [5] предлагает четыре варианта расчета срока службы железобетонных конструкций:

- 1 – полностью вероятностный подход;
- 2 – полувероятностный подход;
- 3 – считается удовлетворяющим правилам;
- 4 – недопущение износа.

Безопасность конструкций при воздействии окружающей среды может быть выражена через показатель надежности  $\beta$  аналогично тому, как это принято при проектировании. Фактический срок службы железобетонных конструкций во многих случаях значительно короче проектного [6]: более 20 % мостов в США являются конструктивно несовершенными или функционально устаревшими. Аналогичная ситуация наблюдается во многих промышленно развитых странах, и, как следствие, увеличиваются затраты на техническое обслуживание и ремонт устаревающей инфраструктуры.

Типовой кодекс [5] является значительным шагом вперед, так как долговечность и срок службы железобетонных конструкций учиты-

ваются на этапе проектирования. В соответствии с [5], необходимые параметры материала (обратное сопротивление карбонизации или коэффициент миграции хлоридов) должны определяться в строго обозначенных лабораторных условиях. Однако установлено, что эти параметры также зависят от приложенного напряжения. Скорость проникновения хлоридов может быть удвоена [7, 8] под действием растягивающего напряжения. Следовательно, если не учитывать влияние приложенного напряжения, прогнозирование срока службы железобетонных конструкций будет нереалистичным. Исчерпывающая аннотированная библиография [9] послужила отправной точкой для проводимых авторами статьи исследований.

### Эксперименты и материалы

#### • Подготовка образцов

В серии сравнительных испытаний принимали участие исследовательские группы из пяти мировых лабораторий:

- Китайской академии строительных материалов (СВМА);
- Гентского университета (UGent);
- Делфтского технологического университета (TU Delft);
- Мюнхенского технического университета (TUM);
- Даляньского университета (Dalian University).

Бетонные образцы формировали одинаковыми по размерам и геометрии с использованием портландцемента типа I. В свежий бетон добавляли необходимое количество поликарбоксилатного суперпластификатора для осадки конуса 15 см. Для испытаний на сжатие и растяжение изготавливали соответственно призмы размера  $100 \times 100 \times 400$  мм и образцы-гантели (рис. 1).

Внутренние поверхности форм покрывали тонкой тефлоновой пленкой, чтобы избежать водоотталкивающего эффекта расплывчатого масла. После изготовления образцы хранили под полиэтиленовой пленкой в течение 24 ч в помещении с температурой  $20^\circ\text{C}$  и относительной влажностью около 95 %. Затем образцы извлекали из форм и оставляли в воде при  $20^\circ\text{C}$  до проведения испытаний.

Образцы вынимали и свободную воду с поверхностей удаляли сухим полотенцем, после чего поверхность сразу же запечатывали двумя слоями самоклеящейся алюминиевой фольги. Окно размерами  $80 \times 160$  мм<sup>2</sup> на одной формованной боковой поверхности оставляли открытым, а свободную поверхность временно предохраняли от высыхания до момента присоединения бака с раствором соли. Пластмассовый бак внутренними размерами  $80 \times 160 \times 50$  мм приклеивали или прижимали к образцу, закрывая открытое окно. Как только пластиковый бак был заполнен раствором соли, хлорид мог проникнуть в бетон путем диффузии. Из-за неполного насыщения и дальнейшей гидратации цемента полностью избежать капиллярной абсорбции не удалось. Тем не менее коэффициент диффузии, полученный из профилей хлорида в этом эксперименте, характеризует диффузию хлорида в насыщенный бетон. Для прогнозирования проникновения хлоридов в реальные бетонные конструкции необходимо учитывать климатические условия окружающей среды.

Прочность бетонных призм на сжатие определяли в возрасте 28 сут. Результаты, приведенные в табл. 1, демонстрируют широкий диапазон значений прочности на сжатие. Прочность на растяжение образцов-гантелей в возрасте 28 сут., определенная в СВМА, составила 3,3 МПа.

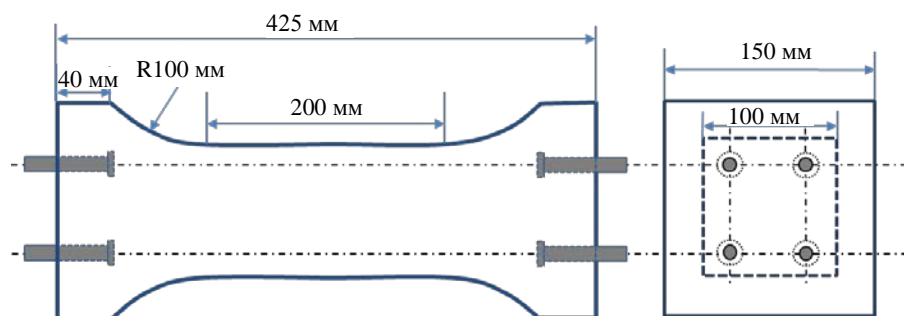


Рис. 1. Форма и размеры образца-гантели для испытаний на растяжение [9]

Fig. 1. Shape and dimensions of sample-dumbbell for tensile testing [9]

Прочность на сжатие бетонных призм, изготовленных в пяти разных лабораториях, в возрасте 28 сут.

Compressive strength of concrete prisms, made in five different laboratories, at the age of 28 days

Лаборатория	CBMA	UGent	TU Delft	TUM	Dalian University
Прочность, МПа	36,6	56,9	40,7	34,0	26,2

### Методы испытаний

**Образцы при сжатии.** К бетонным образцам-призмам прикладывали сжимающее напряжение с помощью испытательного стенда, показанного на рис. 2 [10]. Коэффициент напряжения сжатия (отношение приложенного напряжения к прочности на сжатие) составлял 0, 30 и 60 %. Трехпроцентный водный раствор хлорида натрия циркулировал через прилагаемую пластиковую емкость с заданной скоростью потока ( $5 \pm 1$ ) мл/с. Концентрацию раствора проверяли регулярно – не реже одного раза в неделю в течение всего периода экспозиции. Раствор хлорида изолировали от испарения и загрязнения. Для определения профиля хлоридов образцы разгружались после воздействия в течение 2, 6, 18 и 36 недель.

