

С.Н. ЛЕОНОВИЧ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН, главный научный сотрудник «Центра научных исследований и испытаний строительных конструкций (ЦНИИСК) филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт» (sleonovich@mail.ru); Е.Е. ШАЛЫЙ<sup>2</sup>, инженер (john\_shamali@mail.ru); Д.А. ЛИТВИНОВСКИЙ<sup>3</sup>, гл. инженер; А.В. СТЕПАНОВА<sup>1</sup>, инженер; В.В. МАЛЮК<sup>4</sup>, ген. директор; А.В. КОЛОДЕЙ<sup>1</sup>, инженер

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет (690091, г. Владивосток, пос. Аякс, корп. 12, каб. Е920)

<sup>3</sup> ООО «ИнжСпецСтройПроект» (220076, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Мстиславца, 22, пом. 210)

<sup>4</sup> ООО «Трансстрой-Трест» (Сахалинская обл., Корсаковский р-н, г. Корсаков, ул. Вокзальная, 19Г)

## Алгоритмы надежности для расчета-прогноза долговечности железобетона при хлоридной агрессии: анализ методологии и приложений

*Проведен анализ вероятностного начала коррозии в железобетонных конструкциях, подверженных проникновению ионов хлорида. Прочность конструкции является важным критерием, который должен оцениваться в каждом типе конструкции, особенно когда эти конструкции эксплуатируются в агрессивных средах. Рассматривая железобетонные элементы, процесс диффузии хлоридов широко используется для оценки долговечности. Поэтому при моделировании этого явления коррозия арматуры может быть лучше оценена и предотвращена. Эти процессы начинаются при достижении порогового уровня концентрации хлоридов на стальных стержнях арматуры. Несмотря на надежность нескольких моделей, предложенных в литературе, детерминированные подходы не могут точно предсказать время начала коррозии из-за случайности, наблюдаемой в этом процессе. В связи с этим долговечность может быть более реалистично представлена с использованием вероятностных подходов. В статье представлен вероятностный анализ проникновения ионов хлорида. Проникновение ионов хлорида моделируется с использованием второго закона диффузии Фика. Этот закон представляет собой процесс диффузии хлоридов, учитывая зависящие от времени эффекты. Вероятность отказа рассчитывается с использованием моделирования Монте-Карло и метода надежности первого порядка (FORM) с подходом прямой связи. Для изучения этих явлений рассматриваются некоторые примеры и предлагается упрощенный метод определения оптимальных значений для защитного слоя бетона.*

**Ключевые слова:** алгоритмы надежности, железобетон, долговечность, расчет-прогноз, защитный слой бетона.

**Для цитирования:** Леонович С.Н., Шалый Е.Е., Литвиновский Д.А., Степанова А.В., Малюк В.В., Колодей А.В., Алгоритмы надежности для расчета-прогноза долговечности железобетона при хлоридной агрессии: анализ методологии и приложений // *Бетон и железобетон*. 2022. № 6 (614). С. 40–50.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-40-50>

S.N. LEONOVICH<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Foreign Academician of the RAACS, Chief Researcher of the Center for Scientific Research and Testing of Building Structures branch of the BNTU "Research Polytechnic Institute" (sleonovich@mail.ru);

Е.Е. SHALY<sup>2</sup>, Engineer (john\_shamali@mail.ru); Д.А. LITVINOVSKIY<sup>3</sup>, Main engineer; А.В. STEPANOVA<sup>1</sup>, Engineer;

В.В. MALYUK<sup>4</sup>, General director; А.В. KOLODEY<sup>1</sup>, Engineer

<sup>1</sup> Belarusian National Technical University (65, Tyayavsimosty Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus)

<sup>2</sup> Far Eastern Federal University (office E920, building 12, Ayaks settlement, Vladivostok, 690091, Russian Federation)

<sup>3</sup> InzhSpetsStroyProekt LLC (room 210, 22, P. Mstislavtsa Street, 220076, Minsk, Republic of Belarus)

<sup>4</sup> Transstroy-Trest LLC (19G, Vokzalnaya Street, Korsakov, Sakhalin Region, Russian Federation)

### Reliability Algorithms for Calculating and Predicting the Durability of Reinforced Concrete under Chloride Aggression: Analysis of Methodology and Applications

The article deals with the analysis of the probabilistic onset of corrosion in reinforced concrete structures subject to the penetration of chloride ions. Structural strength is an important criterion that must be evaluated in every type of structure, especially when these structures are operated in aggressive environments. When considering reinforced concrete members, the chloride diffusion process is widely used to evaluate durability. Therefore, by simulating this phenomenon, reinforcement corrosion can be better assessed and prevented. These processes begin when a threshold level of chloride concentration on the steel reinforcement bars is reached. Despite the reliability of several models proposed in the literature, deterministic approaches cannot accurately predict the time of onset of corrosion due to the randomness observed in this process. In this regard, durability can be more realistically represented using probabilistic approaches. The article presents a probabilistic analysis of the penetration of chloride ions. The penetration of chloride ions is modeled using Fick's second law of diffusion. This law represents the diffusion process of chlorides, taking into account time-dependent effects. The failure probability is calculated using Monte Carlo simulation and first order reliability method (FORM) with a feed-forward approach. To study these phenomena, some examples are considered and a simplified method is proposed for determining the optimal values for the concrete cover.

**Keywords:** reliability algorithms, reinforced concrete, durability, calculation-forecast, protective layer of concrete.

**For citation:** Leonovich S.N., Shaly E.E., Litvinovsky D.A., Stepanova A.V., Malyuk V.V., Kolodey A.V. Reliability algorithms for calculating and predicting the durability of reinforced concrete under chloride aggression: analysis of methodology and applications. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 6 (614), pp. 40–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-614-6-40-50>

### **Коррозия арматурной стали железобетонных конструкций**

Железобетонные конструкции (ЖБК) являются одним из наиболее часто используемых типов конструкций во всем мире. Когда ЖБК расположены в неагрессивных средах, эти типы конструкций соблюдают срок службы, который задается критериями долговечности. Что касается долговечности, ее можно определить как период времени, в течение которого конструкция поддерживает минимальные функциональные условия, сопротивление и внешние аспекты, необходимые при проектировании. Однако на прочность конструкции могут сильно влиять процессы деградации экологического и функционального происхождения [1, 2]. Среди этих процессов стоит обозначить проникновение хлоридов, карбонизацию, усталость и ползучесть. Поэтому принимается железобетонная конструкция с анализом надежности прочности конструкций, а также прогнозированием ремонта и технического обслуживания становится [3–5].

