

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2018, №2, Том 5 / 2018, No 2, Vol 5 <https://t-s.today/issue-2-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/01SATS218.pdf>

DOI: 10.15862/01SATS218 (<http://dx.doi.org/10.15862/01SATS218>)

Статья поступила в редакцию 03.03.2018; опубликована 24.04.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Мигунов В.Н., Шамшина К.В. Влияние переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки и сильноагрессивной жидкой хлоридсодержащей среды на кривизну непредварительно напряжённых изгибаемых железобетонных конструкций // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №2, <https://t-s.today/PDF/01SATS218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/01SATS218

For citation:

Migunov V.N., Shamshina K.V. (2018). The effect of variable speed repeated bending loads, and eleagnaceae floridageorgia liquid medium on the curvature of nepredvidennye intense bending of reinforced concrete structures. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/01SATS218.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/01SATS218

УДК 624.21.012.4(043.3)

Мигунов Виктор Николаевич

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия
Доцент, кандидат технических наук
E-mail: Victor5043@rambler.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=661954

Шамшина Ксения Викторовна

ПАО «МРСК Волги» – «Пензаэнерго», Пенза, Россия
Специалист ОМС
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия
Аспирант кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: Kisek90@mail.ru

Влияние переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки и сильноагрессивной жидкой хлоридсодержащей среды на кривизну непредварительно напряжённых изгибаемых железобетонных конструкций

Аннотация. Статья является частью диссертационного исследования авторов. Приводится методика и результаты длительных экспериментальных исследований деформационных свойств, изгибаемых непредварительно напряжённых железобетонных конструкций при различных видах загрузки, как при периодическом воздействии сильноагрессивной жидкой хлоридсодержащей среды в неагрессивных газозвудушных условиях, так и при постоянном воздействии неагрессивной газозвудушной среды.

С помощью разработанной программы экспериментального исследования определены: абсолютные величины и периоды времени затухания прироста кривизны и их функциональные зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки при воздействии агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды, абсолютные величины и периоды времени затухания прироста кривизны и их функциональные зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки при воздействии неагрессивной

газовоздушной среды, абсолютные величины и периоды времени прироста кривизны при воздействии постоянной изгибающей нагрузки и агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды, абсолютные величины и периоды времени прироста кривизны при воздействии постоянной нагрузки и неагрессивной газовоздушной среды и относительные результаты численного анализа опытных данных, полученных при действии переменной ступенчатой повторной и постоянной изгибающих нагрузок как в периодически воздействующей сильноагрессивной жидкой хлоридсодержащей среде, так и в постоянно воздействующей неагрессивной газовоздушной среде.

Результаты экспериментальных исследований предназначены для строительных норм и правил по расчёту непредварительно напряжённых железобетонных конструкций, содержащих разделы с методиками расчёта жёсткости изгибаемых железобетонных элементов, эксплуатирующихся в неагрессивных и агрессивных условиях.

Ключевые слова: железобетонные конструкции; прямые модели; кривизна; жёсткость; нормальные трещины; арматура; коррозия; продольные трещины; переменная ступенчатая повторная изгибающая нагрузка; постоянная изгибающая нагрузка; агрессивная жидкая хлоридсодержащая среда; неагрессивная газовоздушная среда; результаты исследования; использование

Введение

Железобетонные конструкции с нормативной долговечностью 100 лет при воздействии агрессивных жидкостей в присутствии неагрессивных газов разрушаются и становятся не пригодными к нормальной эксплуатации через 20-50 лет после ввода в их эксплуатацию [1].

Наиболее распространенной агрессивной средой, воздействующей на железобетонные конструкции, особенно в транспортных сооружениях, является хлоридсодержащая среда [2]. Хлоридсодержащие среды разрушают железобетонные конструкции с помощью многостадийного процесса, включающего деградацию бетона, развитие коррозии арматуры, уменьшение сцепления арматуры с бетоном и отслаивание защитного слоя бетона.

Проблема прогнозирования поведения железобетонных элементов при совместном действии нагрузок и хлоридсодержащих сред рассматривалась в отечественных [3-9] и зарубежных публикациях [10, 11].

Агрессивное воздействие на цементный камень начинается с концентрации хлорид-ионов 2500 мг/л [12]. Хлориды связываются с минералами цементного камня. Разрушение бетона в хлоридных средах вызывается образованием хорошо растворимых гидрохлоралюминатов и оксихлоридов кальция и кристаллогидратов солей хлоридов [12]. Присутствие в цементном камне бетона ионов (Cl^- , Na^+) повышает растворимость гидроксида кальция, ускоряя его выщелачивание, а также высокоосновных гидроалюминатов кальция [13]. При потере CaO на 10 %, 20 % и 30 % прочность цементного камня снижается соответственно на 20 %, 25 % и 50 % [14]. Прочность бетона при сжатии и изгибе за 9 месяцев испытаний в растворе NaCl с концентрацией 137 г/л при давлении 1 МПа снижается соответственно на 30-40 и 40-60 %, динамический модуль упругости уменьшается на 10-30 % [15].

Основным видом повреждения железобетона в агрессивных газовых средах является коррозия стальной арматуры по сравнению с бетоном. Карбонизация защитного слоя бетона нарушает стабильность существования оксидного пассивирующего слоя на поверхности стальной арматуры в тяжёлом бетоне в атмосферных газовоздушных условиях [12]. Особенно опасна карбонизация бетона для коррозии арматуры при наличии в бетоне хлоридов, внесённых

с исходными материалами или из окружающей среды, которые вытесняют кислород из защищающих металл адсорбционных оксидных плёнок на поверхности арматуры. В карбонизированном бетоне происходит распад малорастворимых хлоридсодержащих соединений с выделением хлоридов в жидкую фазу [12].