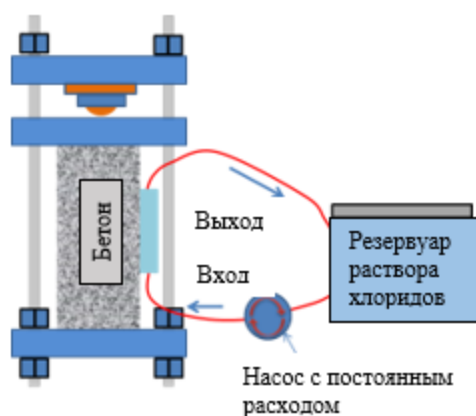


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения диффузии хлоридов в бетон при сжатии [10]

Fig. 2. Scheme of experimental setup to determine diffusion of chlorides into concrete during compression [10]

**Образцы под растягивающим напряжением.** Для приложения заданного растягивающего напряжения разработана специальная испытательная установка. Чтобы выполнить соединение образцов-гантелей с установкой, до формования на каждом конце формы были закреплены четыре болта (рис. 1). С помощью четырех болтов две стальные соединительные пластины на обоих концах образцов-гантелей скреплялись со сферическими шарнирами испытатель-

ного стенда (рис. 3), что позволило избежать эксцентриситета растянутых образцов (можно использовать аналогичные испытательные стенды, работающие по такому же принципу). Были выбраны следующие отношения приложенного растягивающего напряжения к предельному растягивающему напряжению: 0, 50 и 80 % [11]. Установку для циркуляции раствора хлорида на поверхности бетона, аналогичную приведенной на рис. 2, приставили к открытым окнам гантельных образцов. Скорость потока была такой же, как при испытаниях на сжатие. Циркуляцию солевого раствора остановили, а образцы-гантели разгрузили после выдержки в течение 2, 6, 18 и 36 недель. По истечении данных периодов определяли профили хлоридов в бетонных образцах.



Рис. 3. Схема экспериментальной установки для испытаний на растяжение [11]

Fig. 3. Scheme of experimental setup for tensile testing [11]

### Определение профилей хлоридов

Сначала с разгруженных образцов сняли пластиковый бак. Бетонная поверхность была защищена от высыхания до начала процесса фрезерования, так как высыхание изменило бы профиль хлоридов. Образцы порошка с поверхности экспонирования всех образцов получали ступенчатым фрезерованием слоев толщиной от 1 до 2 мм. Количество и толщину

слоев регулировали в соответствии с ожидаемым профилем содержания хлоридов. На нисходящей ветви профиля должно быть не менее восьми точек измерения. Во избежание краевых эффектов и влияния на результаты испытаний клея самоклеящейся алюминиевой фольги отбор проб производили на участке на расстоянии 10 мм от границы зоны воздействия. Частицы диаметром более 1 мм могут присутствовать в порошке, который получают размалыванием или дроблением с последующим измельчением. В этом случае необходимо обеспечить достаточное время экстракции хлорида из порошка. Содержание хлоридов, растворенных в кислоте, определяли химическим анализом в соответствии с EN 14629 [12]. Рекомендуется проводить испытания не менее трех раз и выбирать средние значения коэффициента диффузии ионов хлора.

## Результаты испытаний

### • Влияние сжимающих напряжений

*Профили хлоридов при коэффициентах сжимающих напряжений 0 и 30 %.* Профили хлоридов, составленные в разных лабораториях при коэффициентах напряжений 0 и 30 %,

представлены на рис. 4–7. Результаты, полученные в UGent, показаны отдельно на рис. 4, 5 из-за разного времени экспозиции и большего количества точек для профиля. Последнее важно для длительных периодов диффузии и высоких коэффициентов нагрузки. По рисункам можно оценить разброс значений одной лаборатории, поскольку показаны профили на двух аналогичных образцах.

Как видно из рис. 4, 5, на всех профилях хлоридов наблюдается плавное уменьшение содержания хлоридов по мере удаления от поверхности. Однако вблизи поверхности заметен больший разброс. При достаточно длительном времени экспозиции наблюдается своего рода плато. Это подчеркивает известный факт, что проникновение хлоридов нельзя объяснить чистой диффузией. Ряд различных механизмов переноса, таких как капиллярная абсорбция, химические реакции с пористой матрицей, процессы сорбции на поверхности продуктов гидратации, способствуют переносу ионов в поровое пространство бетона. Согласно рис. 5, под действием приложенного сжимающего напряжения в бетон проникает значительно меньше хлоридов.

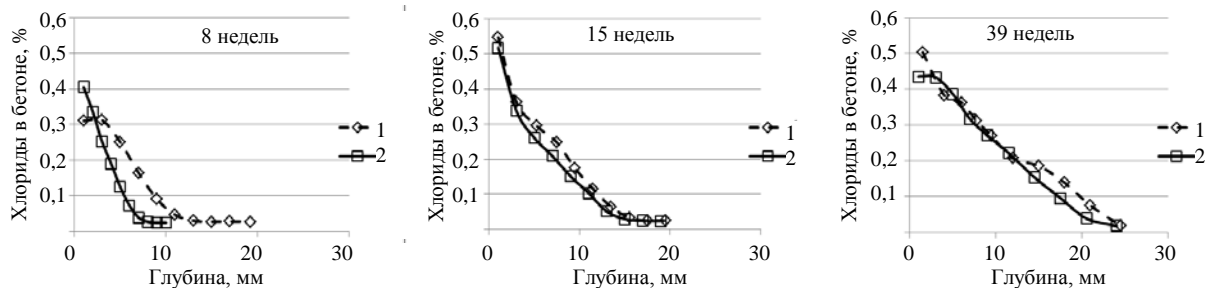


Рис. 4. Профили хлоридов, полученные в UGent, через 8, 15 и 39 недель на образцах бетона 1 и 2 без приложенного напряжения [9]

Fig. 4. UGent chloride profiles at 8, 15 and 39 weeks on concrete samples 1 and 2 without applied voltage [9]

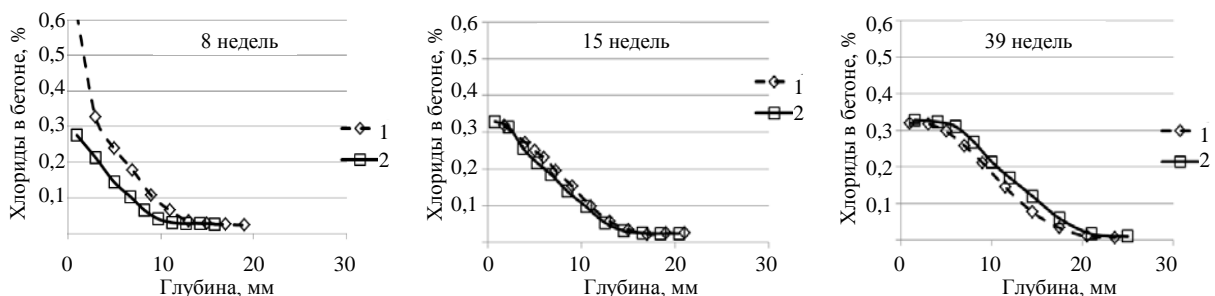


Рис. 5. Профили хлоридов, полученные в UGent, через 8, 15 и 39 недель на образцах бетона 1 и 2 при коэффициенте нагрузки 30 % [9]

