

## Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред Current state of the calculation of reinforced structures that are exposed to aggressive medium

к.т.н., доцент **Овчинников Илья Игоревич**  
*Саратовский государственный технический университет,*  
*кафедра «Транспортное строительство»,*  
*bridgeart@mail.ru*

Ph.D., associate professor **Ilya Igorevich Ovchinnikov**  
*Saratov State Technical University,*  
*Department "Transport construction",*  
*bridgeart@mail.ru*

**Ключевые слова:** расчет; армированные конструкции; моделирование; коррозии; карбонизация;

Описано общее состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред. Приведены общие подходы к моделированию поведения таких конструкций при воздействии хлоридсодержащей агрессивной среды, а также одновременном воздействии хлоридной коррозии и карбонизации.

**Key words:** calculation; reinforced structures; modeling; corrosion; carbonization.

Described the general problem state calculation of reinforced structures that are exposed to corrosive environments. General approaches to modeling the behavior of such structures under impact chloride corrosive environment are given. Simultaneous effect of chloride corrosion and carbonation is given too.

### *Введение*

В процессе длительной эксплуатации инженерные сооружения подвергаются комплексу внешних воздействий: нагрузок, температур и агрессивных эксплуатационных сред, различных физических полей, совместное влияние которых во многих случаях может привести к интенсивному развитию повреждений и сокращению срока службы сооружений.

Агрессивная эксплуатационная среда является одним из главных факторов, влияющих на работоспособность инженерных сооружений. В обзоре основное внимание будет уделено двум типам агрессивных сред: хлоридсодержащим средам и средам, вызывающим коррозионное растрескивание [105]. Хлоридсодержащая среда является одной из наиболее распространенных агрессивных эксплуатационных сред для многих элементов конструкций (особенно транспортных сооружений). Среди основных источников хлоридного загрязнения элементов конструкций следует выделить: хлоридсодержащие средства-антиобледенители (на основе каменной соли), применяемые с целью обеспечения безопасности проезда автотранспорта при гололеде на проезжей транспортных сооружений; морскую воду или солевой туман, которые имеют контакт с поверхностью армированной конструкции; технологические хлоридсодержащие среды на предприятиях; добавки на основе хлоридных солей, которые ранее вводились при зимнем бетонировании в бетонную смесь для ускорения твердения бетона при отрицательных температурах окружающего воздуха. Воздействие хлоридсодержащей среды приводит к значительному изменению кратковременных и длительных механических характеристик материала несущих конструкций, коррозионному поражению арматуры, что, в конечном итоге, приводит к существенному снижению несущей способности, уменьшению надежности и сокращению долговечности конструкций.

Анализ результатов натурных обследований [104], проектных материалов и экспертный опрос специалистов позволяет заключить [1,2], что воздействию агрессивных, в том числе хлоридсодержащих, сред подвергается до 75 % инженерных конструкций, наиболее интенсивно – на предприятиях металлургической, химической, нефтехимической, целлюлозно-бумажной, текстильной и пищевой промышленности, а также в дорожно-мостовом хозяйстве и на объектах, расположенных вблизи морских побережий.

В монографиях [1,2,3,4,5] рассмотрены примеры повреждений, разрушений, деградации и выхода из строя железобетонных и полимербетонных конструкций, вызванных воздействием различных

агрессивных сред, поэтому ниже отметим только основные, характерные виды повреждений, вызванных воздействием хлоридсодержащих сред.

В [6] отмечается, что в европейских странах затраты на эксплуатацию и содержание мостов составляют 40 % от стоимости строительства. С целью снижения этих затрат необходимо большее внимание уделять долговечности используемых материалов и конструкций из них. Разрушение бетона происходит от воздействия солей, углекислого газа и влаги. Процесс карбонизации бетона снижает водородный показатель  $pH$  до 10,5. Однако наиболее серьезную опасность представляет проникание хлоридов в бетон, в результате чего соответствующий элемент конструкции очень быстро приходит в аварийное состояние. В [7] отмечается, что главным фактором разрушения бетона является коррозия арматуры, инициируемая и ускоряемая применением хлористых солей-антиобледенителей. В опорных стойках, балках, плите проезжей части и парапетах ограждения общая коррозия приводит к равномерному уменьшению диаметра арматуры за счет образования гидрата окиси железа  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ , который занимает объем в 3 раза больше, чем окисленная сталь. Его давление на окружающую арматуру бетон приводит к образованию трещин вдоль стержней, способствующих еще большему притоку хлоридов к зоне коррозии. В промышленных районах избыточное содержание в атмосфере двуокиси углерода и серы приводит к снижению показателя  $pH$  в бетоне с 13 до 9 и увеличению скорости коррозии арматуры.

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что содержание солей в бетоне, проникших в него через поры и микротрещины, колеблется в широком диапазоне. Опасность коррозии рабочей арматуры даже в том случае, если она незначительна, состоит в том, что образование ржавчины приводит к резкому снижению прочности сцепления арматуры с бетоном и вызывает тем самым интенсивный процесс трещинообразования [106].

В работе [8] отечественных авторов также отмечается, что применение хлоридсодержащих реагентов с целью предотвращения обледенения проезжей части мостов резко интенсифицирует коррозию арматуры и разрушение цементного камня бетона.

Коррозионное растрескивание также является весьма опасным видом разрушения армированных элементов конструкций, так как особую чувствительность к коррозионному растрескиванию проявляют стали повышенной и высокой прочности, используемые в качестве предварительно напряженной арматуры. Этот вид разрушения во многих случаях приносит значительный материальный ущерб и может быть причиной серьезных аварий. Например, обрушение моста через реку Огайо, которое произошло 1967 году после 40 лет эксплуатации, стало причиной гибели сорока шести человек и значительного материального ущерба [9]. В России из-за коррозионного растрескивания арматуры произошла авария пешеходного моста в Пушкино.

На проблему коррозионного растрескивания высокопрочных арматурных сталей обратили внимание в 50-е годы в связи с появлением сообщений об обрывах арматуры и обрушениях конструкций и расширением использования предварительно напряженного железобетона [102]. Коррозионное растрескивание арматурных сталей весьма опасно, так как, как правило, влечет за собой обрушение конструкций. Особая опасность таких обрушений заключается в том, что они происходят внезапно - без каких-либо заметных внешних признаков (увеличенных прогибов, раскрытия трещин, отслоения защитного слоя бетона), которые бы предупреждали о возможности разрушения.

В процессе изготовления и эксплуатации предварительно напряженных армированных конструкций невозможно исключить комплекс внешних факторов (высокие растягивающие напряжения, агрессивная внешняя среда), способствующих реализации наиболее опасного вида коррозионного поражения - коррозионного растрескивания. То есть причинами разрушения конструкций могут выступать воздействия, не предусмотренные проектом, или, по терминологии [10], запроектные воздействия. Для снижения числа аварийных ситуаций важной задачей и является разработка методов прогнозирования состояния строительных, в частности армированных, конструкций. Особая роль здесь должна отводиться методам расчета, учитывающим кинетику взаимодействия конструкций с агрессивными средами с учетом не только влияния агрессивных сред на поведение конструкций, но и обратное влияние напряженно-деформированного состояния конструкций на кинетику взаимодействия конструкций с агрессивными средами. Можно также сказать, что рассматриваемая проблема связана с развитием теории живучести и конструктивной безопасности армированных конструкций в агрессивных условиях эксплуатации. При этом, по мнению В.М. Бондаренко [11,12] рассматривать вопрос безопасности железобетонных конструкций без учета фактора времени не совсем корректно.