Силовые нормальные трещины являются легитимными проводниками агрессивной среды к поверхности арматуры. Коррозия арматуры в постоянно раскрытой силовой нормальной трещине возникает от локальной депассивации ее поверхности после ликвидации пассивирующих сталь оксидных плёнок [16]. Хлорид-ионы в процессе диффузии во внутренний объём бетона связываются в малорастворимые соединения лишь частично [17, 18].

Периодическое увлажнение железобетонных конструкций водным хлоридсодержащим раствором по сравнению с постоянным его воздействием вызывает более интенсивную коррозию арматуры. При увеличении в два раза числа циклов воздействия жидкой агрессивной среды, содержащей хлорид-ионы, глубина коррозии арматуры повышается на 30-40 % [19].

Воздействие переменной эксплуатационной изгибающей нагрузки на железобетонные конструкции приводит к двукратному увеличению длины участка карбонизации бетона в зоне влияния нормальных трещин по сравнению с постоянной изгибающей нагрузкой, за счёт более интенсивного микроразрушения бетона в приарматурной зоне в результате снижения усилий сцепления бетона с арматурой [20].

Бетон железобетонных конструкций обладает нелинейностью деформирования под нагрузкой. Скорость увеличения деформаций циклической ползучести бетона превосходит скорость развития деформаций простой ползучести при статическом нагружении [21]. Теоретическое прогнозирование напряжённого деформированного состояния непредварительно напряжённых железобетонных конструкций в отечественных и зарубежных научных работах рассматривается только в постоянно действующей хлоридсодержащей среде и при действии постоянных нагрузок без учета коррозии арматуры в нормальных трещинах защитного слоя бетона.

Постановка цели и задач экспериментального исследования

Величина жёсткости является общей интегральной оценкой прогибов и углов поворота изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых железобетонных элементов. В общем случае значение жёсткости (D) на участке с нормальными трещинами в растянутой зоне выражается через изгибающий момент и величину кривизны $K = 1/R$, где R – радиус дуги:

$$D = \frac{M}{K}. \quad (1)$$

Нормативные документы по расчёту железобетонных конструкций не учитывают влияние переменных нагрузок и агрессивных сред, в том числе хлоридсодержащих, отмеченных в СНиП 2.03.11-85* «Защита строительных конструкций от коррозии», на жёсткость железобетонных конструкций.

В тоже время результаты экспериментальных исследований показывают, что изменение жёсткости в течение времени зависит от коэффициента $\Psi_{s(t)}$, учитывающего неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между нормальными трещинами и величины относительной высоты сжатой зоны $\xi^{(t)}$, которые являются функциями не только времени, но и переменных значений изгибающего момента $M^{(t)}$, действующих в сечении [22].

Для переменных изгибающих нагрузок одного знака ступенчатый вид переменных изгибающих воздействий при высоких уровнях загрузки $\sigma_{\max} > 0,6R_{b,n}$ является наиболее опасным для снижения жёсткости железобетонных конструкций, из-за повышенных деформаций ползучести бетона и арматуры [22, 23].

Объективный расчёт деформирования непредварительно напряжённых изгибаемых железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия переменной нагрузки и жидкой хлоридсодержащей среды, является затруднительным, из-за практического отсутствия экспериментальных данных для идентификации моделей. Поэтому лабораторные экспериментальные испытания на изгибаемых прямых моделях железобетонных конструкций при воздействии на них переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки с высоким уровнем загрузки и агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды определяют актуальное решение для получения и накопления необходимого количества научных экспериментальных результатов.

Целью экспериментального исследования является определение абсолютной величины и периода времени прироста кривизны изгибаемых непредварительно напряжённых железобетонных конструкций при периодическом воздействии агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды в зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки.

Реализация поставленной цели предусматривает решение следующих задач:

- 1) разработка методики проведения эксперимента;
- 2) определение абсолютных величин и периодов времени прироста кривизны и их функциональные зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки при периодическом воздействии агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды;
- 3) определение абсолютных величин и периодов времени прироста кривизны и их функциональные зависимости от параметров переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки при воздействии неагрессивной газовой среды;
- 4) определение абсолютных величин и периодов времени прироста кривизны при действии постоянной изгибающей нагрузки и периодическом воздействии агрессивной жидкой хлоридсодержащей среды;
- 5) определение абсолютных величин и периодов времени прироста кривизны при действии постоянной изгибающей нагрузки и неагрессивной газовой среды;
- 6) проведение сравнительного анализа абсолютных величин и периодов времени прироста кривизны при действии переменной ступенчатой повторной и постоянной изгибающих нагрузок в периодически воздействующей агрессивной жидкой хлоридсодержащей и неагрессивной газовой среде.

Методика экспериментального исследования непредварительно напряжённых железобетонных конструкций при совместном действии переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки и жидкой хлоридсодержащей среды

Основой методики испытания опытных железобетонных элементов на воздействие переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки является проведение сбалансированного многофакторного эксперимента с математической матрицей, в виде

латинского квадрата [24]. Три независимых параметра переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки, выбранные в виде относительного времени действия максимальной

нагрузки в периоде цикла $\eta = \frac{t_{M_{\max}}}{t_{\text{ц}}}$, относительного уровня загрузки минимальной

нагрузкой $\rho = \frac{M_{\min}}{M_{\max}}$ и продолжительности цикла переменной нагрузки ($t_{\text{ц}}$), приняты на четырех уровнях: η (0,1; 0,2; 0,3; 0,4); ρ (0,4; 0,533; 0,666; 0,8) и $t_{\text{ц}}$ – 3,5 суток (84 часа); 14 суток (336 часа); 28 суток (672 часа); 56 суток (1344 часа).

Режим загрузки опытных железобетонных образцов переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузкой в одном цикле приложения нагрузки приведён на рис. 1.