Fig. 5. UGent chloride profiles at 8, 15 and 39 weeks on concrete samples 1 and 2 at load factor 30 % [9]

На рис. 6 и 7 показаны профили хлоридов, полученные на ненагруженных образцах и на бетонных призмах при коэффициенте нагрузки 30 % другими четырьмя лабораториями, участвовавшими в серии сравнительных испытаний. Наблюдается большой разброс профилей хлоридов, поскольку прочность на сжатие испытанных образцов бетона различна. Кроме того, значения получены при содержании водораство-

римых хлоридов, в то время как другие значения были получены кислотной экстракцией [9].

Профили хлоридов при коэффициенте сжимающих напряжений 60 %. На рис. 8 показаны типичные профили при напряжении сжатия 60 %. Плато строится на малом расстоянии от поверхности, поэтому не может быть простым диффузионным процессом у поверхности. Значения правее вертикальных линий могут служить мерой функции ошибок.

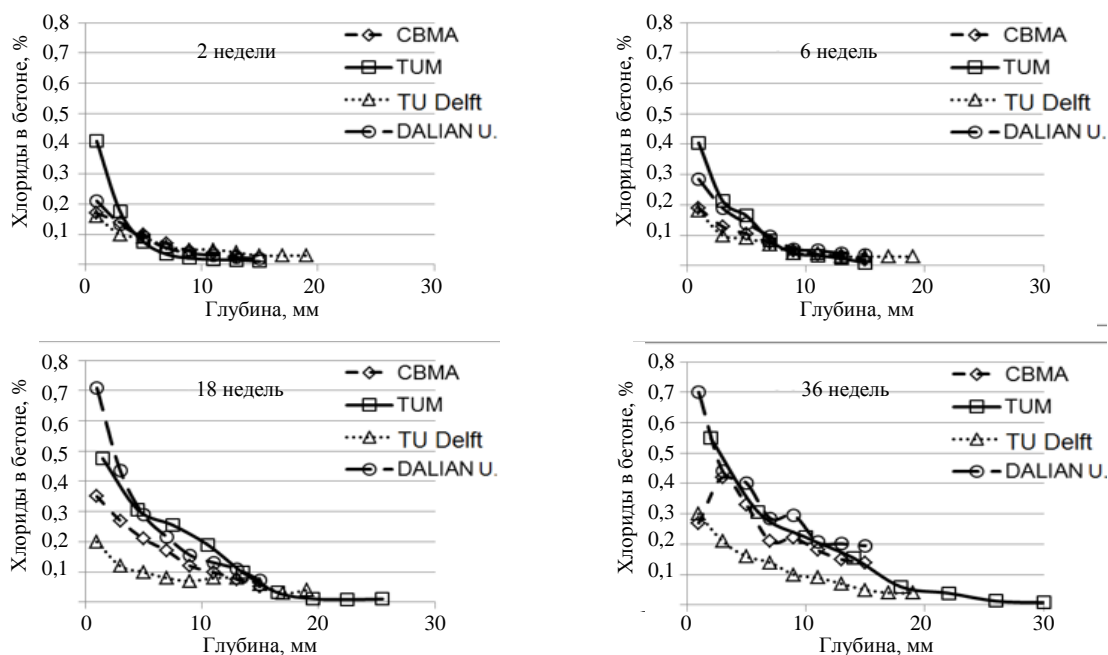


Рис. 6. Профили хлоридов после экспозиции в течение 2, 6, 18 и 36 недель на ненагруженных образцах  
 Fig. 6. Chloride profiles after exposure for 2, 6, 18 and 36 weeks on unloaded samples

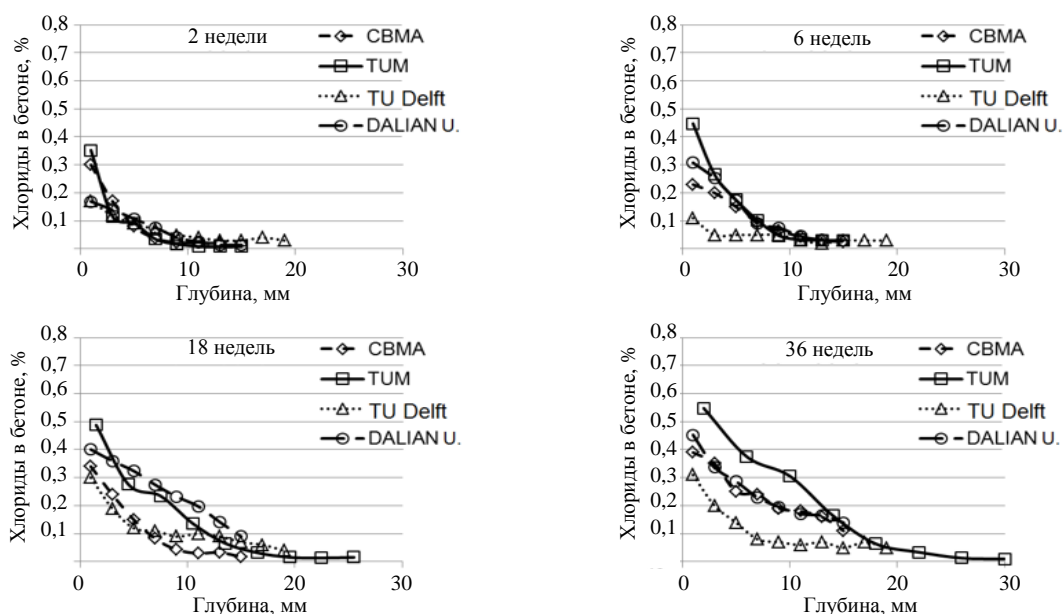


Рис. 7. Профили хлоридов после экспозиции в течение 2, 6, 18 и 36 недель при коэффициенте нагрузки 30 % [9]  
 Fig. 7. Chloride profiles after exposure for 2, 6, 18 and 36 weeks at load factor of 30 % [9]

Результаты исследований подтверждают, что проникновение хлоридов не является чисто диффузионным действием. Определение коэффициента диффузии сводится к упрощению сложного процесса, но полученные значения можно использовать для сравнения проникновения хлоридов в различные типы бетона.