Одним из важнейших процессов деградации железобетонных конструкций является явление арматурной коррозии. Оно несет прямую ответственность за долговечность и разрушение бетонных конструкций. Что касается внешних агентов, то диффузия хлоридов определяется как один из основных факторов, вызывающих коррозию арматуры. Когда начинается коррозия, на долговечность конструкции влияет несколько явлений, таких как уменьшение поперечного сечения арматуры, трещинообразование в бетоне и потеря адгезии между сталью и бетоном [6, 7].

В целом, процесс коррозии можно разделить на два этапа: инициацию и период распространения. В период инициации ионы хлорида диффундируют через бетон к арматуре. Концентрация хлорида достигает порогового значения, что вызывает коррозию стали. Период распространения коррозионного процесса определяется как время от начала коррозии до достижения критического ограничения потерь стали.

Первая стадия – относительно короткий период. Поэтому процесс диффузии хлоридов часто используется для указания на долговечность и срок службы бетонных конструкций [8].

Что касается моделей прогнозирования времени коррозии, то в литературе было предложено несколько моделей для надлежащего решения проблемы коррозии в железобетонных конструкциях. Большинство из них предлагают детерминированные подходы для моделирования этой структурной проблемы. Однако из-за большого количества присущих неопределенностей, таких как проникновение хлоридов в бетон, эти проблемы могут быть точно проанализированы только с учетом вероятностных подходов. Сре-

ди этих моделей и составов стоит упомянуть [9–13], где процесс коррозии изучался с учетом нескольких условий и переменных. На основе этих вероятностных моделей может быть точно выполнен анализ оценки срока службы в железобетонных конструкциях, подверженных проникновению хлоридов [14–16]. Например, учитывая эти результаты, аспекты планов технического обслуживания и инспекций, может быть предложен оптимальный защитный слой бетона с учетом случайности, присущей переменным в каждой модели.

Для достижения требований к долговечности в железобетонной конструкции создана механическая модель для оценки концентрации хлоридов, где очень важно положение внутри бетона. Более того, механизм проникновения хлорида контролируется комплексами взаимодействия между физическими и химическими механизмами, которые являются крупным источником неопределенностей. Однако это явление часто встречается.

Диффузионные законы Фика предъявляют все требования к моделированию проблемы и основаны на некоторых гипотезах, таких как: бетон является однородным материалом в пространстве. Прямым следствием этого предположения является постоянное значение коэффициента диффузии во времени. Модель предполагает, что концентрация ионов хлорида в окружающей среде постоянна и допускает бетон в насыщенном состоянии. Предполагая все это поведение, вероятностный анализ попадания хлорида в бетонные конструкции может быть выполнен путем соединения законов диффузии Фика с алгоритмами надежности. В данной работе разработана связанная механическая и надежностьная модель, позволяющая проводить вероятностный анализ железобетонных конструкций, подвергающихся проникновению ионов хлорида. Эти анализы направлены на количественную оценку вероятности начала коррозии в железобетонной конструкции на основе подхода надежности. Механическая модель основана на втором законе диффузии Фика, который способен имитировать процесс проникновения хлоридов в пористые материалы. Затем можно оценить концентрацию хлоридов на заданной глубине защитного слоя бетона и соответствующее время. Для определения вероятности отказа были рассмотрены два алгоритма надежности: прямая связь механической модели с формой и моделирование Монте-Карло. Оба алгоритма определяют вероятность отказа с учетом сценариев отказа, достигнутых механической моделью, основанной на законе диффузии Фика. Проанализировано вероятностное проникновение хлорида для некоторых частных случаев и обсужден набор значений, достигнутых

предложенными моделями. Упрощенная процедура получения оптимальных защитных слоев бетона для периодических проверок иллюстрируется также расчетами некоторых зданий.

### Механическая модель – закон диффузии Фика

Коррозия арматуры, индуцированная хлоридами, может происходить в присутствии кислорода и влаги, когда накопление хлоридов внутри структур превышает пороговое значение. Даже для тщательно приготовленного бетона, с незначительным или практически хлоридным наследием на этапе строительства, постепенное накопление необходимого уровня содержания хлоридов для иницирования коррозии арматуры происходит медленно за счет попадания ионов хлорида из внешних источников.

Явление переноса, связанное с движением ионов хлорида вдоль структур, подвергающихся воздействию агрессивных сред, объясняется главным образом диффузией ионов хлорида в пористый бетон под градиентом концентрации. Коэффициент диффузии хлоридов бетона, который зависит от пористой структуры бетона, характеризует этот поток при заданной концентрации хлоридного воздействия и рассматривается как характерное свойство затвердевшего бетона.

Чтобы смоделировать попадание хлорида и его перенос в пористый бетон, широко рассматривается второй закон диффузии Фика [17] как приемлемая модель. Законы Фика для диффузии применимы к материалу однородному, изотропному и инертному [18]. Более того, предполагается, что механические свойства диффузионного процесса одинаковы во всех направлениях и сохраняются постоянными во времени. Рассматривая бетон, эти гипотезы не полностью удовлетворяются, потому что бетон хорошо известен как гетерогенный, анизотропный и химически реакционноспособный (продолжающийся процесс гидратации и микротрещинообразования) материал. Однако методы, обычно используемые для моделирования переноса хлоридов в бетоне, считают, что этот процесс регулируется только ионной диффузией, тогда он предполагает, что защитный слой бетона полностью насыщен. Поэтому это делает гипотезы законов Фика приемлемыми для моделирования хлоридного проникновения, поскольку в этом случае материал предполагается полностью насыщенным, с однонаправленным потоком хлорида, т. е. с внешней поверхности в бетонную глубину. Когда хлорид диффундирует в бетон, изменение концентрации хлорида происходит в любое время в каждой точке бетона, и это неустойчивое состояние диффузии. В целях упрощения ее анализа задача диффузии рассматривается как одномерная. Многие инженерные пробле-

мы попадания хлорида, могут быть решены с учетом этого упрощения.

Предположение диффузионной теории Фика состоит в том, что перенос (заданный потоком) в бетоне ионов хлорида через единичную площадь сечения бетона в единицу времени пропорционален градиенту концентрации ионов хлорида, измеренному нормальному для сечения. Затем:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial p}, \quad (1)$$

где  $F$  – поток ионов хлорида в бетон;  $D$  – общий коэффициент диффузии бетона;  $C$  соответствует концентрации хлорида в любом положении внутри бетона;  $p$  – такое положение.