Как отмечается в [10] проблема обеспечения безопасности при проектировании, строительстве и эксплуатации в последнее время становится одной из важнейших сторон деятельности научно-

исследовательских, проектных и строительных организаций во многих странах мира. В России она входит в число критических технологий федерального уровня и приоритетных направлений научных исследований Российской академии архитектуры и строительных наук.

Железобетон, как конструкционный материал позволяет создавать весьма сложные конструктивные схемы - пространственные, высотные, большепролетные и т.п. Но реальные свойства железобетона, особенно проявляющиеся при взаимодействии с агрессивными эксплуатационными средами, оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций, и неучет или неправильный учет этих обстоятельств может привести к серьезным ошибкам в оценке работы конструкции.

## **1. Модели и методы расчета элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными хлоридсодержащими средами**

### **1.1. Общие подходы к моделированию поведения конструкций в агрессивных условиях эксплуатации**

Проблеме экспериментального и теоретического исследования поведения элементов конструкций с учетом воздействия различных факторов, в том числе и агрессивной внешней среды в настоящее время начинает уделяться довольно большое внимание. Многие ученые, как в нашей стране, так и за рубежом, занимаются исследованиями влияния различных агрессивных сред на механические характеристики материалов, изучается кинетика деформирования и разрушения и материалов и элементов конструкций. В последнее время появилось ряд работ, в которых поведение армированных элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными эксплуатационными средами, начинает рассматриваться с точки зрения строительной механики и механики деформируемого твердого тела.

Учет воздействия агрессивных сред вносит определенные трудности в расчет элементов конструкций, так как их влияние носит объемный характер, причем изменяется с течением времени. Скорости процессов проникания агрессивных сред в конструкции и взаимодействия с ними нередко весьма малы, поэтому изменение физико-механических свойств по объему конструкции имеет нестационарный характер и может продолжаться в течение всего срока ее эксплуатации. Очевидно, что расчету полей напряжений, необходимых для оценки прочности конструкции, должен предшествовать расчет полей концентрации агрессивной среды в данной конструкции, который сам по себе представляет сложную задачу. Расчет полей концентрации осложняется влиянием полей напряжений и повреждений на характеристики массопереноса.

Достаточно общий обзор существующих подходов к описанию поведения элементов конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах приведен в работах [1- 5], поэтому ниже кратко рассмотрим некоторые из них.

Существующие к настоящему времени многочисленные опытные данные, позволяют считать [13, 14], что не только деформирование, но и разрушение есть не мгновенный акт, а длительный процесс, который начинает развиваться практически с момента приложения к конструкции внешней нагрузки. Температура и агрессивная среда приводят к значительному изменению скорости этого процесса. Поэтому логично считать, что деформация и разрушение конструкций определяется как приложенными нагрузками, так и другими внешними воздействиями. В то же время интенсивность этих внешних воздействий сильно зависит от величины и характера механических напряжений в конструкции, от уровня её поврежденности.

В [15] справедливо отмечалось, что, в силу ряда объективных причин, пока еще нет достаточно надежной физической теории, которая позволила бы корректно описать поведение материалов в агрессивных средах. К настоящему времени ситуация не очень изменилась, поэтому и сейчас возникает необходимость использовать феноменологический подход при построении моделей поведения конструкций, учитывающих влияние агрессивной среды [103]. При построении моделей деформирования и разрушения конструкций в присутствии агрессивной среды обычно используются методы механики сплошной среды и феноменологической термодинамики необратимых процессов [16, 17].

Для того чтобы модели, описывающие поведение материалов и элементов конструкций в агрессивных средах, учитывали физико-химические явления при воздействии агрессивных сред, в систему параметров, характеризующих состояние материала, предложено включать не только механические, но и физико-химические параметры [18, 19].

Как показывают экспериментальные данные, нагруженный материал конструкции, взаимодействующей с агрессивной средой, следует рассматривать с позиций теорий сложных сред. В таких условиях эксплуатации конструкционный материал проявляет свойства физической нелинейности при нагружении, с течением времени изменяются его физико-механические характеристики, появляется неоднородность его свойств по объему, степень которой зависит от вида и уровня напряженного состояния, времени и характера воздействия внешней агрессивной среды. Причем физико-механические характеристики материала зависят не только от значений параметров напряженно-деформированного состояния и концентрации среды в определенный момент времени, но и от истории изменения их значений во времени.

Рассмотрим основные подходы, с использованием которых учитывается воздействие агрессивных сред.

Процессы деформирования и разрушения, развивающиеся в конструкциях с течением времени, являются термодинамически необратимыми. Поэтому во многих работах построение моделей деформируемых тел с учетом физико-химических явлений на поверхности и в объеме предлагается производить, используя положения неравновесной термодинамики и механики сплошной среды [20-25].

Энтропийный подход при учете воздействия агрессивной среды является наиболее общим, однако, как отмечается в [26], исследование физических полей и напряженного состояния в такой общей постановке представляет большие, иногда непреодолимые математические трудности.

Поэтому внимание исследователей привлекают также пути, связанные с выбором упрощенных теоретических моделей, позволяющих получать относительно простые расчетные схемы, достаточно корректно описывающие поведение материалов и элементов конструкций в агрессивных средах.

При расчете напряженно-деформированного состояния вязкоупругих тел, вызванного внешними нагрузками и воздействием газообразных и жидких агрессивных сред, диффундирующих через поверхность, в [27] предлагалось использовать аналогию между задачами термовязкоупругости и задачами влагуупругости. Считалось, что уравнения и их решения в задачах термовязкоупругости, справедливы для задач влагуупругости при замене в них деформации, вызванной тепловым расширением на деформацию, вызванную увеличением концентрации диффундирующей среды – набуханием. Если диффундирующая среда существенно влияет на механические свойства материала, то коэффициенты в этих уравнениях будут функциями концентрации агрессивной среды. Задачи расчета элементов конструкций, работающих в агрессивной среде с учетом связанности полей напряжений и концентрации диффундирующей среды очень сложны, их решение в большинстве случаев оказывается возможным лишь численными методами.

Возможный подход к описанию поведения материалов и конструкций в агрессивных средах заключается в том, что механическое разрушение рассматривается как химическая реакция разрыва межатомных связей, несущих механическую нагрузку, причем скорость разрыва напряженных связей определяется не только температурой и глубиной превращения, как в случае термической деструкции, но и величиной растягивающего напряжения [28, 29]. При этом вводится гипотеза, что механические напряжения не изменяют механизма реакций деструкции материалов, и механодеструкция проходит те же стадии, что и деструкция в отсутствии напряжений, однако при этом соотношение между стадиями существенно меняется. Для решения задачи прогнозирования долговечности конструкции нужно установить химический механизм процесса деструкции материала, выяснить количество стадий процесса и зависимость скорости этих стадий от напряжения, температуры, концентрации агрессивной среды и продуктов реакции, определить законы изменения напряжения, температуры и концентрации с течением времени в точках объема конструкции. Так как приходится учитывать взаимовлияние рассматриваемых процессов, то к настоящему времени исследованы только отдельные частные случаи [30].