Профили хлоридов при коэффициенте нагрузки 60 % показаны на рис. 9 [9], где наблюдается большой разброс в схемах. Среди прочего, это связано с разным качеством испытанных бетонных образцов (табл. 1). Тем не менее подгонку данных под второй закон Фика можно считать разумным приближением. Информация о том, как выполнять процедуру подгонки, приведена в [13]. Рекомендации и оценка профиля хлоридов описаны в [11].

*Коэффициенты диффузии и поверхностные концентрации по хлоридным профилям.* Расчет этих показателей производили путем подгонки кривой согласно [13]. Большой разброс значений связан с тем, что качество испытываемого бетона было неодинаковым.

В течение экспозиции коэффициенты диффузии уменьшаются, в то время как расчетные поверхностные концентрации увеличиваются. Все значения коэффициентов диффузии имеют тенденцию стабилизироваться на величинах  $(3-4) \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$  при длительном времени воздействия (36 недель). Расчетная поверхностная концентрация стабилизируется на уровне 0,5 % для 36 недель воздействия.

При приложенном напряжении 30 % от предельной разрушающей нагрузки коэффициенты диффузии были такими же или меньше, чем в ненагруженном состоянии. При напряжении 60 % от предельной разрушающей нагрузки ситуация была неоднозначной, и в разных лабораториях получали либо одинаковые, либо более высокие/низкие коэффициенты диффузии. В некоторых случаях образование зоны конвекции вблизи поверхности было заметным, как показано на рис. 8, 9. Таким образом, полученные данные частично согласуются с утверждением, что диффузия хлоридов при умеренной сжимающей нагрузке замедляется, но увеличивается, если приложенное напряжение превышает половину предельной нагрузки [9].

#### • Влияние растягивающих напряжений

*Профили хлоридов при коэффициентах растягивающих напряжений 0, 50 и 80 %.* Профили хлоридов, определенные на образцах бетона при растягивающих напряжениях, показаны на рис. 10. Профили фиксировались после воздействия в течение 2, 6, 10, 18 и 36 недель. Очевидно, что содержание хлоридов неуклонно повышается с увеличением периода выдержки, а также оно становится значительно больше за счет приложенного растягивающего напряжения. Этот результат ожидаем, поскольку поровое пространство (микротрещины) расширяется под действием растягивающего напряжения.

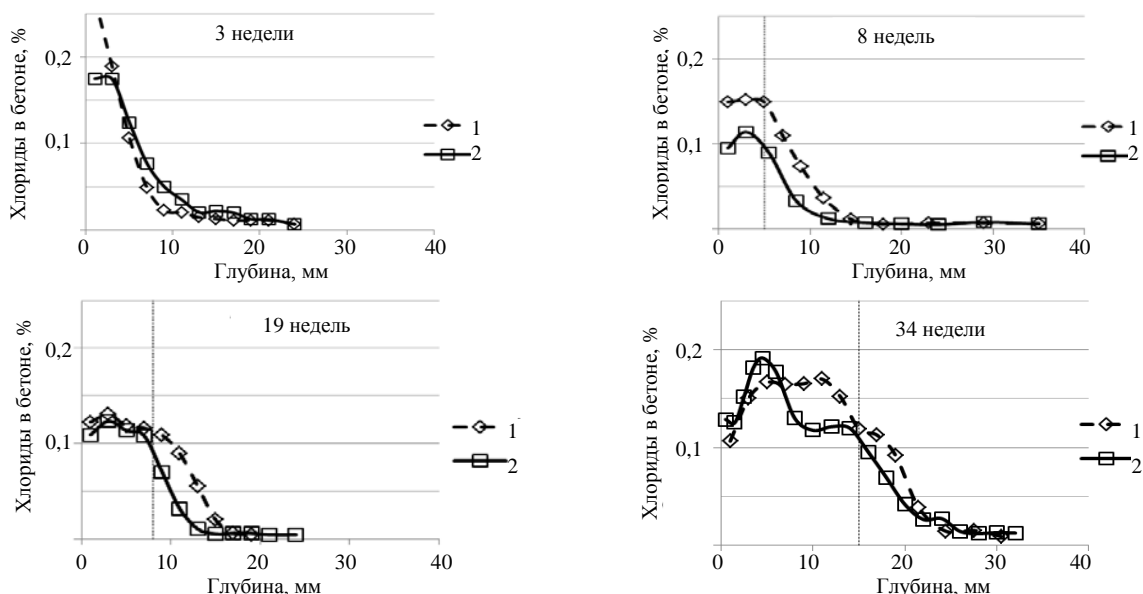


Рис. 8. Профили хлоридов образцов 1 и 2 после экспозиции в течение 3, 8, 19 и 34 недель при коэффициенте нагрузки 60 %

Fig. 8. Chloride profiles of samples 1 and 2 after exposure for 3, 8, 19 and 34 weeks at load factor of 60 %