Отрицательный знак в приведенном выше уравнении возникает потому, что диффузия ионов хлорида происходит в направлении, противоположном увеличению концентрации ионов хлоридов. В целом,  $D$  не является постоянным, а зависит от многих параметров, таких как время, в течение которого произошла диффузия; расположение в бетоне; состав бетона. Если коэффициент диффузии хлоридов постоянен, уравнение (1) обычно называют первым законом диффузии Фика. Если это не так, отношение обычно называют первым общим законом диффузии Фика.

Есть некоторые случаи, когда это простое отношение не должно применяться. В связи с этим стоит упомянуть случаи, когда диффузионный процесс может быть необратимым или имеет анамнез-зависимость. В таких случаях закон диффузии Фика недействителен, и процесс диффузии называют аномальным. Однако ни одно из наблюдений до сих пор не указывает на то, что диффузию хлоридов в бетоне следует характеризовать как аномальную диффузию. Второй закон Фика может быть выведен с учетом принципа баланса массы. Затем:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial p} \left( -D \frac{\partial C}{\partial p} \right). \quad (2)$$

Чтобы применить второй закон диффузии Фика в этой форме для бетона, подвергшегося воздействию хлорида в течение длительного периода времени, необходимо знать изменение коэффициента диффузии хлорида во времени. Если в конкретном случае существует лишь несколько наблюдений, то можно оценить верхнюю и нижнюю границу для изменения  $D$  во времени. Несмотря на эту зависимость, можно рассмотреть особый случай, когда коэффициент диффузии хлоридов не зависит от местоположения, времени и концентрации хлорида. В этом случае второй закон Фика можно переписать в более простом виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C}{\partial p^2}, \quad (3)$$

где  $D_0$  – постоянный коэффициент диффузии хлоридов бетона;  $t$  – время оценки концентрации хлоридов.

Решение дифференциального уравнения (3) для полубесконечной области с равномерной концентрацией на структурной поверхности задается следующим образом:

$$C(p,t) = C_0 \operatorname{erfc} \left[ \frac{p}{2\sqrt{D_0 t}} \right], \quad (4)$$

где  $C_0$  – концентрация хлорида ионов на поверхности структуры, предположительно постоянная во времени;  $\operatorname{erfc}$  – функция комплементарной погрешности.

В данной работе уравнение (4) используется для оценки концентрации хлоридов  $C(p,t)$ , в заданном положении  $p$  и времени  $t$ , и по этой причине также используется в качестве механической модели. Исходя из значений концентрации ионов хлорида на заданной структурной глубине, можно оценить структурную безопасность. Однако для того, чтобы можно было оценить безопасность, была построена связь между описанной механической моделью и алгоритмами надежности. Эти модели связи учитывают присутствующую случайным величинам в процессе диффузии. Одним из наиболее важных продуктов этих соединений является возможность выбора критического времени обслуживания конструкций на основе заданного целевого показателя надежности или определения толщины защитного слоя бетона на основе целевого уровня безопасности конструкции.

**Понятия надежности и методы анализа**

*Общие понятия.* Анализ надежности направлен на вычисление вероятности отказа в отношении конкретного сценария сбоя, известного как предельное состояние. Первым шагом в оценке надежности является определение базового набора случайных величин  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]T$ , для которых необходимо учитывать неопределенности. Для всех этих переменных приписываются распределения вероятностей, чтобы смоделировать ее случайность. Эти распределения вероятностей могут быть определены физическими наблюдениями, статистическими исследованиями, лабораторным анализом и мнением экспертов. Количество случайных величин является важным параметром для определения вычислительного времени, затрачиваемого при анализе надежности. Чтобы уменьшить размер пространства случайных величин, рекомендуется рассматривать в качестве детерминированных все переменные, неопределенности которых приводят к незначительным влияниям на величину вероятности отказа.

Второй этап заключается в определении ряда потенциально критических режимов отказа. Для каждого из них функция предельного состояния разделяет пространство на две области, как описано на рис. 1: безопасный домен, где  $G(X)>0$  и домен сбоя, где  $G(X)<0$ . Граница между этими двумя доменами опре-

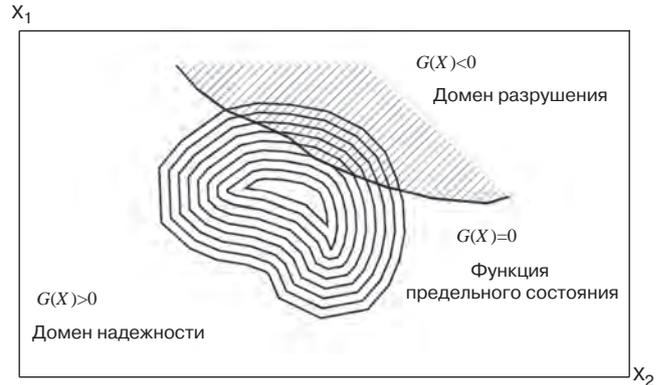


Рис. 1. Домены разрушения и надежности  
Fig. 1. Domains of destruction and reliability

деляется  $G(X)=0$ , известное как само предельное состояние. Явное выражение функции предельного состояния обычно невозможно. Когда используются численные механические модели, только в нужном количестве точек его можно вычислить. Предельное состояние определяется с помощью критического режима отказа, рассчитанного уравнением (4). Вероятность отказа оценивается путем интегрирования в область отказа функции плотности соединения, представленной [19]:

$$P_f = \int_{G \leq 0} f_x(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, dx_2, \dots, dx_n, \quad (5)$$

где  $f_x(X)$  – функция совместной плотности случайных величин  $X$ .

Поскольку оценка интеграла, определяемого уравнением (5), практически невозможна на практике, на основе концепции индекса надежности разработаны альтернативные процедуры [20]. Этот параметр определяется расстоянием между средней точкой и точкой отказа, помещенной в функцию предельного состояния  $G(X)=0$  в нормализованном пространстве случайных величин. Индекс надежности позволяет рассчитать вероятность отказа, используя метод надежности первого порядка (FORM) следующим образом:

$$P_f = \Phi(-\beta), \quad (6)$$

где  $\Phi$  – стандартная гауссовская кумулятивная функция распределения;  $\beta$  – индекс надежности.