Еще один подход к учету воздействия агрессивной среды при описании поведения материалов и элементов конструкций заключается в построении математических моделей с использованием методов механики сплошной среды с включением в систему определяющих параметров не только механических, но и физико-химических параметров, учитывающих влияние агрессивной среды на кинетику процессов деформирования и разрушения [31]. Этот подход был развит в работах Саратовской школы механики [18, 19, 32, 1-5, 33]. При использовании этого подхода к моделированию поведения конструкций в агрессивных средах, модель конструкции, взаимодействующей с агрессивной средой, представляется в виде совокупности моделей: модели конструктивного элемента, модели материала, модели воздействия среды, модели наступления предельного состояния. В качестве моделей воздействия агрессивной среды используются модели слоистой неоднородности (описывающие кинетику коррозии металлов),

модели наведенной распределенной неоднородности, пригодные для описания кинетики деградации механических свойств композитов. Для описания слоистой неоднородности используется закон движения фронта изменения механических свойств, а для описания распределенной неоднородности - скалярная функция пространственных координат и времени.

## 1.2. Моделирование поведения элементов конструкций в условиях воздействия агрессивных хлоридсодержащих сред.

К настоящему времени появился ряд работ, в которых исследуется напряженно-деформированное и поврежденное состояние армированной конструкции с одновременным учетом процессов коррозии и бетона и стальной арматуры. В ряде существующих методик прогнозирования срока службы конструкций [34,35,36,37,38] стремятся связать его с инкубационным периодом, т.е. периодом времени, затрачиваемым на проникновение хлоридов через защитный слой бетона и инициализацию коррозии арматуры.

В работах Е.А. Гузеева и сотрудников [39,40] инициализация процесса коррозии арматуры или нарушение сцепления рассматривается как отказ конструкции. Применение данного критерия обосновывается тем, что инкубационный период коррозии арматуры довольно часто представляет преобладающий период времени службы конструкции. Однако в реальности конструкции продолжают работать с корродирующей арматурой до момента наступления предельного состояния по одному из параметров.

Для определения инкубационного периода коррозии арматуры необходимо моделировать кинетику распределения концентрации агрессивной среды по объему конструкции. Существует несколько методов моделирования проникания агрессивной среды в объем конструктивного элемента, однако согласно общему мнению наиболее корректным из них является закон диффузии.

В большинстве работ [34, 6, 35, 41,42] проникание агрессивной среды в конструктивные элементы моделируется вторым законом Фика, который для случая одномерной диффузии имеет вид:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $t$  - время экспозиции в условиях воздействия хлоридсодержащей среды,  $C(x,t)$  – концентрация ионов хлора на расстоянии  $x$  от поверхности конструкции в момент времени  $t$ ,  $D$  – коэффициент диффузии хлорида.

Аналитическое решение уравнения (1), при условии, что начальная концентрация хлорида равна нулю, а коэффициент диффузии и поверхностная концентрация хлорида постоянны (соответствующее случаю проникания среды в полуограниченное тело) имеет вид:

$$C(x,t) = C_{\infty} \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right), \quad (2)$$

где  $C_{\infty}$  – равновесная концентрация хлорида на поверхности бетона и  $\operatorname{erf}$  – функция ошибок Гаусса (интеграл вероятности ошибки).

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du. \quad (3)$$

В случае если начальная концентрация хлорида  $C_n$  отлична от нуля и равномерно распределена по объему тела решение уравнения (1) при прочих прежних ограничениях будет иметь вид:

$$C(x,t) = C_n + (C_{\infty} - C_n) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (4)$$

Зная значение критической концентрации  $C_{корр.}$ , т.е. концентрации, при достижении значения которой в области размещения арматуры последняя начинает корродировать, из уравнения (4) можно найти инкубационный период коррозии арматуры:

$$T_{инкуб.} = \frac{d^2}{4D} \left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{C_{\infty} - C_{корр.}}{C_{\infty} - C_i} \right) \right]^2 \quad (5)$$

После расчета инкубационного периода коррозии арматуры производится оценка долговечности конструкции, исходя из экспериментально определенной для данного класса арматуры и агрессивной среды скорости коррозионного износа арматуры. Причем, в рассмотренных работах деградация механических свойств бетона под действием проникающей агрессивной среды, как правило, при применении данного подхода не учитывается.

К недостаткам описанного подхода можно отнести его применимость только к случаям одномерного процесса проникания среды в объем конструктивного элемента, ограничения, вводимые на граничные и начальные условия, а также на коэффициент диффузии, что не позволяет учесть влияние напряженно-деформированного состояния материала конструкции и других факторов на кинетику проникания. Описанные ограничения приводят к значительному сужению области применимости описанного подхода.

Учет различных типов граничных условий, снятие ограничения с коэффициента диффузии и переход к многомерному уравнению диффузии позволили бы существенно расширить область применения диффузионной модели проникания, но в подавляющем большинстве случаев получение аналитического решения для них невозможно, применение же численных методов часто также сопряжено со значительными математическими трудностями.

Такие задачи рассматривались в работах [43, 44], где для решения уравнения диффузии хлоридов с переменным коэффициентом диффузии и различными типами граничных условий применялся метод контрольного объема. В этих работах исследовано влияние уровня напряженного состояния на кинетику проникания хлоридов в бетон и показано, что в ряде случаев учет этого влияния необходим. В то же время исследования показали, что можно не учитывать влияние арматурного каркаса на характер распределения концентрационного поля хлоридов по объему армированного элемента.

В работах [19, 1,2,3,5] показано, что в практике инженерных расчетов иногда более рациональным в плане быстрого получения удовлетворительного результата оказывается использование некоторых упрощений или аппроксимаций исследуемых явлений. Вариантом таких упрощений является предположение, что агрессивная среда проникает в объем конструктивного элемента не по закону диффузии, а фронтом (четким или размытым). На рисунке 1 графически представлены профили распределения концентрации, полученные по трем различным моделям проникания агрессивной среды.

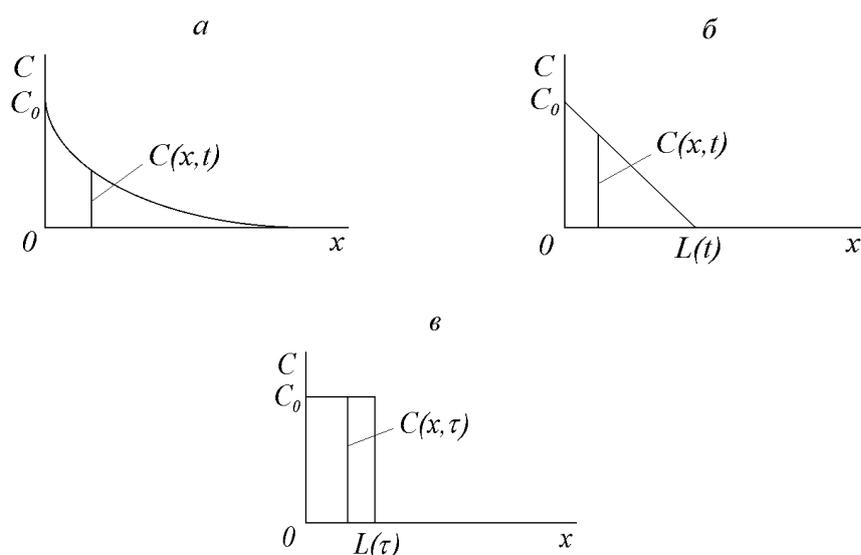


Рисунок 1. Схемы проникания агрессивной среды в объем конструктивного элемента:  
 а – диффузионное; б – размытым фронтом; в – четким фронтом