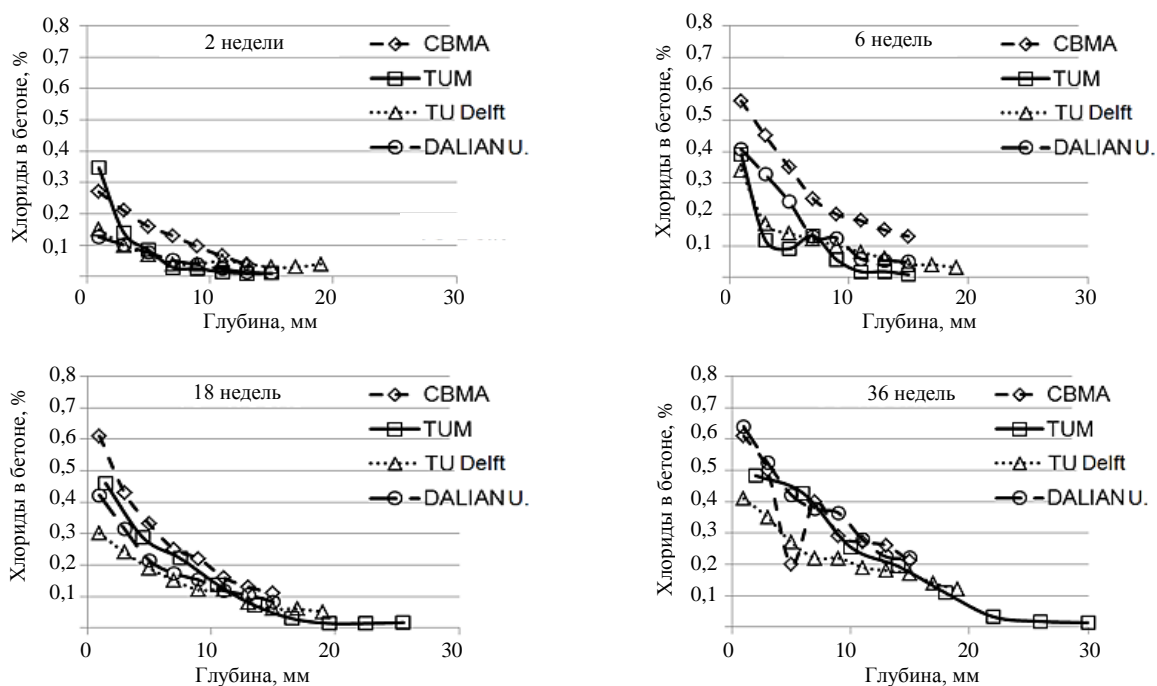


Рис. 9. Профили хлоридов после экспозиции в течение 2, 6, 18 и 36 недель при коэффициенте нагрузки 60 % [9]  
 Fig. 9. Chloride profiles after exposure for 2, 6, 18 and 36 weeks at load factor of 60 % [9]

Коэффициенты диффузии и поверхностные концентрации, измеренные при приложенных растягивающих напряжениях. Проникновение хлорида в бетон представляет собой сложный процесс, который моделируется реактивной диффузией и комбинацией нескольких меха-

низмов переноса. Это необходимо иметь в виду при определении коэффициентов диффузии. На рис. 11 показаны коэффициенты диффузии ионов хлора  $D$  и расчетные поверхностные концентрации бетона  $C_s$  при воздействии растягивающих напряжений.

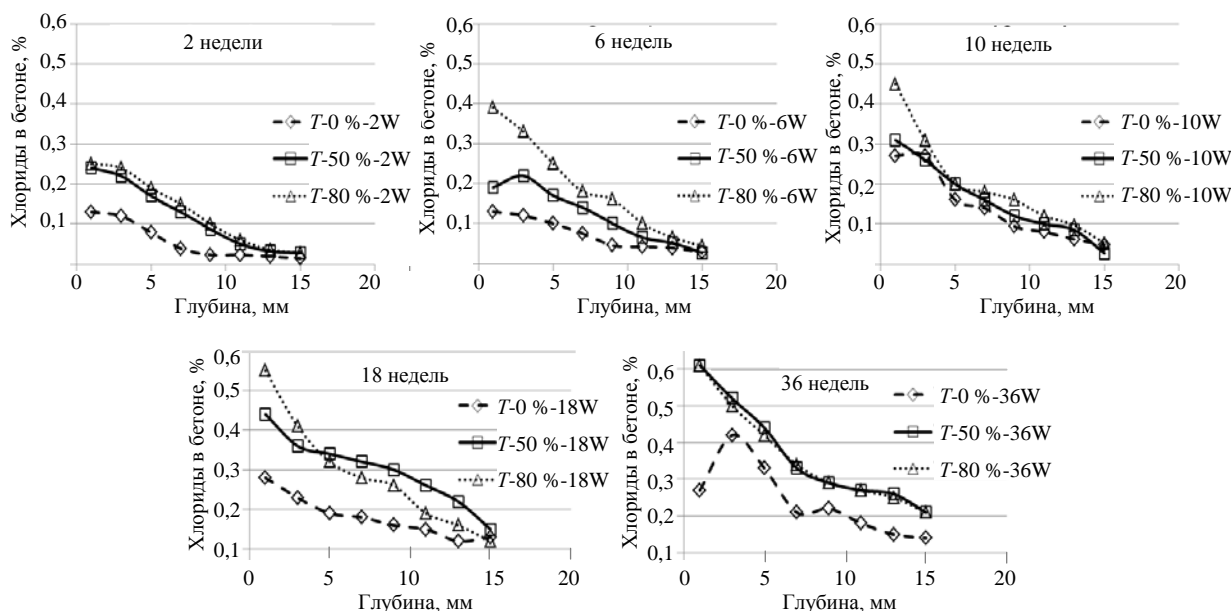


Рис. 10. Профили хлоридов через 2, 6, 10, 18 и 36 недель при коэффициентах растягивающих напряжений  $T$ , равных 0, 50 и 80 %  
 Fig. 10. Chloride profiles at 2, 6, 10, 18 and 36 weeks at stretch ratios voltages  $T$ , equal to 0, 50 and 80 %



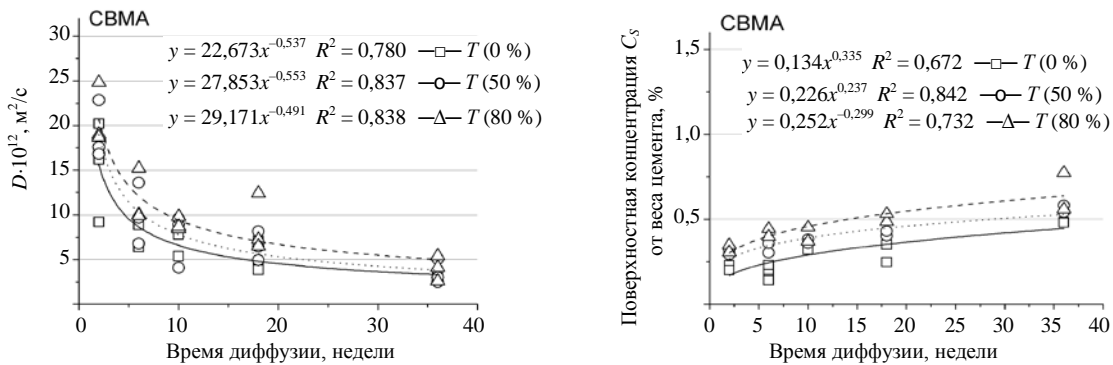


Рис. 11. Коэффициенты диффузии ионов хлора и расчетные поверхностные концентрации бетона при воздействии растягивающих напряжений  $T$ , равных 0, 50 и 80 %

( $x$  – время диффузии, недели;  $y$  – функция поверхностной концентрации ионов хлора;  $R^2$  – среднее квадратичное отклонение)

Fig. 11. Diffusion coefficients of chlorine ions and calculated surface concentrations of concrete under influence of tensile stresses  $T$ , equal to 0, 50 and 80 %

( $x$  – diffusion time, weeks;  $y$  – surface concentration function of chloride ions;  $R^2$  – root-mean-square deviation)

Коэффициент диффузии бетона при растяжении увеличивается с повышением коэффициента напряжения, но значительно уменьшается с увеличением времени воздействия. Приложенное растягивающее напряжение ускоряет диффузию хлоридов в бетон. Несмотря на большой разброс, расчетная поверхностная концентрация несколько повышается с увеличением времени экспозиции.