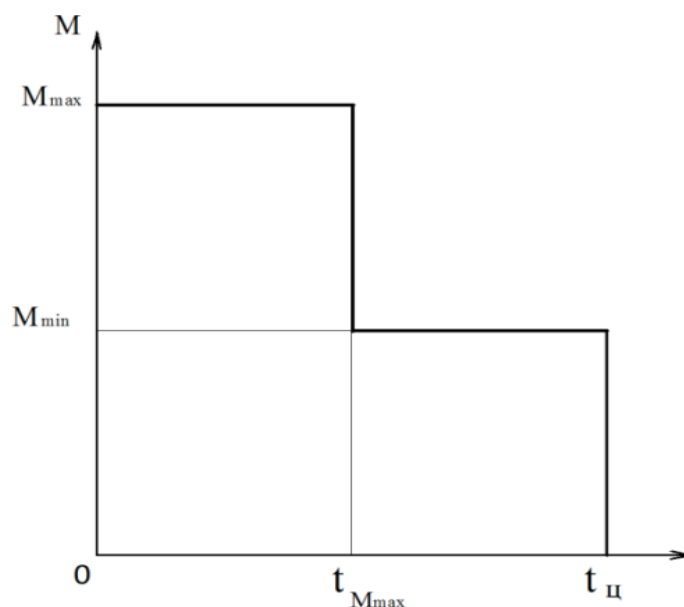


Рисунок 1. Режим загрузки железобетонных образцов переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузкой в одном цикле загрузки: M_{\max} , M_{\min} – соответственно максимальный и минимальный изгибающие моменты; $t_{\text{ц}}$, $t_{M_{\max}}$ – соответственно продолжительность цикла переменной нагрузки и время действия максимальной составляющей переменной нагрузки в периоде цикла времени загрузки (составлено авторами)

Численные значения параметров опытной переменной изгибающей нагрузки и её максимальная составляющая $M_{\max} = 0,77M_{\text{разр}}$, где $M_{\text{разр}}$ – величина разрушающего изгибающего момента, выражают наиболее часто действующие нагрузки на несущие железобетонные конструкции инженерных сооружений и промышленных зданий [22].

Длительные экспериментальные исследования проводятся на 40 прямых моделях непредварительно напряжённых железобетонных конструкций с размерами 1500×200×70 мм, зона чистого изгиба которых длиной 600 мм была свободной от поперечной арматуры. Опытные балки изготавливаются из тяжёлого бетона класса В = 40,4 МПа с толщиной защитного слоя бетона 25 мм. Изгибаемые образцы армируются плоским арматурным каркасом с одним рабочим стержнем из арматуры класса А400 диаметром 12 мм с нормативным сопротивлением $R_{sn} = 475,2$ МПа.

Переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузкой загружаются тридцать два опытных образца, половина из которых испытывает периодическое воздействие жидкой хлоридсодержащей агрессивной среды. Влияние контрольной постоянной изгибающей

нагрузки на деформационные свойства опытных железобетонных образцов исследуется на восьми балках с относительными уровнями загрузки $M_{\text{пост}}/M_{\text{разр}}$ соответственно: 0,9; 0,533; 0,426 и 0,320, в том числе четыре из которых испытывают периодическое воздействие жидкой хлоридсодержащей агрессивной среды.

Опытные изгибаемые железобетонные образцы попарно загружаются на автономных силовых установках, позволяющих на каждой из них испытывать один образец на периодическое воздействие жидкой хлоридсодержащей агрессивной среды, а другой образец – на постоянное воздействие неагрессивной атмосферной газовой среды [25]. Кинематическая схема конструктивного решения силовой установки обеспечивает равные величины приложения изгибающих нагрузок к каждому образцу.

Экспериментальные исследования проводятся в лабораторных неагрессивных газовой среде условиях с периодическим шестизачасовым увлажнением поверхности бетона образцов в течение суток трёхпроцентным водным раствором NaCl до появления коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона. Содержание хлорид натрия в опытном растворе моделирует концентрацию хлорид натрия в морской воде, в которой NaCl присутствует в наибольшем количестве (77-79 %) с суммой хлоридов 88-89 % от общего количества солей [16].

При заданной концентрации хлорид-ионов в опытном растворе, вызывающей ускорение коррозии арматуры в нормальных трещинах бетона с $a_{\text{ср}} = 0,20$ мм в десять раз [26], периодически воздействующая на экспериментальные железобетонные образцы жидкая хлоридсодержащая среда является сильноагрессивной по отношению к ним. Фактическая долговечность эксплуатирующихся железобетонных конструкций при периодическом воздействии жидкой слабоагрессивной хлоридсодержащей среды и переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки, по условию возникновения коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона, составляет 15 лет, что в 3 раза меньше нормативной долговечности несущих предварительно напряжённых железобетонных конструкций, установленных СП 28 133330-2012 «Защита строительных конструкций». Актуализированная редакция НИП 2.03.11-85* «Защита строительных конструкций от коррозии».

Математическое выражение радиуса кривизны в зоне чистого изгиба рассчитывается по величине прогиба в зоне чистого изгиба образцов [27]:

$$R = \frac{\ell^2}{8h}, \quad (2)$$

где ℓ – длина зоны чистого изгиба, равная 600 мм; h – величина прогиба на базе 600 мм в зоне чистого изгиба.

Прогибы опытных железобетонных образцов в зоне чистого изгиба определяются с помощью переносного компаратора с точностью измерения 5 мкм.

Программа экспериментального исследования предусматривает определение функционального изменения прироста кривизны экспериментальных образцов в зависимости от параметров опытной переменной изгибающей нагрузки при верхнем уровне загрузки.

Функциональные уравнения прироста величин кривизны и функциональные уравнения периода времени прироста кривизны в виде произведения функциональных зависимостей от независимых значений параметров опытной переменной изгибающей нагрузки имеют математическое выражение [24]:

$$\Delta K_{(t)} = K \cdot f(\eta) \cdot f(\rho) \cdot f(t_{\text{п}}), \quad (3)$$

где K – усреднённый коэффициент для шестнадцати комбинаций параметров опытной переменной изгибающей нагрузки.