В связи с тем, что при одномерном процессе диффузии распределение концентрации агрессивной среды по сечению конструктивного элемента по форме близко к треугольному (за исключением хвостовой части, рисунок 1 а) [35], то изменяющееся во времени концентрационное поле можно аппроксимировать функцией вида (так называемым размытым фронтом, рисунок 1 б) [1]:

$$C(x,t) = C_{\infty} \left[ 1 \pm \frac{x}{L(t)} - \frac{a}{2L(t)} \right], \quad (6)$$

в которой:  $x$  - координата рассматриваемой точки;  $t$  - время;  $C_{\infty}$  - концентрация агрессивной среды на поверхности конструктивного элемента;  $a$  - размер элемента вдоль оси  $x$ ;  $L(t)$  - закон продвижения границы размытого фронта вглубь конструктивного элемента (глубина проникания агрессивной среды), причем:

$$L(t) = \alpha t^n, \quad (7)$$

где  $\alpha, n$  - коэффициенты, определяемые из экспериментов.

Использование такой аппроксимации позволяет учесть влияние уровня напряжений в конструктивном элементе на кинетику проникания агрессивной среды в бетон введением в (7) функции  $\alpha = \alpha(\sigma^*, t)$ , где  $\sigma^*$  - осреднённое по сечению напряжение.

Модели проникания среды четким и размытым фронтами просты и достаточно легки в реализации, но имеют такие же ограничения на область применения, что и рассмотренные выше аналитические решения для случая одномерной диффузии. Данные модели соответствуют граничным условиям первого рода со стационарным значением концентрации на границе, для случаев с более сложными граничными условиями модели необходимо усовершенствовать. Модель проникания четким фронтом отражает только кинетику продвижения фронта загрязнения хлоридами и не дает представления о распределении поля концентрации хлоридов. Модель проникания размытым фронтом [1], достаточно хорошо описывает одномерный процесс проникания хлоридов в бетон, при учете описанных выше ограничений на область применения модели. Обе вышеописанные группы моделей являются одномерными, поэтому результаты, полученные при использовании этих моделей, не всегда корректно описывают реально происходящие процессы. В качестве примеров можно привести невозможность учёта при помощи данных моделей угловых эффектов (при проникании хлоридов через две соседние грани скорость проникания в некоторой области внутри угла будет выше, чем в областях, находящихся на таком же расстоянии от одной грани и максимально удаленных от остальных граней), а также невозможность дать объективное представление о распределении поля концентрации в случае, когда проникание осуществляется не через всю грань элемента, а через ее некоторую область.

С использованием фронтальной модели проникания среды (размытым фронтом) в монографиях [1,2,3,5,43,45] исследованы вопросы моделирования поведения конструктивных элементов в условиях воздействия хлоридсодержащей среды и нагрузки и решен ряд задач по прогнозированию поведения конструктивных элементов.

В работе [46] исследуется снижение прочности армированных конструкций, подверженных агрессивным воздействиям и накоплению механических повреждений, которые проявляются в деградации свойств бетона и коррозии арматуры. Разработана модель совместного механико-химического накопления повреждений, содержащая два независимых скалярных параметра механических повреждений для описания процессов деградации в условиях растягивающих и сжимающих напряжений. Химическое повреждение бетона зависит как от процесса диффузии, так и от протекания реакций между диффузантом и составляющими цемента. Для численного решения задачи расчета конструкции применен метод конечного элемента. Проведены численные эксперименты по расчету образцов бетона на скалывание, выполнен статический анализ железобетонной рамы, подверженной механическим и агрессивным воздействиям, дано описание процесса накопления повреждений.

При расчете конструкций необходимо учитывать дополнительный эксцентриситет, возникающий вследствие асимметричного проникания агрессивной среды, вызывающей асимметрично распределенную неоднородность механических свойств материала и коррозионный износ армирующих элементов, и в конечном итоге потерю защитного слоя бетона. В работах [47,3, 1,2, 4,5] моделируются только такие случаи, когда схема работы конструктивного элемента соответствует сжатию или чистому изгибу и под воздействием агрессивной среды, вызывающей изменение положения только одной из главных осей сечения, схема работы не изменяется.

В работах И.Г. Овчинникова и Н.С. Дядькина [43, 48, 49, 50] рассмотрены задачи расчета напряженного состояния неармированных и армированных элементов конструкций простого поперечного сечения с учетом различных схем воздействия хлоридсодержащей среды на конструктивные элементы, в том числе и случаи воздействия среды на часть поверхности элемента. Распределение концентрационного поля хлоридов находится из решения уравнения диффузии, а при расчете сжимаемых и изгибаемых элементов учитывается изменение расчетной схемы элемента вследствие появления наведенной неоднородности, несимметрично распределенной по сечению элемента. То есть, разработана и реализована методика расчета для случая, когда силовая схема работы стержневого элемента соответствует косому изгибу или внецентренному сжатию и с течением времени под воздействием агрессивной среды может изменяться, вследствие изменения положения или поворота главных осей инерции сечения.

В монографии Пухонто Л.М. [51] приведены основные положения проектирования долговечности железобетонных конструкций инженерных сооружений, существующие методы ее оценки, прогнозирования и повышения, понятия и критерии, связанные с долговечностью. Дан анализ механизмов основных деградационных процессов в бетоне и арматуре железобетонных конструкций и соответствующих моделей долговечности.

Группой ученых из Токийского университета [52, 53, 54] предложена многоуровневая модель долговечности железобетонных конструкций, основанная на подходе, объединяющем методы механики материалов и механики конструкций. Модель представляет собой систематизированную базу знаний, содержащую сведения по цементным композитам и строительной механике. Рассматривается расчетная схема для моделирования долговечности железобетона. Предпринята попытка учесть влияние влажности, двуокиси углерода, кислорода, хлоридов и других факторов путем рассмотрения карбонизации, коррозии, изменения поврежденности с использованием соответствующих уравнений.

## 2. Моделирование поведения конструкций при совместном действии хлоридной коррозии и карбонизации

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что во многих случаях хлоридная коррозия сопровождается карбонизацией, происходящей в результате диффузии углекислого газа, который в необходимом количестве содержится в воздухе.

Вопросам построения моделей поведения железобетонных конструкций в условиях совместного действия карбонизации и хлоридов посвящены работы [55,56,57]. В них показано, что для построения модели процесс карбонизации, который продолжается в карбонизированном слое бетона при увеличении концентрации  $CaCO_3$  до полного израсходования  $Ca(OH)_2$  (рис. 2,а,б,в), описывается с использованием специально вводимого параметра  $\mu$ , изменяющегося от 0 до 1 (рис. 2, г):

$$\mu = \frac{C_{тек}^{CaCO_3}}{C_{max}^{CaCO_3}}, \quad (8)$$

где  $C_{тек}^{CaCO_3}$  – концентрация  $CaCO_3$  в заданной точке сечения;  $C_{max}^{CaCO_3}$  – максимальная концентрация  $CaCO_3$  (реакция уже завершилась).