Существует несколько альтернативных процедур, доступных в теории надежности, которые позволяют оценить вероятности структурного разрушения. Эти процедуры основаны на методах численного моделирования. Наиболее важным подходом является метод моделирования Монте-Карло. Однако, когда принимаются численные механические модели, дорогостоящие с точки зрения вычислительной работы, этот подход может быть ненадежным из-за большой выборки, необходимой для моделирования. В данном исследовании используются два подхода



Рис. 2. Определение индекса надежности и расчетных точек  
 Fig. 2. Determination of the reliability index and calculated points

к надежности. Первый известен как прямой подход, поскольку он является результатом прямой связи механической модели по методу надежности первого порядка (FORM). Вторым используемым подходом – это классическая симуляция Монте-Карло. В обоих случаях модели используются для оценки вероятности разрушения с учетом процесса попадания хлорида в железобетонные конструкции.

**Прямой подход – механическая модель и FORM**

Основная процедура в этой модели заключается в непосредственном соединении модели надежности FORM с механической моделью, заданной уравнением (4). Этот подход продемонстрировал точность и надежность для анализа многих сложных инженерных проблем, как обсуждалось в [21–23].

Функция предельного состояния определяет границу между безопасными доменами и доменами сбоя. Рассматривая проблему проникновения хлоридов, функция предельного состояния может быть записана в терминах времени начала коррозии:

$$G(X) = t_R(X) - t_a, \tag{7}$$

где  $t_R$  – время начала коррозии, зависящее от множества случайных величин  $X$ ;  $t_a$  – структурный срок службы, ожидаемый при проектировании, который рассматривался как детерминированный параметр или это может быть предлагаемое время для инспекций.

Время  $t_R$  вычисляется из уравнения (4), предполагающего концентрацию хлорида  $C(p,t)$ , известную в заданном положении  $p$  внутри бетона. На самом деле предполагается, что  $C(p,t)$  равен пороговому значению концентрации хлоридов, при котором вызывается коррозия стали, в состоянии отказа. Диапазоном  $p$  положения в данном случае является защитный слой бетона, в котором он принимает ноль на внешней поверхности элемента конструкции и

значение защитного слоя бетона на арматурной поверхности внутри бетона. В связи с этим время начала коррозии может быть определено явно из уравнения (4) как:

$$t_R = \frac{1}{D_0} \left\{ \frac{p}{2 \operatorname{erfc}[C(p,t)/C_0]} \right\}^2. \tag{8}$$

Чтобы включить инвариантную меру безопасности, случайные величины, определенные в физическом пространстве, преобразуются в независимые стандартные гауссовские переменные [20] с использованием соответствующих вероятностных преобразований. Функция предельного состояния  $G(X)=0$ , определенная в физическом пространстве, преобразуется в  $H(U)=0$  в стандартном нормализованном пространстве с  $U_i = [1, 2, \dots, u_n]$ , где  $U$  – множество нормализованных случайных величин. В этом стандартном пространстве индекс надежности  $b$  задается минимальным расстоянием между областью отказа и началом стандартного пространства. Индекс надежности можно оценить, решив ограниченную задачу оптимизации: Найти:  $U$ , который минимизирует:  $b = U^T \cdot U$  и при условии:

найти:  $U$ , который минимизирует:  $\beta = \sqrt{U^T \cdot U}$  и при условии:  $H(U)=0$ . (9)

Решение этой задачи сходится к ближайшей к пространству точке отказа, известной как расчетная точка или наиболее вероятная точка отказа  $U^*$ . В стандартном пространстве расстояние между этой точкой и началом координат является индексом надежности, как показано на рис. 2. Индекс надежности  $b$  может быть достигнут путем применения любого алгоритма оптимизации. Особым алгоритмом, который эффективен в данном случае для решения задач надежности, является алгоритм HLRP [24]. Этот алгоритм оптимизации может быть связан непосредственно с механической моделью. Поскольку время начала коррозии известно точно, известно сопротивление  $t_R$ . Следовательно, функция предельного состояния определяется по пунктам. Затем градиент функции предельного состояния может быть определен с помощью любой числовой процедуры. Для данного предложения был использован метод прямых конечных различий. Некоторые трудности могут возникнуть из-за уравнения (8), особенно его градиентов, оценка, обусловленная наличием погрешности комплементарной функции. Естественным барьером, который можно отметить в этом подходе, является числовая ошибка из-за процедуры конечной разности, которая может повлиять на сходимость связанной процедуры, а также на точность решения, особенно для нелинейных переходных явлений. Однако для всех задач, численные задачи, связанные с методом конечных разностей, не наблюдались. Кроме того, было проверено, что процедура прямой

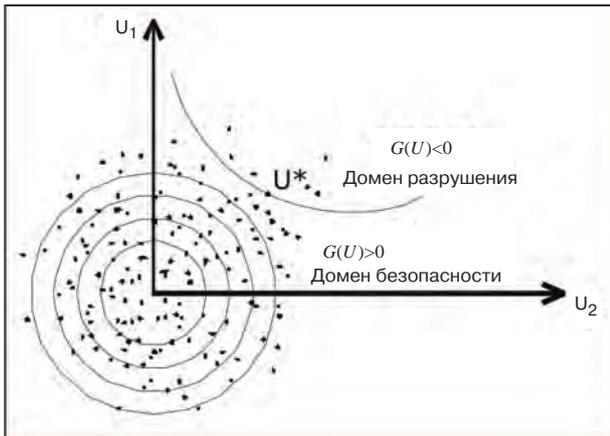


Рис. 3. Выборка Монте-Карло для двух случайных переменных  
Fig. 3. Monte Carlo sampling for two random variables

связи дает точные результаты и стабильную скорость сходимости при разумном количестве механических анализов.

**Моделирование Монте-Карло**

Метод Монте-Карло представляет собой подход численного моделирования, широко используемый в задачах надежности [25]. В этом методе выборка случайных величин используется для построения набора значений, направленных на описание пространства отказа и безопасного пространства и вычисления уравнения (5). Выборка строится на основе статистического распределения, присвоенного для каждой случайной величины в задаче. Поскольку этот метод имеет дело с моделированием функции предельного состояния, чем больше будет выборка, тем точнее будет описание пространства и более точной будет вероятность достижения отказа. Ядро этого метода состоит в построении выборки для каждой случайной величины, участвующей в задаче. Затем область безопасности и точки отказа исследуются путем моделирования уравнения (7), (рис. 3). Вероятность отказа вычисляется для моделирования Монте-Карло, используя следующее выражение:

$$P_f = \int_{G \leq 0} f_x(x_i) dx_i = \int_{G \leq 0} I(x_i) f_x(x_i) dx_i = E[I(x_i)]. \quad (10)$$