Результаты экспериментального исследования

Длительные экспериментальные испытания продолжались в течение 370 суток и были завершены после появления коррозионных продольных трещин с шириной раскрытия $a_T = 20$ мкм между нормальными трещинами в защитном слое бетона балок, испытывающих воздействие переменной изгибающей нагрузки и жидкой агрессивной хлоридсодержащей среды.

Анализ результатов испытания, полученных при верхнем уровне загрузки переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузкой, более объективно определяет кинетику прироста кривизны, по сравнению с традиционными методами расчета, так как на высоких уровнях нагружения при малых увеличивающихся значениях изгибающего момента происходит значительный рост кривизны, что усложняет итерационный процесс расчета [14].

Функциональные зависимости кинетики кривизны во времени на опытных балках рассчитываются с помощью программы “Microsoft Excel”. Благодаря полученным результатам экспериментальных исследований, показывающих затухающий характер кинетики изменения кривизны во времени опытных железобетонных образцов, нагруженных как переменной ступенчатой повторной, так и постоянной изгибающими нагрузками, была выбрана математическая модель кинетики кривизны в виде функциональной зависимости $K(t) = K_{\max(t)} - \Delta K_{(t)} \cdot e^{-kt}$, где $K_{\max(t)}$ – максимальное значение кривизны во времени; $\Delta K_{(t)}$ – прирост кривизны во времени; k – коэффициент; t – время.

Значение прироста кривизны изгибаемых образцов во времени определяется с помощью уравнения:

$$\Delta K(t) = K_{\max(t)} - K_{\min}, \quad (4)$$

где $\Delta K(t)$ – величина прироста кривизны во времени; $K_{\max(t)}$ – максимальное значение прироста кривизны во времени; K_{\min} – значение кривизны опытного элемента после первого нагружения; t – время.

Полученные значения кинетики кривизны во времени на опытных образцах при действии переменной изгибающей нагрузки с верхним уровнем загрузки и постоянной изгибающей нагрузки в агрессивных условиях испытания показывают 95 % их преимущественный рост в первой трети периода времени испытания. Эта особенность кинетики кривизны учитывается выбором величин 95 % и 100 % прироста значений кривизны во времени в процессе теоретического анализа прироста значений кривизны опытных образцов, испытывающихся как в агрессивной, так и неагрессивной средах.

Функциональные уравнения 95 % и 100 % прироста кривизны в зависимости от параметров опытной переменной изгибающей нагрузки в агрессивных и неагрессивных условиях испытания, максимальные и минимальные значения прироста кривизны опытных железобетонных балок для наиболее неблагоприятных и благоприятных величин параметров экспериментальной переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки, принятых в эксперименте, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Вид среды	Единица измерения	$\Delta K = f(\eta \rho t_u)$	Максимальные (минимальные) значения прироста кривизны опытных железобетонных балок для наиболее неблагоприятных (благоприятных) величин параметров экспериментальной переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки
Н	1/м	$\Delta K_{95} = 6,00018 \cdot (68,93 + 12,667 \cdot \eta)(20,25 + 98,872 \rho)(79,45 - 0,018 t_u)$	111,580(41,752)
Н	1/м	$\Delta K_{100} = 6,000176 \cdot (71,93 + 14,667 \cdot \eta)(171,299 \rho - 23,407)(82,59 - 0,017 t_u)$	128,500(43,771)
А	1/м	$\Delta K_{95} = 6,00165 \cdot (18,87 + 44,333 \cdot \eta)(0,64 + 55,639 \rho)(50,99 - 0,024 t_u)$	87,369(10,603)
А	1/м	$\Delta K_{100} = 6,00092 \cdot (21,07 + 50,333 \cdot \eta)(3,09 + 55,260 \rho)(53,933 - 0,02 t_u)$	93,685(16,368)

Примечание: Н, А – соответственно неагрессивные и агрессивные условия испытания (составлено авторами)

$$\Delta K = 1/R \cdot 10^{-6}, 1/м$$

ΔK_{95} и ΔK_{100} – соответственно 95 % и 100 % значения прироста величины кривизны в зоне чистого изгиба; неблагоприятными (благоприятными) величинами параметров переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки являются значения, способствующие увеличению (уменьшению) кривизны.

В функциональных уравнениях в табл. 1 параметры переменной ступенчатой повторной нагрузки $\eta = t_{M \max} / t_u$ и $\rho = M_{\min} / M_{\max}$ прямо пропорционально влияют на прирост кривизны, а параметр t_u имеет обратно пропорциональную зависимость. Наибольшее и наименьшее влияние на увеличение прироста кривизны оказывают соответственно параметры $\rho = M_{\min} / M_{\max}$ и $\eta = t_{M \max} / t_u$.

Абсолютные и относительные значения 95 % и 100 % прироста кривизны опытных железобетонных балок, испытывающихся в неагрессивных и агрессивных условиях в зависимости от неблагоприятных и благоприятных величин параметров экспериментальной переменной изгибающей нагрузки, полученные по данным табл. 1, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Процент прироста кривизны				
	Н при Е (Б)	А при Е (Б)	Н при Е/Б; Е; Б (А при Е/Б; Е; Б)	Е при Н/А (Б при Н/А)
95	111,580 (41,752)	87,369 (10,603)	111,580/41,752=2,672 (87,369/10,603=8,240)	111,580/87,369=1,277 (41,752/10,603=3,938)
100	128,500 (43,771)	93,685 (16,368)	128,500/43,771=2,936 (93,685/16,368=5,724)	128,500/93,685=1,372 (43,771/16,368=2,674)
95/100	- (-)	- (-)	111,580/128,500=0,868 (87,369/93,685=0,933)	- (-)
95/100	- (-)	- (-)	41,752/43,771=0,954 (10,603/16,368=0,648)	- (-)

Примечание: $\Delta K = 1/R \cdot 10^{-6}, 1/м$; Н, А – соответственно неагрессивные и агрессивные условия испытания Е и Б – соответственно неблагоприятные и благоприятные величины параметров экспериментальной переменной изгибающей нагрузки (составлено авторами)

Функциональные уравнения продолжительности периода времени в сутках 95 % и 100 % прироста кривизны балок в зависимости от параметров опытной переменной изгибающей нагрузки в неагрессивной и агрессивной средах, максимальные и минимальные значения

периода времени изменения их кривизны для неблагоприятных и благоприятных величин параметров экспериментальной переменной изгибающей нагрузки показаны в табл. 3.