### Моделирование и прогноз

#### • Моделирование

Железобетонные конструкции при воздействии противогололедной соли или морской воды повреждаются в результате коррозии арматуры. В типовом кодексе [5] для расчета срока службы бетона представлена модель проникновения хлоридов с целью прогнозирования вероятности начала коррозии арматуры в зависимости от времени воздействия агрессивной среды. Данная модель учитывает достижение критического содержания хлоридов на глубине армирования в зависимости от характеристик бетона и воздействия хлоридов. Согласно [5] и [14], диффузию хлоридов в бетон можно моделировать с помощью уравнений (1), (2) и (3), приведенных в [14]. Авторы настоящей статьи выражение (2) из [14] дополнили так называемым коэффициентом напряжения  $k_i$ , который учитывает напряженное состояние элемента конструкции:

$$C(c_{nom}, t_{SL}) = C_i + (C_s + C_i) \left[ erf \left( \frac{c}{\sqrt{D_{app,A}(t_0)t}} \right) \right]; \quad (1)$$

$$D_{app,A}(t) = k_e k_i D_{app}(t_0) \left( \frac{t_0}{t} \right)^{\alpha_A}, \quad (2)$$

где  $c_{nom}$  – номинальный защитный слой бетона;  $t_{SL}$  – расчетный срок службы железобетонной конструкции;  $C_i$  – исходное содержание хлоридов;  $C_s$  – поверхностная концентрация;  $c$  – защитный слой бетона;  $D_{app,A}$  – кажущийся коэффициент диффузии хлоридов;  $t_0$  – точка отсчета во времени;  $t$  – время;  $\alpha_A$  – показатель старения конструкции;  $k_e$  – передаточный параметр, определяемый по формуле

$$k_e = \exp \left( b_e \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right), \quad (3)$$

$b_e$  – температурный коэффициент;  $T_{ref}$  – эталонная температура;  $T_{real}$  – температура элемента конструкции или окружающего воздуха.

В исследованиях авторов срок службы или время до начала коррозии приведены соответственно для бетонных компонентов в ненагруженном состоянии, в отличие от бетонных компонентов, находящихся под сжимающими и растягивающими нагрузками. Пример [14], который в настоящей статье пересчитан для нагруженных бетонных элементов, представляет типичное воздействие XS2 (элемент, погруженный в морскую воду) в Европе (бетон СЕМ I с В/Ц = 0,45, без нагрузки). Большинство входных параметров модели, особенно переменные, характеризующие воздействия на окружающую среду, были взяты из [14]. Однако входные переменные, описывающие бетонный материал ( $D_{app(t)}$ ), получены из опытов, проведенных

авторами. Характеристики материалов, использованных при повторном расчете, – это средние данные всех лабораторий, участвовавших в экспериментальной программе. Средние коэффициенты диффузии, определенные через 6 недель ( $t_0 = 0,115$  года) для ненагруженных образцов, считались эталонным значением, составившим  $6,52 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с, стандартное отклонение составило  $2,88 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с (табл. 2). Все остальные условия нагрузки принимали с учетом значений коэффициента напряжения  $k_i$ : 1,00 – для эталона; 0,80 и 1,17 – для отношения напряжений сжатия 0,3 и 0,6 соответственно; 1,25 и 1,53 – для отношения напряжений растяжения 0,5 и 0,8 соответственно.

Таблица 2

**Входные параметры для прогноза срока службы железобетонных конструкций**  
**Input parameters for life prediction of reinforced concrete structures**

Параметр	Тип распределения	Значение	Средне-квадратичное отклонение	Показатель старения $a$	Температурный коэффициент $b$
$D_{app}(t_0) \times 10^{-12}$ , м <sup>2</sup> /с	Нормальный	6,52	2,88	–	–
$\alpha_A$	Бета	0,39	0,18	0	1
$t_0$ , ГОДЫ	Постоянный	0,115	–	–	–
$t_s$ , ГОДЫ		50	–	–	–
$T_{ref}$ , К		293	–	–	–
$T_{real}$ , К	Нормальный	288	5,0	–	–
$b_e$ , К		4800	700	–	–
$C_{S,\Delta}$ , % (поверхностная концентрация)	Логнормальный	3,0	1,0	–	–
$\Delta x$ , мм	Постоянный	0	–	–	–
$C_{crit}$ , % (критическая поверхностная концентрация)	Бета	0,6	0,15	0,2	2,0
$c$ , мм	Нормальный	50	6	–	–

Чтобы определить показатель возраста, период экспозиции должен быть как можно больше, но не менее двух лет. В рассматриваемом исследовании максимальное время воздействия составило 36 недель. Всего было исследовано 15 серий (рис. 10). Расчет выполняли согласно [14], где содержатся общие входные параметры в соответствии с [5].

• Прогноз

Расчетная надежность бетонных элементов, подверженных воздействию хлоридов в ненагруженных условиях при сжимающем и растягивающем напряжениях, представлена на рис. 12 [1].

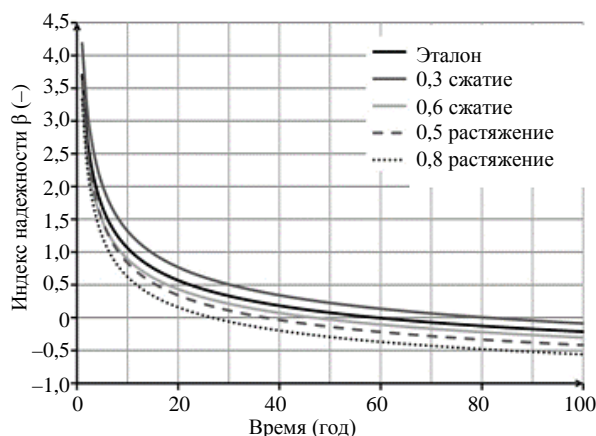


Рис. 12. Расчетная надежность бетонных элементов при воздействии хлоридов без нагрузки при сжатии и растяжении

Fig. 12. Design reliability of concrete elements when exposed to chlorides without load in compression and tension