Функция  $I(x_i)$  является дискретным оператором для вычисления сбоев и может быть записана как:

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 \rightarrow G \leq 0 \\ 0 \rightarrow G > 0. \end{cases} \quad (11)$$

Моделируя функцию предельного состояния для удобного числа выборок, среднее значение  $(E)^I(x_i)$  будет оценщиком вероятности отказа. Затем:

$$\bar{P}_f = E[I(x_i)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i). \quad (12)$$

Недостаток этого метода связан с большим количеством симуляций  $N$ , необходимых для точного вы-

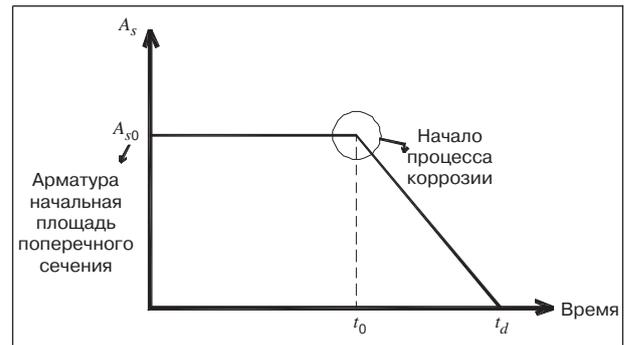


Рис. 4. Коррозионный процесс на площади поперечного сечения арматуры  
Fig. 4. Corrosion process on the cross-sectional area of the reinforcement

числения вероятности отказа. Как правило, для того, чтобы точно оценить вероятность отказа  $10^{-n}$ , количество симуляций должно быть выше  $10^{n+2}$  или  $10^{n+3}$ . Это означает, что в гражданских инженерных сооружениях, где вероятность отказа находится в пределах от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$ , требуется, по крайней мере, от  $10^5$  до  $10^9$  реализаций функции предельного состояния. Когда задействованы сложные численные механические модели, которые приводят к высокой вычислительной работе, этот метод может быть ненадежным. Однако теоретически этот метод приводит к реальной вероятности отказа, когда диапазон выборки становится бесконечным.

**Методология анализа**

Моделирование коррозионного явления в железобетонных конструкциях должно учитывать два различных этапа, как показано на рис. 4. Первый этап связан с попаданием хлоридов в пористый бетон. На этом этапе концентрация хлоридов вдоль глубины защитного слоя бетона увеличивается с течением времени. Коррозия начинается, когда концентрация хлоридов, окружающих арматуру, достигает порогового уровня, что приводит к потере химической пассивной защиты бетона. В конце этого этапа арматурная сталь остается неповрежденной. Вторая стадия, называемая стадией распространения, характеризуется уменьшением поперечных сечений арматуры, что порождает потерю прочности конструкции с течением времени.

По сравнению с первой стадией период размножения относительно короткий. Поэтому время начала коррозии было широко принято для оценки прочности конструкции и безопасности. В связи с этим целью данной работы является оценка вероятности отказа с учетом сценария отказа, прогнозируемого стадией инициации. Поэтому отказ наблюдается, когда концентрация хлоридов на глубине арматуры достигает порогового уровня. В связи с этим основными пара-

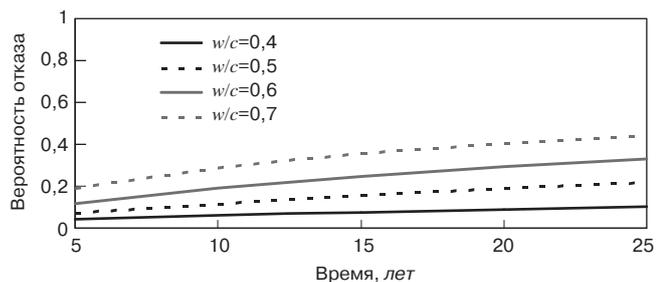


Рис. 5. Вероятность отказа со временем  
Fig. 5. Probability of failure over time

метрами, рассматриваемыми для всех выполняемых анализов надежности, являются:

- порог концентрации хлоридов на границе раздела между бетоном и арматурными стержнями, определяющий начало коррозионного процесса,  $C(x,t)$ . Этот параметр был изучен экспериментально [12];
- концентрация хлоридов на поверхности конструкции,  $C_0$ . Этот параметр связан с агрессивностью окружающей среды, и его контрольные значения могут быть определены экспериментальными наблюдениями, представленными в [12], или определены с использованием международного стандартного проектного кода [26];
- коэффициент диффузии бетона,  $D_0$ , который был изучен [27];
- структурная глубина, которая в данном исследовании определяется как защитный слой бетона.

Первоначальные трещины вследствие твердения бетона и изгиба/сдвига и продольного растрескивания не были учтены в формулировке, представленной здесь. Эти явления влияют на процесс коррозии, и его моделирование может быть точно выполнено с использованием численных методов, таких как метод конечных элементов и метод граничных элементов [28].

Согласно [12], концентрация хлоридов на поверхностях конструкций является функцией атмосферы, где расположены эти элементы. Толщина защитного слоя также определяется в соответствии с окружающей средой, которая заявлена международным стандартом конструкции бетона в категориях агрессивности. Коэффициент диффузии бетона, представляющий собой стойкость материала к попаданию хлорида, зависит от водо-цементного отношения. Чем выше будет доля воды, тем выше будут пустые объемы внутри матрицы из-за процесса твердения бетона. Следовательно, выше будет проницаемость материала, а ниже будет сопротивление бетона проникновению хлорида. Поэтому в регионах, близких к побережью, настоятельно рекомендуется строить железобетонные конструкции с более низким водо-цементным отношением и большими защитными слоями бетона.

Предложенная модель позволяет оценить вероятность структурного разрушения с учетом ранее представленных случайных величин. Более того, эта модель способна описать зависимость соотношения между вероятностью отказа и временем. Затем предложенная модель может быть использована для решения интересной структурной проблемы, которая связана с планами обслуживания конструкций, основанными на их безопасности.

Чтобы применить модель в этой задаче, необходимо определить заданный уровень безопасности. Указанный уровень безопасности может быть определен с использованием [29], где предотвращение структурных отказов измеряется на основе целевого индекса надежности. Поскольку концентрация хлоридов в структурном покрытии увеличивается с течением времени, безопасность от этого режима отказа со временем снижается. Интервалы времени для периодического технического обслуживания конструкций, для безопасности конструкций достигаются, когда индекс надежности, рассчитанный с использованием предлагаемой модели, достигает целевого показателя надежности. Стоит отметить, что ремонтные процедуры предполагаются, в данном случае, как совершенные, т. е. после технического обслуживания конструкция восстанавливает свои первоначальные условия целостности без хлоридов. Эти интервалы определяются до тех пор, пока параметры, связанные с материалом, глубиной покрытия и агрессивностью окружающей среды, определены априори.