Таблица 3

Вид среды	Единица измерения	$T = f(\eta \rho t_{ц})$	Максимальные (минимальные) значения периода времени прироста кривизны опытных железобетонных балок для наиболее неблагоприятных (благоприятных) величин параметров экспериментальной переменной ступенчатой повторной изгибающей нагрузки
Н	сутки	$T_{95} = 0,0000539 \cdot (599 - 570 \cdot \eta) (124,4 + 502\rho) (394 + 0,073 t_{ц})$	7562(2602)
Н	сутки	$T_{100} = 0,00000186 \cdot (4081 - 3720 \cdot \eta) (969 + 3194\rho) (2662 + 0,540 t_{ц})$	8237(2934)
А	сутки	$T_{95} = 0,000059 \cdot (267 - 513 \cdot \eta) (129 + 7,5\rho) (147 + 0,00694 t_{ц})$	269(71)
А	сутки	$T_{100} = 0,0000101 \cdot (1601 - 2540 \cdot \eta) (387 + 903\rho) (1048 + 0,00854 t_{ц})$	1598(622)

Примечание: Н, А – соответственно неагрессивные и агрессивные условия испытания. T_{95} и T_{100} значения периодов времени прироста соответственно 95 % и 100 % прироста величины кривизны (составлено авторами)

Функциональные уравнения в табл. 3 показывают одинаковые зависимости продолжительности периода времени 95 % и 100 % прироста кривизны балок в неагрессивных и агрессивных условиях испытания от параметров опытной переменной изгибающей нагрузки. Параметры $t_{ц}$ и $\rho = M_{\min}/M_{\max}$ прямо пропорционально увеличивают период времени затухания прироста кривизны, по сравнению с параметром $\eta = t_{M_{\max}}/t_{ц}$.

В табл. 4 представлены абсолютные значения периода времени 95 % и 100 % прироста кривизны опытных железобетонных балок в неагрессивных и агрессивных условиях испытания в зависимости от неблагоприятных и благоприятных величин параметров экспериментальной переменной изгибающей нагрузки, полученных по данным табл. 3.

Таблица 4

Процент прироста кривизны	Абсолютные значения ДК		Относительные значения ДК	
	Н при Е(Б)	А при Е(Б)	Н при Е/Б; Е; Б (А при Е/Б; Е; Б)	Е при Н/А (Б при Н/А)
95	7562 (2602)	269 (71)	7562/2602=2,906 (269/71=3,789)	7562/269=2,811 (2602/71=36,648)
100	8237 (2934)	1598 (622)	8237/2934=2,807 (1598/622=2,569)	8237/1598=5,155 (2934/622=4,717)
95/100	- (-)	- (-)	7562/8237=0,918 (269/1598=0,168)	- (-)
95/100	- (-)	- (-)	2602/2934=0,887 (71/622=0,114)	- (-)

Примечание: Т – сутки; Н, А – соответственно неагрессивные и агрессивные условия испытания. Е и Б – соответственно неблагоприятные и благоприятные величины параметров экспериментальной переменной изгибающей нагрузки (составлено авторами)

Значения 95 % и 100 % прироста кривизны и величины периода изменения 95 % и 100 % прироста кривизны опытных железобетонных балок и их соотношения при действии длительной постоянной изгибающей нагрузки с максимальным и минимальным уровнями загрузки относительно разрушающей нагрузки для неагрессивных и агрессивных условий испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 5

Шифр образцов, с учётом неагрессивного (Н) и агрессивного (А) вида воздействия среды	Постоянная изгибающая нагрузка M , кг·см. Уровень загрузки ($M/M_{\text{разр}}$)	Для 95 % и 100 % величины прироста кривизны (ΔK)		Для 95 % и 100 % значения периода затухания прироста кривизны (T)	
		$\Delta K \cdot 10^{-6}$, 1/м	Отношение величин ΔK	T , сутки	Отношение значений T
1	2	5	6	9	10
Т-1(Н)	84272 (0,9 $M_{\text{разр}}$)	80	$\frac{T-1(Н)}{T-2(А)} = \frac{80}{53} = 1,51$	200	$\frac{T-1(Н)}{T-2(А)} = \frac{200}{50} = 4,0$
		84*	$\frac{T-1(Н)}{T-2(А)} = \frac{84^*}{55^*} = 1,53^*$	750*	$\frac{T-1(Н)}{T-2(А)} = \frac{750^*}{350^*} = 2,14^*$
Т-2 (А)	84272 (0,9 $M_{\text{разр}}$)	53	-	50	-
		55*		350*	
У-5(Н)	29025 (0,31 $M_{\text{разр}}$)	40	$\frac{Y-5(Н)}{Y-6(А)} = \frac{40}{21} = 1,90$	710	$\frac{Y-5(Н)}{Y-6(А)} = \frac{710}{200} = 3,55$
		42*	$\frac{Y-5(Н)}{Y-6(А)} = \frac{42^*}{22^*} = 1,91^*$	4850*	$\frac{Y-5(Н)}{Y-6(А)} = \frac{4850^*}{1350^*} = 3,59^*$
У-6 (А)	29025 (0,31 $M_{\text{разр}}$)	21	-	200	-
		22*		1350*	

Примечание: * – для 100 % величины прироста кривизны (составлено авторами)