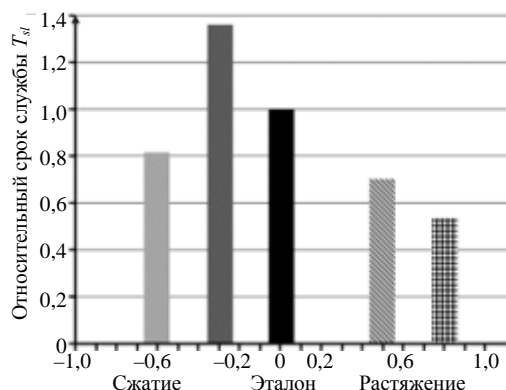


Рис. 13. Относительный срок службы  $T_{sl}$  бетонных элементов при воздействии хлоридов без нагрузки (эталон) и с нагрузкой на сжатие и растяжение

Fig. 13. Relative service life (relative to  $T_{sl}$ ) of concrete elements exposed to chlorides without load (reference) and with load in compression and tension

Чтобы определить численные показатели влияния условий нагружения на срок службы железобетонных элементов (рис. 13), было принято, что конец срока службы достигается при надежности менее минимального значения 0,5. На основании этого срок службы для ненагруженного и нагруженного образцов бетона определен для каждого отдельного расчета, представленного пятью лабораториями. Срок службы элементов с приложенным сжимающим напряжением 30 % увеличился на 36 % по сравнению с эталоном, а с приложенным сжимающим напряжением 60 % сократился на 18 % по сравнению с ненагруженными элементами. Если прикладывалось растягивающее напряжение, срок службы уменьшался по сравнению с эталоном: на 30 % – для элементов с приложенным растягивающим напряжением 50 %

и на 47 % – с приложенным растягивающим напряжением 80 %. Отмечено, что при коэффициенте сжимающего напряжения 60 % только две из пяти лабораторий обнаружили заметное увеличение коэффициента диффузии. Это связано с сокращением срока службы железобетонной конструкции. Другие лаборатории отметили незначительное уменьшение величины коэффициента диффузии. Из представленных в статье данных можно сделать вывод, что потребуются дальнейшие испытания для получения более точной информации о влиянии условий нагружения на срок службы железобетонных элементов.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что для обеспечения надежности железобетонных конструкций их напряженное состояние следует учитывать в расчете долговечности и срока службы.

2. С учетом механических нагрузок и агрессивных воздействий обозначена новая область исследований реалистичного и надежного расчета долговечности и срока службы железобетонных конструкций. Отмечено влияние приложенного напряжения на диффузию хлоридов, предложены методы испытаний для определения диффузии хлоридов в бетон. Полученные результаты позволяют оценить влияние приложенной нагрузки на железобетонные элементы, их прочность и срок службы в условиях воздействия хлоридсодержащей среды. Используя предлагаемый метод испытаний, следует учитывать специфическое поведение различных типов бетона под воздействием нагрузки.

3. Подробно описан экспериментальный метод исследования влияния механической нагрузки на проникновение хлоридов в поровое пространство бетонных материалов. На самом деле срок службы железобетонных конструкций зависит от множества возможных сочетаний механических нагрузок и воздействий окружающей среды, в том числе циклов замораживания-оттаивания. Морозостойкость детально изучалась на протяжении четырех последних десятилетий [15, 16]. Трещины, образующиеся во время циклического замораживания-оттаивания, должны быть приняты во внимание в будущих испытаниях комбинированного воздействия окружающей среды и механической нагрузки [17–20] для лучшего понимания и систематического описания влияния комбинированной механической нагрузки с учетом воздействия окружающей среды на долговечность.

4. В дальнейшем потребуются изучение влияния приложенного напряжения на скорость карбонизации и морозостойкость. В данном

случае понадобится провести аналогичную серию испытаний на бетоне при карбонизации для разработки стандартного метода, который позволит определить влияние приложенного растягивающего или сжимающего напряжения на скорость карбонизации.

5. Для реалистичного и надежного прогнозирования срока службы необходимо также учитывать влияние приложенного циклического напряжения. Однако пока имеются очень ограниченные данные, относящиеся к этой теме [9].

## ЛИТЕРАТУРА

1. EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1–1: General Rules and Rules for Buildings [Electronic Resource]. European Committee for Standardization, 2004. Mode of access: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>.
2. ACI 318–14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary [Electronic Resource]. American Concrete Institute, 2014. Mode of access: <http://aghabaie.usc.ac.ir/files/1506505203365.pdf>.
3. Standard Specifications for Concrete Structures – 2007 “Design”. JSCE Guidelines for Concrete No 15 [Electronic Resource]. Japan Society of Civil Engineers, 2007. Mode of Access: [https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15\\_Standard\\_Specifications\\_Design\\_1.0.pdf](https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15_Standard_Specifications_Design_1.0.pdf).
4. GB 50010-2002 Code for Design of Concrete Structures. China Building Science Academy, 2010.
5. Model Code for Service Life Design / P. Schießl [et al.]. International Federation for Structural Concrete, 2006. 116 p. (Fib Bulletin No 34).
6. 2013 Report Card for America’s Infrastructure. ASCE. [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.api.org/~media/energyinfrastructure/images/rail/related-documents/report-card-for-americas-infrastructure.pdf>.
7. Influence of Combined Actions on Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures Exposed to Aggressive Environment / F. H. Wittmann [et al.] // Restoration of Buildings and Monuments. 2012. No 18. P. 105–112. <https://doi.org/10.1515/rbm-2012-6510>.
8. Wan, X. Influence of Mechanical Load on Service Life of Reinforced Concrete Structures under Dominant Influence of Carbonation / X. Wan, F. H. Wittmann, T. Zhao // Restoration of Buildings and Monuments. 2011. No 17. P. 103–110. <https://doi.org/10.1515/rbm-2011-6437>.
9. Yao, Y. Report rep043: Publications on Durability of Reinforced Concrete Structures under Combined Mechanical Loads and Environmental Actions : An Annotated Bibliography [Electronic Resource] / Y. Yao, L. Wang, F. H. Wittmann // RILEM. 2013. Mode of access: <https://www.rilem.net/publication/publication/427>.
10. Measurement of Time-Dependent Strains of Concrete. Materials and Structures: RILEM TC 107-CSP. Recommendation // Materials and Structures. 1998. Vol. 31. P. 507–512.
11. Influence of Applied Stress on Chloride Diffusion. Submitted to Materials and Structures: RILEM TC 246-TDC. Recommendation. Recommendation of RILEM TC 246-TDC: Test Methods to Determine Durability of Concrete Under Combined Environmental Actions and Mechanical Load / Y. Yao [et al.] // Materials and Structures. 2017. Vol. 50. P. 155. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1000-3>.
12. CEN EN 14629 Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Test Methods – Determination of Chloride Content in Hardened Concrete. European Committee for Standardization (CEN), 2007. 14 p.