Другое применение предлагаемой модели связано с определением толщины слоя и свойств бетона  $w/c$ , основанное на данном уровне безопасности и ожидаемом структурном сроке службы. Когда интервалы времени для технического обслуживания конструкции и ожидаемого срока службы конструкции указаны априори, отношение  $w/c$  и значения защитного слоя бетона могут быть получены путем использования предлагаемой модели. Целью определения пары этих значений, является к приведению конструкции к поддержанию уровня безопасности, равного целевому индексу надежности в течение указанного периода времени. В этом приложении значения  $w/c$  и защитного слоя достигаются, когда индекс надежности, заданный предлагаемой моделью, равен целевому индексу надежности.

Важно подчеркнуть, что эти процедуры не учитывают затраты, связанные ни с процедурой технического обслуживания, ни с производством бетона. Однако эти приложения предлагаемой модели могут быть выполнены, если аналитики заинтересованы в проектировании, учитывая, исключительно, критерий безопасности.

### Применение

Для иллюстрации применимости предложенной модели были проведены вероятностные анализы с учетом различных сценариев и свойств бетона для оценки влияния агрессивности окружающей среды, соотношения вода/цемент и толщины защитного слоя на вероятность разрушения конструкций из-за проникновения хлоридов. В каждой из работ исследуется какой-то специфический аспект проблемы [30–57].

### Выводы

Представлено исследование вероятностного иницирования коррозии в железобетонных конструкциях с использованием связи между вторым законом диффузии Фика и алгоритмами надежности. В этом случае коррозия начинается, когда химическая защита, окружающая стальные стержни, теряется из-за попадания хлорида. Анализ вероятности возникновения коррозии во времени проводился с учетом двух различных категорий агрессивности среды и нескольких комбинаций защитного слоя и свойств бетона (В/Ц отношение). Как подтверждается представленными результатами, инициация коррозии зависит от нескольких параметров. Однако концентрации хлоридов на поверхности конструкции и значения защитного слоя, как показали, имеют большое значение для вероятностного анализа. В равной степени коэффициент диффузии также важен для измерения сопротивления материала попаданию хлорида и может быть определяющим для выбора оптимальных значений защитного слоя бетона. Долговечность железобетонных конструкций должна быть связана с более реальными значениями защитного слоя бетона, которые, основаны только на международном стандарте по конструкциям из бетона. Этот параметр более реалистично оценивается с использованием вероятностных подходов, учитывая случайность, при явлении деградации, влияющую на долговечность конструкции.

Выбор оптимальных значений защитного слоя сильно зависит от качества бетона, его пористости, что отражается на  $w/c$ . Он также зависит от периода времени между конструктивными мероприятиями технического обслуживания. Очевидно, что определение оптимального сочетания между бетонной смесью, толщиной защитного слоя и затратами на строительство/техническое обслуживание/ремонт является следующим вопросом, по созданию более экономичной, безопасной и рациональной конструкции.

### Список литературы / References

1. Ueli Angst, Bernhard Elsener, Claus K. Larsen, Øystein Vennesland. Critical chloride content in reinforced concrete – A review. *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39, pp. 1122–1138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>
2. Santiago Guzmán, Jaime C. Gálvez, José M. Sancho. Cover cracking of reinforced concrete due to rebar corrosion induced by chloride penetration. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, Iss. 8, pp. 893–902. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.008>
3. Tianyu Xiang, Renda Zhao Evaluation of the reliability of diffusion of chlorides in fatigue-damaged concrete. *Engineering Structures*. 2007. Vol. 29, Iss. 7, pp. 1539–1547. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.09.002>
4. Izabela Skrzypczak, Marta Słowik, Lidia Buda-Ożóg. The Application of reliability analysis in engineering practice – reinforced concrete foundation. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193, pp. 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.197>
5. Jung S. Kong, Ayman N. Ababneh, Dan M. Frangopol, Yunping Xi. Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2002. Vol. 17, Iss. 3, pp. 305–315. [https://doi.org/10.1016/S0266-8920\(02\)00014-0](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(02)00014-0)
6. Trevor J Kirkpatrick, Richard E Weyers, Christine M Anderson-Cook, Michael M Sprinkel. Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32, Iss. 12, pp. 1943–1960. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00905-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00905-5)
7. Woo-Yong Jung, Young-Soo Yoon, Young-Moo Sohn Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, Iss. 5, pp. 663–677. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01034-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01034-7)
8. Tuutti Kyösti Corrosion of steel in concrete. 1982. [Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Materials]. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
9. Thirumalai Parthiban, R. Ravi, G.T. Parthiban Potential monitoring system for corrosion of steel in concrete. *Advances in Engineering Software*. 2006. Vol. 37, Iss. 6, pp. 375–381. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.09.004>
10. Michael P. Enright, Dan M. Frangopol. Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion. *Engineering Structures*. 1998. Vol. 20, Iss. 11, pp. 960–971. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00190-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00190-9)
11. Duracrete, “Statistical Quantification of the Variables in the Limit Stat Functions,” Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, The EU-Brite EuRam III, January 2000.