Численные данные табл. 5 показывают, что при действии максимальной постоянной изгибающей нагрузки с $M_{\text{оп}} = 0,9M_{\text{разр}}$ на опытные железобетонные образцы значение 100 % прироста кривизны в неагрессивных условиях испытания в 1,53 раза превышает величину 100 % прироста кривизны в агрессивных условиях испытания, а 100 % период времени затухания прироста кривизны в неагрессивных условиях увеличивается в 2,14 раза по сравнению со 100 % периодом времени затухания прироста кривизны в агрессивных условиях. При действии минимальной изгибающей нагрузки с $M_{\text{оп}} = 0,31 M_{\text{разр}}$ на опытные железобетонные балки 100 % прирост кривизны в неагрессивных условиях испытания в 1,91 раза увеличивается по сравнению со 100 % приростом кривизны в агрессивных условиях испытания, а 100 % период времени затухания прироста кривизны в неагрессивных условиях испытания превышает в 3,5 раза 100 % период времени затухания прироста кривизны в агрессивных условиях.

Уменьшение уровня загрузки постоянной изгибающей нагрузки увеличивает период времени затухания прироста кривизны. На рис. 2 показана графическая функциональная зависимость 100 % периода времени затухания 100 % прироста кривизны экспериментальных образцов при действии постоянной изгибающей нагрузки в неагрессивной среде.

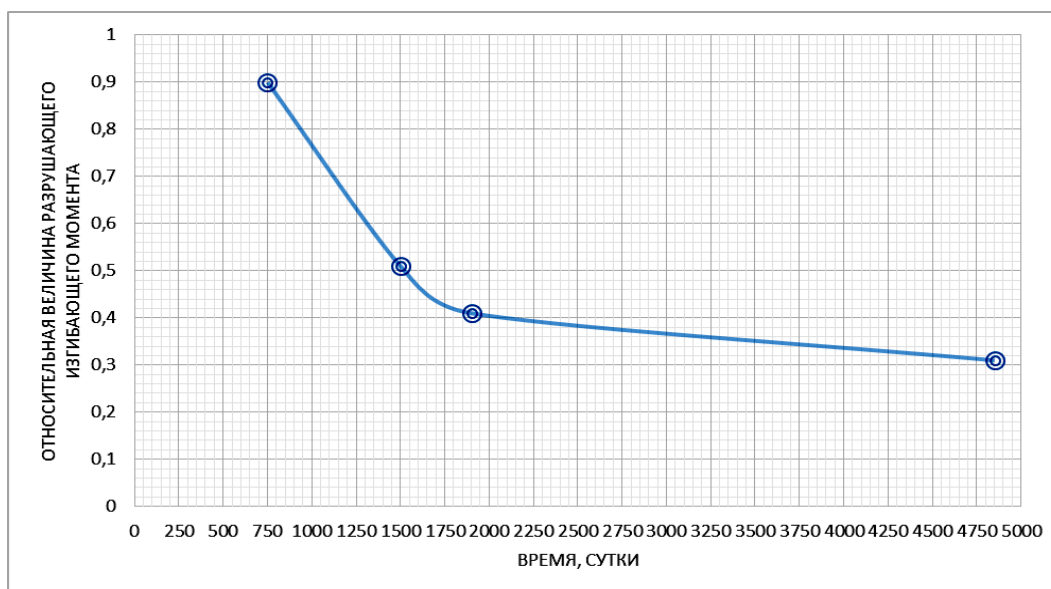


Рисунок 2. Графическая функциональная зависимость 100 % периода времени изменения 100 % прироста кривизны балок при действии опытной постоянной изгибающей нагрузки в неагрессивной среде в зависимости от относительной величины разрушающего изгибающего момента (составлено авторами)

Численные данные на рис. 2 показывают, что при снижении уровня постоянной изгибающей нагрузки в 2,9 раза период времени затухания 100 % прироста кривизны балок увеличивается в 6,5 раза.

Абсолютные и относительные значения 95 % и 100 % средней величины прироста кривизны и средней величины периода времени затухания 95 % и 100 % средней величины прироста кривизны при действии опытных переменной изгибающей нагрузки с верхним уровнем загрузки и постоянной изгибающей нагрузки с максимальным уровнем нагружения в неагрессивной и агрессивной средах приведены в табл. 6.

Таблица 6

Условия испытания: неагрессивные (Н), агрессивные (А)	Переменная изгибающая нагрузка ($M_{\text{перем}} = 0,77M_{\text{разр}}$) Постоянная изгибающая нагрузка ($M_{\text{пост}} = 0,9M_{\text{разр}}$)	Для 95 % и 100 % средней величины прироста кривизны ΔK		Для средней величины периода времени затухания 95 % и 100 % среднего значения прироста кривизны, T , относительно различных сред	
		$\Delta K \cdot 10^{-6}$, 1/метр	$\frac{\Delta K_{M_{\text{пер}}}}{\Delta K_{M_{\text{пост}}}}$ $\frac{\Delta K_{M_{\text{пост}}^H}}{\Delta K_{M_{\text{пост}}^A}}$	Величина T , сутки	$\frac{T_{M_{\text{пер}}}}{T_{M_{\text{пост}}}}$ $\frac{T_{M_{\text{пост}}^H}}{T_{M_{\text{пост}}^A}}$
Н	$M_{\text{перем}}$	88; 92*	1,10	515; 3456*	2,58
Н	$M_{\text{пост}}$	80; 84*	1,10*	200; 750*	4,61*
А	$M_{\text{перем}}$	57; 59*	1,07	177; 1174*	3,54
А	$M_{\text{пост}}$	53; 55*	1,07*	50; 350*	3,35*
Н	$M_{\text{перем}}$	80; 84*	1,51	200; 750*	4,00
А	$M_{\text{пост}}$	53; 55*	1,53*	50; 350*	2,14*
Н	$M_{\text{перем}}$	88; 92*	1,66	515; 3456*	10,30
А	$M_{\text{пост}}$	53; 55*	1,67*	50; 350*	9,87*
А	$M_{\text{перем}}$	57; 59*	0,71	177; 1174*	0,89
Н	$M_{\text{пост}}$	80; 84*	0,70*	200; 750*	1,57*

Примечание: * – для 100 % величины прироста кривизны (составлено авторами)

Анализ и обсуждение результатов экспериментального исследования

С помощью разработанной методики экспериментального исследования и полученных опытных данных установлены функциональные уравнения 95 % и 100 % величин прироста кривизны и периодов времени их изменения в зависимости от параметров опытной переменной изгибающей нагрузки в агрессивной жидкой хлоридсодержащей и неагрессивной газовой среде при испытании прямых моделей железобетонных конструкций.