Скалярный параметр химического взаимодействия  $\mu$  ( $0 \leq \mu \leq 1$ ) характеризует уровень химических превращений в точке конструкции при взаимодействии углекислого газа с гидроксидом кальция, при котором образуется карбонат кальция. При  $\mu \approx 0$  – карбонизация в точке еще не началась, при  $0 < \mu < 1$  – происходит процесс карбонизации, при  $\mu = 1$  процесс карбонизации завершился (рис. 2, г).

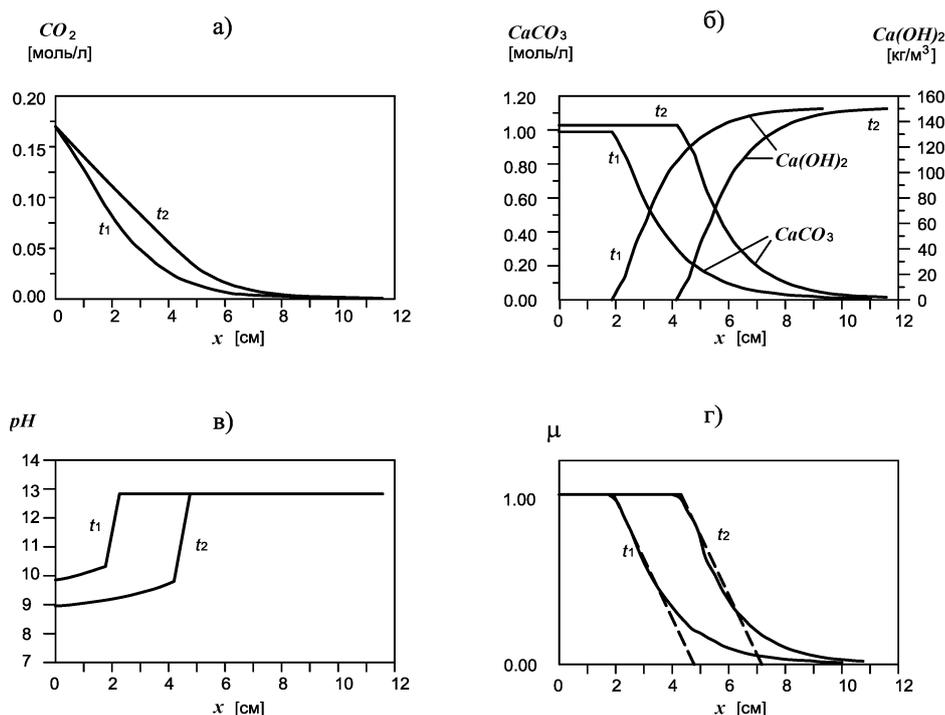


Рисунок 2. Распределение углекислого газа (а), гидроксида и карбоната кальция (б), водородного показателя (в) и параметра химического взаимодействия  $\mu$  (г) по глубине бетонного сечения в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ .

Кинетика изменения параметра  $\mu$  описывается уравнением:

$$\frac{d\mu}{dt} = q\mu(1 - \mu), \quad (9)$$

где  $q$  – коэффициент, учитывающий свойства бетона и интенсивность воздействия окружающей среды. Решение уравнения (9) при  $q = \text{const}$  имеет вид логистической кривой,

$$\mu = \left(1 + g_0 e^{-qt}\right)^{-1}, \quad g_0 = (1 - \mu_0) / \mu_0, \quad (10)$$

В качестве модели проникания углекислого газа в бетон на основании экспериментальных данных используется уравнение диффузии или модель проникания в форме размытого фронта.

Модель деформирования железобетона при совместном действии карбонизации и хлоридной коррозии представляет собой сочетание моделей нагружения, конструктивного элемента, воздействия агрессивной среды (карбонизации и хлоридной коррозии), деформирования материала с учетом изменений, вызванных действием агрессивной среды и модели коррозионного износа арматуры.

Бетон рассматривается как нелинейный, разномодульный композитный материал. При совместном воздействии хлоридной коррозии и карбонизации диаграмма деформирования бетона принимается в виде:

$$\sigma = \begin{cases} A_{0p} \chi_1(\mu) \psi_1(C) \varepsilon - B_{0p} \chi_2(\mu) \psi_2(C) \varepsilon^3, & \sigma > 0; \\ A_{0c} \chi_1(\mu) \psi_1(C) \varepsilon - B_{0c} \chi_2(\mu) \psi_2(C) \varepsilon^3, & \sigma < 0, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\psi(C)$  – функция влияния хлоридной коррозии;  $\chi(\mu)$  – функция влияния карбонизации;  $C$  – концентрация хлоридов.

Модель коррозионного износа арматуры принимается в виде:

$$\delta = \begin{cases} 0, & t \leq t_{inc}; \\ \alpha(t - t_{inc})^\beta, & t > t_{inc} \end{cases} \quad (12)$$

где  $\delta$  – глубина коррозии арматуры;  $t_{inc}$  – инкубационный период.

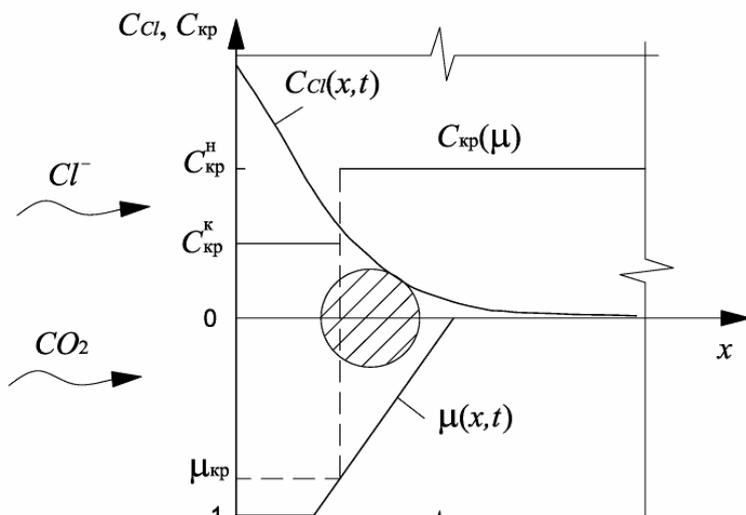


Рисунок 3. Схема проникновения хлоридов и углекислого газа в железобетонный конструктивный элемент

При карбонизации бетона критическая концентрация хлоридов, при которой начинается коррозия арматуры, уменьшается в два раза, т.е.

$$C_{кр}^k = C_{кр}^n / 2 \quad (\text{рисунок 3}).$$

Следовательно, и инкубационный период при карбонизации будет меньше, т.е.

$$t_{inc}^{карб.} < t_{inc}^{без карб.}$$

В работах [55,56,57,58] описаны методики расчета железобетонных элементов транспортных сооружений с учетом совместного воздействия карбонизации и хлоридсодержащей среды, позволяющие прогнозировать их поведение и проведено исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных стоек и балок мостовых сооружений.