12. Kim Anh T. Vu, Mark G. Stewart. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety*. 2000. Vol. 22. Iss. 4, pp. 313–333. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(00\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(00)00018-7)
13. Sanjeev Kumar Verma, Sudhir Singh Bhadauria, Saleem Akhtar. Estimating residual service life of deteriorated reinforced concrete structures. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2013. Vol. 1 (5), pp. 92–96. DOI: 10.12691/ajcea-1-5-1
14. Stewart M.G., Rosowsky D.V. Structural safety and serviceability of concrete bridges subject to corrosion. *Journal of Infrastructure Systems*. 1998. Vol. 4, pp. 146-155.
15. Allen C. Estes, Dan M. Frangopol. Updating bridge reliability based on bridge management systems visual inspection results. *Journal of Bridge Engineering*. 2003. Vol. 8 (6). DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:6(374)
16. Q. Suo, M. Stewart. Corrosion cracking prediction updating of deteriorating RC structures using inspection information. *Materials Science*. 2009. Vol. 94, pp. 1340–1348, DOI:10.1016/j.res.2009.02.011
17. Crank J. The Mathematics of Diffusion. 2nd ed. Clarendon Press, Oxford, London. 1975. 414 p.
18. Dhir R.K., Jones M.R., Ng S.L.D. Prediction of total chloride content profile and concentration/time-dependent diffusion coefficients for concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1998. Vol. 50. Iss. 1, pp. 37–48. <https://doi.org/10.1680/mac.1998.50.1.37>
19. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. Department of mechanical engineering technical university of Denmark. June-September, 2007.
20. Abraham M. Hasofer, Niels C. Lind. Exact and invariant second-moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1974. Vol. 100. Iss. 1.
21. LiuyangFengXudongQian An adaptive learning approach to determine and update crack sizes from strain relaxation data for welded plate joints. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022. Vol. 259. 108165. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108165>
22. Edson Denner Leonel, Alaa Chateauneuf, Wilson Sergio Venturini. Probabilistic crack growth analyses using a boundary element model: Applications in linear elastic fracture and fatigue problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2012. Vol. 36. Iss. 6, pp. 944–959. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2011.12.016>
23. Leonela E.D., Chateauneuf A., Venturini W.S., Bressolette P. Coupled reliability and boundary element model for probabilistic fatigue life assessment in mixed mode crack propagation. *International Journal of Fatigue*. 2010. Vol. 32. Iss. 11, pp. 1823–1834. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.05.001>
24. Rüdiger Rackwitz, Bernd Flessler. Structural reliability under combined random load sequences. *Computers & Structures*. 1978. Vol. 9. Iss. 5, pp. 489–494. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(78\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0045-7949(78)90046-9)
25. Andrzej S. Nowak, Kevin R. Collins. Reliability of structures. CRC Press. 2019 407 p.
26. Brazilian Association of Technical Standards. ABNTNBR 6118. Concrete Structural Design – Procedures. Rio de Janeiro, 2003.
27. Papadakis V.G., Roumeliotis A.P., Fardis M.N., Vagenas C.G. Mathematical modelling of chloride effect on concrete durability and protection measures. *Concrete repair, rehabilitation and protection*. 1996. No. 6, 165–174.
28. Edson Denner Leonel, Wilson Sergio Venturini, Alaa Chateauneuf A BEM model applied to failure analysis of multi-fractured structures. *Engineering Failure Analysis*. 2011. Vol. 18. Iss. 6, pp. 1538–1549 <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.05.014>
29. JCSS Probabilistic Model Code. ISBN 978-3-909386-79-6. [jcsc-lc.org/jcsc-probabilistic-model-code/](http://jcsc-lc.org/jcsc-probabilistic-model-code/)
30. Леонович С.Н. Долговечность центрифугированных железобетонных конструкций при циклическом замораживании и оттаивании. *Бетон и железобетон*. 1988. № 10.
30. Leonovich S.N. Durability of centrifuged reinforced concrete structures during cyclic freezing and thawing. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 1988. No. 10.
31. Leonovich S.N. Fracture Mechanics Parameters of Concrete: «Test Methods Development and Harmonization of Standards», 1996. Intern. Congress «Concrete in The Service of Mankind». Dundee, Scotland, UK.
32. Гузеев Е.А., Леонович С.Н., Милованов А.Ф., Пирадов К.А., Сейланов Л.А. Разрушение бетона и его долговечность. Мн.: Тыздзень. 1997. 170 с.
32. Guzeev E.A., Leonovich S.N., Milovanov A.F., Piradov K.A., Seilanov L.A. Razrusheniye betona i yego dolgovechnost' [Destruction of concrete and its durability]. Minsk: Tydzen. 1997. 170 p.
33. Leonovich S.N. The non-destructive diagnostic methods of concrete-lined tunnels, *Proc. of World Tunnel Congress*. Vienna, Austria. 1997.
34. Leonovich S.N. The influence of structure of concrete on frost-salt resistance. *Proc. of 13-th International Conference of Building Materials (13 IBAUSIL)*. Weimar, Germany. 1997. Vol. 2.

35. Leonovich S.N. Calculation of durability of concrete monuments using fracture mechanics. *Internationale Zeitschrift für Baudenkmalpflege*. Aedificatio Publishers. 1999. Helt 6.
36. Леонович С.Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения. Мн.: Тыздзень 2000. 266 с.
36. Leonovich S.N. Treshchinostoykost' i dolgovechnost' betonnykh i zhelezobetonnykh elementov v terminakh silovykh i energeticheskikh kriteriyev mekhaniki razrusheniya. [Crack resistance and durability of concrete and reinforced concrete elements in terms of force and energy criteria of fracture mechanics]. Minsk: Tyzden. 2000. 266 p.
37. Леонович С.Н. Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при карбонизации. *Материалы 6 Межд. научно-методич. семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь»*. Минск. 2000.
37. Leonovich S.N. Algorithm for calculating the durability of reinforced concrete structures during carbonization. *Materials of the 6<sup>th</sup> International scientific and methodological seminar "Prospects for the development of new technologies in construction and training of engineering personnel in the Republic of Belarus"*. Minsk. 2000. (In Russian).
38. Leonovich S.N. Hypotheses of frost destruction and fracture mechanics of concrete. *Proc. 24 – 2nd Int. RILEM Workshop Frost Resistance of concrete: from nanostructure and Pore Solution to Macroscopic Behaviour and Testing*. Essen, Germany. 2002.
39. Leonovich S.N. Frost-resistance of expansive (self-stressed) concrete (Fracture mechanics Approach). *Prof. of Intern. Conference «Non-traditional Concrete»*. Brno, Czechia. 2002.
40. Leonovich S.N. Fracture mechanism for estimation of freeze – thaw resistance of concrete. *15. Internationale Baustofftagung*. 24–27 September 2003. Weimar.
41. RILEM Technical Committee 200-HTC. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures – modelling and applications. *Mater Struct.* 40, 841–853 (2007). <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9285-2>
42. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю., Зайцев Ю.В. Опыт использования неразрушающего контроля бетона на объекте монолитного строительства «Минск-Арена» (Республика Беларусь) // *Вестник отделения строительных наук*. 2008. Вып. 12. Белгород. С. 113–124.
42. Leonovich S.N., Snezhkov D.Yu., Zaitsev Yu.V. About the use of non-destructive testing of concrete at the Minsk-Arena monolithic construction facility (Republic of Belarus). *Vestnik of the Department of Construction Sciences*. 2008. Iss. 12. Belgorod, pp. 113–124. (In Russian).
43. Леонович С.Н. Метод определения состояния арматуры эксплуатируемых железобетонных конструкций // *Строительная наука и техника*. 2008. № 4 (19).
43. Leonovich S.N. Method of determining the state of reinforcement of operated reinforced concrete structures. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*. 2008. No. 4 (19).
44. Леонович С.Н. Трещиностойкость и долговечность несущих конструкций АЭС с позиции механики разрушения // *Вестник Белорусского национального технического университета*. 2009. № 4. С. 13–15.
44. Leonovich S.N. Fracture resistance and durability of NPP supporting structures from the point of view of fracture mechanics. *Vestnik of the Belarusian National Technical University*. 2009. No. 4, pp. 13–15. (In Russian).
45. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю. Конструкции и изделия железобетонные эксплуатируемые. Метод определения состояния арматуры (потенциометрический метод) // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2009. № 8.
45. Leonovich S.N., Snezhkov D.Yu. Manufactured reinforced concrete structures and products. Method for determining the state of reinforcement (potentiometric method). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2009. No. 8. (In Russian).
46. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н., Шнайдер У. Структура, прочность и механика разрушения бетонов при двухосном и трехосном сжатии. Минск: БНТУ, 2011. 382 с.
46. Zaitsev Yu.V., Leonovich S.N., Schneider U. Struktura, prochnost' i mekhanika razrusheniya betonov pri dvukhosnom i trekhosnom szhatii [Structure, strength and fracture mechanics of concrete under biaxial and triaxial compression]. Minsk: BNTU, 2011. 382 p.
47. Леонович С.Н., Прасол А.В. Модели периода иницирования коррозии арматуры // *Строительные материалы*. 2012. № 9. С. 74–75.
47. Leonovich S.N., Prasol A.V. Models of the period of reinforcement corrosion initiation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 9, pp. 74–75. (In Russian).
48. Леонович С.Н., Прасол А.В. The impact of chlorides on reinforced concrete structures: modeling of penetration into concrete. *Science and Technology*. 2012. No. 2, p. 34.
49. Рудницкий В.А., Крень А.П., Леонович С.Н. Способ определения класса прочности арматуры