Результаты экспериментального исследования влияния переменной ступенчатой повторной и постоянной изгибающих нагрузок и периодически воздействующей жидкой хлоридсодержащей сильноагрессивной среды на изменение кривизны и период времени её затухания на опытных железобетонных образцах, приведённых в таблицах и на рисунках, с учётом их анализа, позволяют сделать следующие основные выводы:

- относительные значения 100 % прироста кривизны при относительном сравнении неблагоприятных и благоприятных величин параметров опытной переменной изгибающей нагрузки в неагрессивной и агрессивной среде соответственно составляют 2,936 и 5,724;
- относительные значения периода времени прироста кривизны для 95 % и 100 % прироста кривизны при относительном действии неблагоприятных величин параметров опытной переменной изгибающей нагрузки в неагрессивной среде и в агрессивной среде соответственно составляют 0,918 и 0,168;
- относительные значения периода времени прироста кривизны для 95 % и 100 % прироста кривизны при относительном действии благоприятных величин параметров опытной переменной изгибающей нагрузки в неагрессивной среде и в агрессивной среде соответственно равняются 0,887 и 0,114;
- в неагрессивной среде опытная переменная изгибающая нагрузка по сравнению с постоянной изгибающей нагрузкой в 1,10 раза увеличивает средние значения соответственно 100 % и 95 % прироста кривизны, а также в 4,61 раза и 2,58 раза средние величины периода времени затухания соответственно 100 % и 95 % прироста кривизны;
- в агрессивной среде опытная переменная изгибающая нагрузка по сравнению с постоянной изгибающей нагрузкой в 1,07 раза увеличивает средние значения 100 % и 95 % прироста кривизны, а также в 3,35 раза и 3,54 раза средние величины периода времени затухания соответственно 100 % и 95 % прироста кривизны;
- относительные значения для 100 % и 95 % величины прироста кривизны при действии опытной максимальной постоянной изгибающей нагрузки в неагрессивных условиях испытания по сравнению с опытной максимальной постоянной изгибающей нагрузкой в агрессивных условиях испытания соответственно составляют 1,53 и 1,51.
- относительные величины периода времени затухания для 100% и 95% прироста кривизны при действии опытной максимальной постоянной изгибающей нагрузки в неагрессивных условиях испытания по сравнению с постоянной максимальной изгибающей нагрузкой в агрессивных условиях испытания соответственно равняются 2,14 и 4,00.
- в неагрессивной среде при снижении уровня загрузки опытной постоянной нагрузки по отношению к разрушающей нагрузки в 2,9 раза период времени затухания 100 % прироста кривизны увеличивается в 6,5 раза.

Заключение

Полученные результаты экспериментального исследования предназначены для строительных норм и правил по расчёту предварительно напряжённых железобетонных конструкций, содержащих методику расчёта жесткости нормальных сечений железобетонных элементов, испытывающих воздействие переменной нагрузки в неагрессивной газовой и агрессивной жидкой хлоридсодержащей средах.

Авторы выражают особую благодарность доктору технических наук, профессору Овчинникову Игорю Георгиевичу за научное руководство при разработке методики анализа результатов экспериментального исследования и экспертную оценку полученных опытных численных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л. Верификация математической модели для оценки долговечности железобетонных конструкций, работающих в условиях действия жидких агрессивных сред / Механика разрушения строительных материалов и конструкций: Материалы VIII академических чтений РААСН – международной научно-технической конференции. – Казань: КГАСУ, 2014. – С. 298-303.
2. Маринин А.Н., Гарибов Р.Б., Овчинников И.Г. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации. – Саратов: ИЦ «Рата», 2008. – 259 с.
3. Овчинников И.И., Мигунов В.Н. Моделирование ползучести и накопления повреждений в армополимербетонных конструкциях с учётом влияния агрессивной среды // Строительные материалы. 2012. №12. с. 7-10.
4. Мигунов В.Н., Овчинников И.Г. Экспериментальные исследования влияния поперечных и продольных трещин на долговечность, деформационные и прочностные свойства обычных железобетонных элементов в условиях воздействия хлорид-содержащих сред // Сборник ДОРОГИ и МОСТЫ. Выпуск 26/2 М. 2011. с. 173-204.
5. Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Применение нелинейной деформационной модели для анализа поведения армированных пластин на упругом основании, взаимодействующих с хлоридсодержащей средой. Основные соотношения // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1(36). С. 27-38.
6. Мигунов В.Н., Овчинников И.Г., Шамшина К.В. Влияние жидких хлоридсодержащих сред и переменной эксплуатационной нагрузки на деформационные свойства железобетонных элементов и характеристики коррозионного поражения арматуры в расчётных поперечных трещинах бетона // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №6 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/11KO615.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/11KO615.
7. Овчинников И.И., Чэнь Т., Овчинников И.Г. Вероятностное моделирование железобетонной сваи при совместном действии нагрузки и хлоридсодержащей среды // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 4 (29). – С. 55-61.
8. Овчинников И.И., Чэнь Тао, Овчинников И.Г. Вероятностное моделирование поведения армированных мостовых конструкций в агрессивных условиях эксплуатации // Транспортные сооружения, 2017 №4, <https://t-s.today/PDF/03TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/03TS417. С. 1-20.
9. Овчинников И.И., Чэнь Тао, Овчинников И.Г. Вероятностное моделирование несущих железобетонных конструкций предприятий текстильной промышленности