13. EN 12390-11 Testing Hardened Concrete – Part 11: Determination of the Chloride Resistance of Concrete, Unidirectional Diffusion. Dansk Standardiseringsrad (DS), 2015. 35 p.
14. Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards: Durability of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides / M. Bartholomew [et al.]. International Federation for Structural Concrete, 2015. 191 p. (Fib Bulletin No 76). <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0076>.
15. Setzer M. J. CDF Test – Test Method for the Freeze Thaw and Deicing Resistance of Concrete – Tests with Sodium Chloride (CDF). RILEM TC 117-FDC. Recommendation / M. J. Setzer, G. Fagerlund, D. J. Janssen // *Materials and Structures*. 1996. Vol. 29. P. 523–528.
16. ISO 5725-1. 1994 Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results. International Organization for Standardization (ISO), 1998. 28 p.
17. Setzer, M. J. Development of the Micro-Ice-Lens Model / M. J. Setzer, R. Auberg, H.-J. Keck // International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete. RILEM Publications SARL, 2002. P. 133–145.
18. Леонович, С. Н. Практическая методика экспериментального определения остаточной морозостойкости бетона, эксплуатируемых конструкций / С. Н. Леонович, Омар А. М. Аль-Факих // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. 2004. № 1. С. 125–128.
19. Леонович, С. Н. Оценка остаточной морозостойкости бетона эксплуатируемых конструкций методом отрыва со скалыванием / С. Н. Леонович // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. № 6. С. 75–82.
20. Леонович, С. Н. Оценка морозостойкости методами механики разрушения / С. Н. Леонович, К. А. Пирадов // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 3. С. 134–136.
- Environment. *Restoration of Buildings and Monuments*, (18), 105–112. <https://doi.org/10.1515/rbm-2012-6510>.
8. Wan X., Wittmann F. H., Zhao T. (2011) Influence of Mechanical Load on Service Life of Reinforced Concrete Structures under Dominant Influence of Carbonation. *Restoration of Buildings and Monuments*, (17), 103–110. <https://doi.org/10.1515/rbm-2011-6437>.
9. Yao Y., Wang L., Wittmann F. H. (2013) Report rep043: Publications on Durability of Reinforced Concrete Structures under Combined Mechanical Loads and Environmental Actions: An Annotated Bibliography. *RILEM*. Available at: <https://www.rilem.net/publication/publication/427>.
10. Measurement of Time-Dependent Strains of Concrete. Materials and Structures: RILEM TC 107-CSP. *Materials and Structures*. 1998, 31, 507–512.
11. Yao Y., Wang L., Wittmann F. H., Schlangen E., Gehlen C., Wang Z., Alava H. E., Cao Y., Yunus B., Li J. (2017) Recommendation of RILEM TC 246-TDC: Test Methods to Determine Durability of Concrete under Combined Environmental Actions and Mechanical Load. *Materials and Structures*, 50, 155. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1000-3>.
12. CEN EN 14629 *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Test Methods – Determination of Chloride Content in Hardened Concrete*. European Committee for Standardization (CEN), 2007. 14.
13. EN 12390-11 Testing Hardened Concrete – Part 11: Determination of the Chloride Resistance of Concrete, Unidirectional Diffusion. Dansk Standardiseringsrad (DS), 2015. 35.
14. Bartholomew M., Edvardsen C., Ferreira M., von Greve-Dierfeld S., Gulikers J., Helland S., Markeset G., McKenna P., Papworth F., Pielstick B., Rahimi A. (2015) *Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards: Durability of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides*. *Fib Bulletin No 76*. International Federation for Structural Concrete. 191. <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0076>.
15. Setzer M. J., Fagerlund G., Janssen D. J. (1996) CDF Test – Test Method for the Freeze Thaw and Deicing Resistance of Concrete – Tests with Sodium Chloride (CDF). RILEM TC 117-FDC. *Materials and Structures*, 29, 523–528.
16. ISO 5725-1. 1994 Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results. International Organization for Standardization (ISO), 1998. 28.
17. Setzer M. J., Auberg R., Keck H.-J. (2002) Development of the Micro-Ice-Lens Model. *International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete*. RILEM Publications SARL, 133–145.
18. Leonovich S. N., Al-Fakikh O. A. M. (2004) Residual Frost Resistance of concrete of Operated Structures *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i Arkhitektura = Bulletin of the Brest State Technical University. Series: Construction and Architecture*, (1), 125–128 (in Russian).
19. Leonovich S. N. (2009) Evaluation of the Residual Frost Resistance of Concrete of Operated Structures by the Method of Separation with Chipping. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo = News of Higher Education Institutions. Construction*, (6), 75–82 (in Russian).
20. Leonovich S. N., Piradov K. A. (2009) Evaluation of Frost Resistance by Methods of Fracture Mechanics. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*, (3), 134–136 (in Russian).

Поступила 01.02.2022

Подписана в печать 06.04.2022

Опубликована онлайн 29.07.2022

## REFERENCES

1. EN 1992-1-1 *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization, 2004. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>.
2. ACI 318-14 *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute, 2014. Available at: <http://aghababaie.usc.ac.ir/files/1506505203365.pdf>.
3. *Standard Specifications for Concrete Structures – 2007 “Design”*. JSCE Guidelines for Concrete No 15. Japan Society of Civil Engineers, 2007. Available at: [https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15\\_Standard\\_Specifications\\_Design\\_1.0.pdf](https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15_Standard_Specifications_Design_1.0.pdf).
4. GB 50010-2002 *Code for Design of Concrete Structures*. China Building Science Academy, 2010.
5. Schießl P., Bamforth P., Baroghel-Bouny V., Corley G. W., Faber M. H., Forbes J. M., Gehlen C., Helene P., Helland S., Ishida T., Markeset G., Nilsson L. O., Rostam S., Siemes A., Walraven J. C. (2006). *Model Code for Service Life Design*. *Fib Bulletin No 34*. International Federation for Structural Concrete. 116.
6. *2013 Report Card for America’s Infrastructure*. ASCE. Available at: <https://www.api.org/~media/energyinfrastructure/images/rail/related-documents/report-card-for-america-infrastructure.pdf>.
7. Wittmann F. H., Zhao T., Jiang F., Wan X. (2012) Influence of Combined Actions on Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures Exposed to Aggressive

Received: 01.02.2022

Accepted: 06.04.2022

Published online: 29.07.2022