## Литература

1. Овчинников И.Г. Моделирование поведения железобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред / И. Г. Овчинников, В. В. Раткин, А. А. Землянский. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. - 232 с.
2. Овчинников И.Г. Работоспособность сталежелезобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред / И. Г. Овчинников, В. В. Раткин, Р. Б. Гарибов. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2002. - 156 с.
3. Овчинников И.Г. Влияние хлоридсодержащих сред на прочность и долговечность пластин на упругом основании / И. Г. Овчинников, А. В. Кривцов, Ю. П. Скачков. - Пенза: ПГАСА, 2002. - 214 с.
4. Овчинников И.Г. Моделирование ползучести железобетонных элементов конструкций транспортных сооружений в агрессивных средах / И. Г. Овчинников, М. С. Пшеничников, В. В. Раткин. - Саратов: СГТУ, 2001. - 140 с.
5. Овчинников И.Г. Прочность и долговечность железобетонных конструкций в условиях сульфатной агрессии / И.Г. Овчинников, Р.Р. Инамов, Р. Б. Гарибов. - Саратов: изд-во Сарат. ун-та, 2001. - 163 с.
6. Bamforth P. B. Definition of exposure classes and concrete mix requirements for chloride contaminated environments / P. B. Bamforth // Proc. 4th Int. Symp. On Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. - Cambridge, 1996. - P. 176-188.
7. Vassie P. R. Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges / P. R. Vassie // Proc. Inst. Civ. Eng. 1984. - Vol. 76. - № 8. - P. 713-723.
8. Найвельт В. В. Почему разрушаются мосты / В. В. Найвельт, А. Н. Слободчиков, Л. А. Феднер // Автомобильные дороги. 1989. - № 10. - С. 10-11.
9. Brown V.F. Research and Standarts / V.F. Brown // Standartization News, 1975. - №5. - P. 8-16.
10. Гениев Г.А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Ключева и др. - М.: Изд-во АСВ, 2004. - 216 с.

11. Бондаренко В.М. Износ, повреждения и безопасность железобетонных конструкций / В.М. Бондаренко, А.В. Боровских. -М.: ИД Русанова, 2000. - 144 с.
12. Бондаренко В.М. Элементы теории реконструкции железобетона / В. М. Бондаренко, А.В. Боровских, С.В. Марков, В.И. Римшин; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. - Н. Новгород: Изд-во нижегор. ун-та, 2002. - 190 с.
13. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. - М.: Наука, 1974. - 560 с.
14. Тамуж В.П. Микромеханика разрушения полимерных материалов / В.П. Тамуж, В.С. Куксенко - Рига: Зинатне, 1978. - 294 с.
15. Карпенко Г.В. Про фізико-хімічну механіку металів / Г.В. Карпенко. - Киев: Наукова думка, 1973. С.176.
16. Седов Л.И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. - М., 1970. - Т. 1. – 492 с.
17. Гузеев Е.А. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов (физические основы) / Е.А. Гузеев, Н.В. Савицкий, А.А. Тютюк. - М.: Наука, 1978. - 128 с.
18. Овчинников И.Г. Математическое моделирование процесса взаимодействия элементов конструкций с агрессивными средами / И. Г. Овчинников, В. В. Петров // Деформирование материалов и элементов конструкций в агрессивных средах: межвуз. научн. сб. - Саратов: СПИ, 1983. - С. 3-11.
19. Овчинников И.Г. О методологии построения моделей конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами / И. Г. Овчинников // Долговечность материалов и элементов конструкций в агрессивных и высокотемпературных средах: межвуз. научн. сб. - Саратов: СПИ, 1988. - С. 17-21.
20. Подстригач Я.С. К определению напряженного состояния тонких оболочек с учетом деформаций, обусловленных физико-химическими процессами / Я.С. Подстригач, В.А. Осадчук // Физико-химическая механика материалов. 1968. - Т. 4. - № 2. - С. 218-224.
21. Киялбаев Д.А. О влиянии химических превращений на напряженное и деформированное состояние / Д. А. Киялбаев // Сб. трудов Ленингр. ин-та инж. ж-д. трансп. - Л., 1971. - Вып. 326. - С. 169-175.
22. Чудновский А.И. О разрушении макротел / А.И. Чудновский // Исследования по упругости и пластичности. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1972. - Вып. 9. - С. 3-41.
23. Никольский С.С. Термодинамика механико-химических процессов в упругих телах / С.С. Никольский // Журнал физической химии, 1973. - Вып. 47. - № 4. - С. 171-176.
24. Дзюба В.С. Уравнения состояния армированных пластиков с учетом механической поврежденности и физико-химических превращений / В.С. Дзюба // Докл. АН УССР, 1974. - Серия А. - № 11. - С. 987-991.
25. Павлина В.С. О взаимодействии процессов деформации и физико-химических явлений в упруго-вязких телах / В. С. Павлина // Мат. методы и физ.-мех. поля. 1978. - Вып. 7. - С. 64-67.
26. Шевчук П.Р. Методика расчета элементов конструкций с покрытиями / П.Р. Шевчук // Мат. методы и физ.-мех. поля, 1978. - Вып. 7. - С. 52-55.
27. Степанов Р.Д. Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах / Р. Д. Степанов, О. Ф. Шленский. - М.: Машиностроение, 1981. - 136 с.
28. Деюн Е.В. Кинетические модели при прогнозировании долговечности полимерных материалов / Е.В. Деюн, Г.Б. Манелис, Е.В. Полианчик и др. // Успехи химии, 1980. - Т. 49. - Вып. 8. - С. 1574-1593.
29. Аввакумов Е.Г. Механические методы активизации химических процессов / Е.Г. Аввакумов. - Новосибирск: Наука, 1979. - 129 с.
30. Манелис Г.Б. Закономерности объемной механической деструкции полимеров / Г.Б. Манелис, Л.П. Смирнов, Е.В. Полианчик // Высокомолекулярные соединения, 1977. - Серия А. - № 19. - С. 86-93.
31. Качанов Л.М. Основы механики разрушения / Л.М. Качанов. - М.: Наука, 1974. - 308 с.
32. Овчинников И.Г. К расчету долговечности элементов конструкций, подвергающихся механическому и химическому разрушению / И. Г. Овчинников // Задачи прикладной теории упругости. - Саратов: Изд-во СГУ, 1985. - С. 107-117.
33. Петров В.В. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, Ю.М. Шихов. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987. - 288 с.
34. Andrade C. Advances In Design And Residual Life Calculation With Regard To Rebar Corrosion Of Reinforced Concrete / C. Andrade, D. Izquierdo, J. Rodriguez // Бетон и железобетон. Материалы конференции. - М., 2005. - P.36-39.