- в железобетоне: пат. 16278 Респ. Беларусь: МПК(2006.01) G 01N 3/40; заявитель Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси»; Дата публ.: 2012.08.30
49. Rudnitsky V.A., Kren A.P., Leonovich S.N. Method for determining the strength class of reinforcement in reinforced concrete: Pat. 16278 Rep. Belarus: IPC(2006.01) G 01N 3/40; applicant State scientific institution «Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus»; Publication date: 2012.08.30 (In Russian).
50. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Чернякевич О.Ю., Степанова А.В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография: в 2 ч. Ч. 1. Минск: БНТУ, 2016. 390 с.
50. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A., Chernyakevich O.Yu., Stepanova A.V. Prochnost', treshchinostoykost' i dolgovechnost' konstruksionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeystviyakh: monografiya [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion effects: monograph: in 2 hours. Part 1]. Minsk: BNTU, 2016. 390 p. (In Russian).
51. Шалый Е.Е., Ким Л.В., Леонович С.Н. Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений хабаровского края. *Инновации в бетоне: сборник статей по материалам Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения И.Н. Ахвердова и С.С. Атаева*. Минск, 9–10 июня 2016. Белорусский национальный технический университет. Ч. 1. С. 243–247.
51. Shaly E.E., Kim L.V., Leonovich S.N. Probabilistic calculation of the depth and propagation of the carbonization front in the concrete of hydraulic structures of the Khabarovsk Territory. *Innovations in concrete science, construction production and training of engineering personnel: a collection of articles based on the materials of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of the birth of I.N. Akhverdov and S.S. Ataev*. Minsk, June 9–10, 2016. Belarusian National Technical University. Part 1, pp. 243–247. (In Russian).
52. Леонович С.Н. Моделирование капиллярной усадки и трещинообразование бетона в раннем возрасте // *Наука и техника*. 2018. Т. 17. № 4. С. 265–277.
52. Leonovich S.N. Modeling of capillary shrinkage and cracking of concrete at an early age. *Nauka i tekhnika*. 2018. Vol. 17. No. 4, pp. 265–277. (In Russian).
53. Леонович С.Н. Алгоритм расчета трещиностойкости бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке по обобщенному критерию // *Наука и техника*. 2018. Т. 17. № 6. С. 502–507.
53. Leonovich S.N. Algorithm for calculating the crack resistance of concrete at an early age with capillary shrinkage according to a generalized criterion. *Nauka i tekhnika*. 2018. Vol. 17. No. 6, pp. 502–507. (In Russian).
54. Леонович С.Н., Шалый Е.Е., Ким Л.В. Железобетон при воздействии карбонизации и хлоридной агрессии: вероятностная модель расчета-прогноза срока службы // *Наука и техника*. 2019. Т. 18. № 4. С. 284–291.
54. Leonovich S.N., Shalyi E.E., Kim L.V. Reinforced concrete under the influence of carbonization and chloride aggression: a probabilistic model for calculating and predicting service life. *Nauka i tekhnika*. 2019. Vol. 18. No. 4, pp. 284–291. (In Russian).
55. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Алгоритм прогнозирования срока службы: нагрузка, карбонизация, хлоридная агрессия // *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2021. № 3 (126). С. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-17-20>
55. Shaly E.E., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Service life prediction algorithm: load, carbonization, chloride aggression. *Vestnik of the Brest State Technical University*. 2021. No. 3 (126), pp. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-17-20>
56. Леонович С.Н., Шалый Е.Е., Полонина Е.Н. Долговечность портовых железобетонных конструкций (Дальний Восток и Сахалин): монография. М.: ИНФРА-М. 2022. 315 с.
56. Leonovich S.N., Shalyi E.E., Polonina E.N. Dolgovechnost' portovykh zhelezobetonnykh konstruksiy (Dal'niy Vostok i Sakhalin): monografiya [Durability of port reinforced concrete structures (Far East and Sakhalin): monograph]. Moscow: INFRA-M. 2022. 315 p.
57. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н. Синергетическое влияние наночастиц SiO<sub>2</sub> и углеродных нанотрубок на свойства бетона // *Доклады Национальной Академии Наук Беларуси*. 2022. Т. 66. № 1. С. 109–112.
57. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N. Synergistic effect of SiO<sub>2</sub> nanoparticles and carbon nanotubes on the properties of concrete. *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2022. Vol. 66. No. 1, pp. 109–112. (In Russian).