35. Berke N.S. Predicting Chloride Profiles in Concrete / N. S. Berke, M. C. Hicks // Corrosion (USA). 1994. - № 3. - P. 234-239.
36. Gaal G.C. Prediction of deterioration of concrete bridges in the Netherlands / G. C. Gaal, C. Veen, M. H. Djourai // Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. - Barcelona, 2002. – P. 61-63
37. Pommersheim Clifton I. Prediction of Service-Life / Clifton I. Pommersheim // Mater. et Constr. 1985. - Vol. 18. - № 103. - P. 21-30.
38. Thoft-Christensen P. Deterioration of concrete structures / P. Thoft-Christensen // Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. - Barcelona, 2002. – P. 65-69.
39. Гузеев Е.А. Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии бетона третьего вида / Е. А. Гузеев, Н. В. Савицкий // Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах. - М., 1988. - С. 16-19.
40. Гузеев Е.А. Расчет напряженно-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов с учетом кинетики сульфатной коррозии бетона / Е. А. Гузеев, Н. В. Савицкий, А. А. Тютюк // Защита бетона и железобетона от коррозии. Сб. тр.; под ред. С. Н. Алексева, В.Ф. Степановой. - М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1990. - С. 59-66.
41. Stratfull R.F. Corrosion Testing of Bridge Decks / R. F. Stratfull, W. J. Joukovich, D. L. Spellman // Transportation Research Record № 539. Transportation Research Board. 1975. - P. 50-59.
42. Takegami H. Generalized model for chloride ion transport and equilibrium in blast furnace slag concrete / H. Takegami, K. Ishida, K. Maekawa // Proceedings of JCI, 2002. - №24 (1). - P. 633-638.
43. Овчинников И.Г., Дядькин Н.С. Расчет элементов конструкций с наведенной неоднородностью при различных схемах воздействия хлоридсодержащих сред. Изд-во СГТУ. Саратов, 2003. 220 с.
44. Овчинников И.И., Дядькин Н.С. Методы решения уравнений, описывающих проникание хлоридсодержащих сред в конструктивные элементы мостовых сооружений // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред. Межвуз. науч. сб. 2005. Саратов. СГТУ, с. 54 – 61.
45. Овчинников И.И., Наумова Г.А. Накопление повреждений в стержневых и пластинчатых армированных конструкциях, взаимодействующих с агрессивными средами. Волгогр. гос. архит. – строит. ун-т. Волгоград. Изд – во ВолгГАСУ. 2007. 272 с.
46. Pommersheim Clifton I. Prediction of Service-Life / Clifton I. Pommersheim // Mater. et Constr. 1985. - Vol. 18. - № 103. - P. 21-30.
47. Гарибов Р.Б. Сопротивление железобетонных элементов конструкций воздействию агрессивных сред / Р.Б. Гарибов. - Изд-во СГУ. Саратов, 2003. - 228 с.
48. Дядькин Н.С., Овчинников И.Г. Расчет концентрационных полей и напряженно- деформированного состояния в сжимаемом армированном конструктивном элементе с частично нарушенной антикоррозионной защитой // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред: Межвуз. науч. сб. - Саратов: СГТУ, 2001. - С. 23-29.
49. Овчинников И.Г. Модель деформирования стойки из железобетона, работающей в хлоридсодержащей среде / И.Г. Овчинников, В.В. Раткин , Н.С. Дядькин // Изв. вузов. Строительство, 2000. - № 6. - С. 4-10.
50. Овчинников И.Г. Неоднородность распределения хлорид-содержащей среды, проникающей в армированный конструктивный элемент через частично защищенную поверхность / И.Г. Овчинников, Н.С. Дядькин // Изв. вузов. Строительство, 2002. - № 9. - С. 24-31.
51. Пухонто Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) / Л. М. Пухонто. - М.: Издательство АСВ, 2004. 424 с.
52. Maekawa K. Modeling of structural performances under coupled environmental and weather actions / K. Maekawa, T. Ishida // Materials and Structures, 2002. - № 35. - P. 591-602.
53. Maekawa K. Multi-scale modeling of concrete performance integrated material and structural mechanics / K. Maekawa, T. Ishida // Journal of Advanced concrete Technology, 2003. - V.1. - №2. - P. 91-126.
54. Takegami H. Generalized model for chloride ion transport and equilibrium in blast furnace slag concrete / H. Takegami, K. Ishida, K. Maekawa // Proceedings of JCI, 2002. - №24(1). - P. 633-638.
55. Маринин, А. Н., Наумова Г.А., Овчинников И.Г. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций при воздействии хлоридной коррозии и карбонизации / А. Н. Маринин, Г. А. Наумова, И. Г. Овчинников // Вестник ВолгГАСУ. – 2007. – Вып. 6 (23). – С. 85-93.

56. Маринин А.Н., Гарибов Р.Б., Овчинников И.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов конструкций в условиях хлоридной коррозии и карбонизации. Саратов. Научное издание. Издат. Центр «Рица». 2008. 296 с.
57. Овчинников И.И., Мигунов В.Н., Скачков Ю.П. Коррозионно-механическое разрушение железобетонных конструкций при одновременном действии хлоридной коррозии и карбонизации//Региональная архитектура и строительство. 2012. №2(13). С.72-78.
58. Калиновский М.И., Овчинников И.И. Напряженно деформированное состояние и долговечность прямоугольной железобетонной трубы при действии карбонизации и хлоридсодержащей среды // Строительные материалы. 2010. №10. С.15-17.
59. Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей / Ф.Ф. Ажогин. - М.: Металлургия, 1974. - 256 с.
60. Василенко И.И. Коррозионное растрескивание сталей / И.И. Василенко, Р.К. Мелехов. - Киев: Наукова думка, 1987, - 264 с.
61. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде / Г.В. Карпенко. - М.: Машгиз, 1963. - 187 с.
62. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов / Б.А. Колачев. М.: Металлургия, 1985. - 217 с.
63. Романив О.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сталей / О.Н. Романив, Г.М. Никифорчин. - М.: Наука, 1986. - 293 с.
64. Стеклов О.И. Стойкость материалов конструкций к коррозии под напряжением / О.И. Стеклов. - М.: Машиностроение, 1990. - 383 с.
65. Герасимов В.В. Коррозионное растрескивание аустенитных нержавеющей сталей / В.В. Герасимов, В.В. Герасимова. - М.: Металлургия, 1976. - 176 с.
66. Коррозия. Справ. изд. / Под ред. Л.Л. Шрайера. - М.: Металлургия, 1981. - 632 с.
67. Эделяну С.В. Коррозионное растрескивание и хрупкость / Эделяну С.В. // Пер. с англ. - М.: Машгиз, 1961. - С. 119
68. Романов В.В. Коррозионное растрескивание металлов / В.В. Романов. - М.: Машгиз, 1960. - 163 с.
69. Антонов В.Г. О механизме разрушений магистральных газопроводов вследствие коррозионного растрескивания под напряжением трубных сталей / В.Г. Антонов, М.М. Кантор // Сб. науч. тр. «Коррозионное растрескивание под напряжением трубных сталей. Проблемы. Решения». - Ухта: СеверНИПИГаз, 1996. - С. 33-37.
70. Мазель А.Г. О стресс-коррозии газопроводов / А.Г. Мазель // Газовая промышленность, 1993. - № 7. - С. 36-39.
71. Сергеева Т.К. Коррозионное растрескивание газопроводных труб в слабокислом грунте / Т.К. Сергеева, Н.И. Волгина, М.В. Илюхина и др.// Газовая промышленность. 1995. № 4. - С. 34-38.
72. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. - М.: Машиностроение, 1990. - 448 с.
73. Рекомендации по расчету магистральных трубопроводов на прочность по теории предельных процессов нагружения. - М.: Изд. ВНИИСТ, 1982. - 40 с.
74. Овчинников И.Г. Модель взаимодействия нагруженных элементов конструкций с водородсодержащей средой и ее приложения / И.Г. Овчинников, А.Б. Рассада // Прикладные проблемы прочности и устойчивости деформируемых систем в агрессивных средах. – Саратов: Сарат. Политех. Ин-т., 1989. - С. 12-16.
75. Овчинников И.Г. Применение теории накопления повреждений к описанию замедленного разрушения элементов конструкций при наводороживании / И.Г. Овчинников, А.Б. Рассада // Тез. докл. 8 обл. науч.-техн.конф. "Научно-технический прогресс в строительстве и подготовке специалистов". - Иваново, 1990. - 70 с.
76. Астафьев В.И. Накопление поврежденности в металлах в условиях коррозионного растрескивания под напряжением / В.И. Астафьев, Л.К. Ширяева. -Изв. АН РАН. МТТ, 1997. - С. 60-68.
77. Астафьев В.И. Накопление поврежденности и коррозионное растрескивание металлов под напряжением / В.И. Астафьев, Л.К. Ширяева. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 1998. - 124 с.
78. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести / Л.М. Качанов. -Изв. АН СССР, 1958. - № 8. - С. 26-31.
79. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения / Ю.Н. Работнов / Вопросы прочности материалов и конструкций. -М.: Изд-во АН СССР, 1959. - С. 5-7.

80. Овчинников И.Г. Моделирование кинетики коррозионного растрескивания конструкций, подвергающихся наводороживанию / И.Г. Овчинников, В.С. Мавзовин // Сб. тр. «Водородная обработка материалов» 2 Междунар. конф. «ВОМ - 98». - Донецк, 1998. - С. 185.
81. Кабанин В.В., Мавзовин В.С., Овчинников И.И., Мавзовина С.Н. Моделирование коррозионного растрескивания оболочечных конструкций. Саратов. Изд-во СГУ. 2006. 124 с.
82. Ржаницын А.Р. Теория длительной прочности при произвольном одноосном и двухосном нагружении / А.Р. Ржаницын // Строительная механика и расчёт сооружений, 1975.- № 4. - С. 25-29.
83. Извольский В.В. Коррозионное растрескивание и водородное охрупчивание арматурных сталей железобетона повышенной и высокой прочности / В.В. Извольский, Н.Н. Сергеев. Тула. Изд-во ТГУ, 2001. - 164 с.
84. Lee Y.-H. Probabilistic assessment of time dependent behavior of prestressed concrete /Y.-H. Lee, K.-W. Seong, D.M. Frangopol // First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management IABMAS 2002. Barcelona, 2002. - P. 1211-1223.
85. Marc A. Maes. Fatigue Reliability Of Corroding Prestressed Concrete Bridges / A. Maes Marc, H. Dilger Walter, Wei Xing // Safety, Risk, Reliability - Trends In Engineering. - Malta, 2001. - P. 245-252.
86. Овчинников И.И. Моделирование проникания хлоридсодержащей среды в предварительно напряженные армированные конструктивные элементы // Актуальные вопросы строительства. Материалы международной научно-технической конференции. 2004. Саранск. Изд-во МГУ. С. 384 – 388.
87. Овчинников И.И. Моделирование коррозионного растрескивания арматуры при оценке долговечности предварительно напряженных армированных конструкций// Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред. Межвуз. науч. сб. 2004. Саратов. СГТУ, с. 50-56.
88. Овчинников, И. И. Идентификация модели коррозионного растрескивания арматурных сталей / И. И. Овчинников // Прогрессивные технологии в обучении и производстве : материалы Всерос. конф. – Камышин, 2004. - С. 87-90.
89. Овчинников И.И., Применение теории длительной прочности А.Р. Ржаницына к описанию коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры// Вестник ВолгГАСУ. Серия «Строительство и архитектура». 2005, вып. 5(17). С. 42 – 47.
90. Овчинников И.И. Деформирование и разрушение арматуры в условиях коррозионного растрескивания// Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Материалы 4 Международной науч.- техн. конф. Пенза.2005. с.80 – 87.
91. Овчинников И.И., Дядькин Н.С. Методы решения уравнений, описывающих проникание хлоридсодержащих сред в конструктивные элементы транспортных сооружений // Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Материалы 4 Международной науч.- техн. конф. Пенза.2005. с.87 -96.
92. Овчинников И.И. Коррозионное растрескивание арматуры в преднапряженных конструкциях транспортных сооружений и его особенности// Проблемы транспорта и транспортного строительства. Сб. науч. Трудов. Часть 1. Саратов. СГТУ. 2005. с. 146 -152.
93. Овчинников И.И. Моделирование коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры с использованием теории длительной прочности А.Р. Ржаницына// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009, №2, с.19-24.
94. Предварительно напряженный железобетон / К.В. Михайлов, Г.И. Бердичевский, Ю.С. Волков и др. - М.: Стройиздат, 1983. - 208 с.
95. Леонгардт Ф. Предварительно напряженный железобетон / Ф. Леонгардт // Пер. с нем. В.Н. Гаранина. - М.: Стройиздат, 1983. - 246 с.
96. Захаров Л.В. Сборные неразрезные железобетонные пролетные строения мостов / Л.В. Захаров, Н.М. Колоколов, А.Л. Цейтлин. - М.: Транспорт, 1983. - 232 с.
97. Иосилевский Л.И. Долговечность предварительно напряженных железобетонных балочных пролетных строений мостов / Л.И. Иосилевский. - М.: Транспорт, 1967. - 288 с.
98. Лившиц Я.Д. Расчет железобетонных конструкций с учетом влияния усадки и ползучести бетона / Я.Д. Лившиц // Киев: Вища школа, 1975. - 280 с.
99. Голышев А.Б. Расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом фактора времени / А.Б. Голышев, В.П. Полищук, И.В. Руденко. - Киев: Будивельник, 1975. - 112 с.

100. Horrignoe G. Nonlinear finite element analysis of deteriorated and repaired concrete structures / G. Horrignoe // Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. - Barcelona, 2002. - P. 6-9.
101. Овчинников И.И. Моделирование процесса появления коррозионных трещин в железобетонных элементах конструкций в условиях хлоридной агрессии // Региональная архитектура и строительство. Пенза. 2011. №1(10). С.72-80.
102. Пузанов А.В., Улыбин А.В. Методы обследования коррозионного состояния арматуры железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 18-25.
103. Ветров С.Н. Специфика обследования состояния железобетонных конструкций в условиях агрессивного воздействия воды / С.Н. Ветров, С.В. Яковлев // Инженерно-строительный журнал. 2010. №7(17). С.35-40.
104. Старцев С.А. Проблемы обследования строительных конструкций, имеющих признаки биоповреждения // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – №7(17). – С. 41-46.
105. Степанов В.Б. Методика определения ширины раскрытия коррозионных трещин для оценки технического состояния железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2012. №5(31). С. 6-11.
106. Землянский А.А., Вертынский О.С. Опыт выявления дефектов и трещин в крупногабаритных резервуарах для хранения углеводородов // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 40-44.