- при совместном действии нагрузки и хлоридсодержащей среды // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. №5. (371). 2017. С. 198-204.
10. Biondini F. & Vergani M. Damage modeling and nonlinear analysis of concrete bridges under corrosion. In: Biondini & Frangopol, editors. Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability. – London. Taylor & Francis Group, 2012. P 209-210.
 11. Frangopol D.M., Akiyama M., Matsuzaki H. Reliability-Based Durability Design and Service Life Assessment of Concrete Structures in an Aggressive Environment. In: Maintenance and Safety of Aging Infrastructure (Edited by D.M. Frangopol and Y. Tsomprana-kis), London, CRC Press / Balkema, Taylor & Francis Group. – 2014. P. 1-26.
 12. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости // дис. ... д-ра техн. наук. – М.: НИИЖБ, 2004. – 432 с.
 13. Москвин В.М., Рубецкая Т.В. Влияние хлористых солей на образование сульфоалюмината кальция // Цемент. – 1953. – № 6. – С. 3-8.
 14. Дронов А.В. Прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями // дисс. ... канд. наук. Белгород. 2017. – 163 с.
 15. Kawadkar K.G., Krishnamoorthy S. Behavior of cement concrete under common salt solution both under hydrostatic and atmospheric pressure // Cement and Concrete Research. – 1981. – V.I. – pp. 103-113.
 16. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев.; Под общей редакцией В.М. Москвина. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
 17. Bob C. Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures. Proceedtngs of the International Conference held at the University of Dundee / C. Bob // Scot-land, UK, 1996. – P. 17-28.
 18. Zivica V. Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbon dioxide // Bulletin of Materials Science. – 2003. – Vol.26. – №6. – P. 605-608.
 19. Шавыкина М.В. Оценка сроков службы железобетонных конструкций при коррозии арматуры // Бетон и железобетон. – 2006. – №5. – С. 26-31.
 20. Гусейнов М.Ш. Коррозия арматуры железобетонных конструкций / М.Ш Гусейнов // сборн. матер. – реком. Первой Всесоюзной конференции метрополитенов 8-10 февраля 1971. – Баку: ДНТОА жел. дор, 1972. – С. 196-200.
 21. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1968. – 323 с.
 22. Барашиков А.Я. Исследование длительной работы железобетонных конструкций при переменных нагрузках // дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 1977. – 297 с.
 23. Александровский С.В. Багрий В.Я. Ползучесть бетона при периодических воздействиях. – М.: Стройиздат, 1970. – 167 с.
 24. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Изд-во Мир, 1972. – 381 с.
 25. Мигунов В.Н. Установка для режимных испытаний железобетонных балок при действии медленно меняющихся нагрузок в присутствии агрессивной среды (статья) // Реферативный журнал строительства и архитектуры, ВНИИС, сер. 17, вып.7 – М., 1983. – С. 39.
 26. Мигунов В.Н. Влияние переменной нагрузки и амплитуды изменения ширины раскрытия трещин на коррозионное поражение арматуры в трещинах железобетонных конструкций // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – № 10. – С. 134-137.
 27. Абрамович М.И., Стародубцева М.Т. Математика, геометрия и тригонометрические функции. – М: Высшая школа, 1976. – 164 с.

Migunov Viktor Nikolaevich

Penza state university of architecture and construction, Penza, Russia
E-mail: Victor5043@rambler.ru

Shamshina Ksenia Viktorovna

IDGC of Volga, PJSC – Penzaenergo, Penza, Russia
Penza state university of architecture and construction, Penza, Russia
E-mail: Kisek90@mail.ru

The effect of variable speed repeated bending loads, and eleagnaceae floridageorgia liquid medium on the curvature of nepredvidennye intense bending of reinforced concrete structures

Abstract. The article is a part of the authors' dissertation research. The article is a part of the authors' dissertation research. The technique and results of long-term experimental researches of deformation properties bent unintentionally strained reinforced concrete structures at different types of loading, both at periodic influence of strongly aggressive liquid chloride-containing environment in nonaggressive gas-air conditions, and at constant influence of nonaggressive gas-air environment are resulted.

Using the developed program of experimental research are defined: absolute values and time periods the damping of growth of curvature and their functional dependence on the parameters of the variable speed repeated bending loads when exposed to a corrosive liquid floridageorgia environment the absolute values and time periods the damping of growth of curvature and their functional dependence on the parameters of the variable speed of the repeated bending load when exposed to non-corrosive gas environment, absolute values and periods of curvature increment time under the influence of a constant bending load and an aggressive liquid chloride-containing medium, absolute values and periods of curvature increment time under the influence of a constant load and a non-aggressive gas-air medium, and the relative results of numerical analysis of experimental data obtained under the action of a variable step repeated and constant bending loads in both a periodically acting strongly aggressive liquid chloride-containing medium and a constantly acting non-aggressive gas-air medium.

The results of experimental studies are intended for building codes and regulations for the calculation of non-welded reinforced concrete structures containing sections with methods for calculating the stiffness of bent concrete elements operated in non-aggressive and aggressive conditions.

Keywords: reinforced concrete structures; the direct model; curvature; stiffness; normal cracks; rebar corrosion; longitudinal cracks; variable speed repeated bending load; a constant bending load; corrosive liquid floridageorgia environment; non-corrosive gas environment; the results of the study; the use of

REFERENCES

1. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Chechetkina E.L. (2014). Verification of the mathematical model to assess the durability of reinforced concrete structures, working in conditions of action of aggressive liquid environments. *KGASU*, pp. 298-303. (in Russian).
2. Marinin A.N., Garibov R.B., Ovchinnikov I.G. (2008). Soprotivlenie zhelezobetonnykh konstruksii vozdeistviyu khloridnoi korrozii i karbonizatsii. [*Resistance of reinforced concrete structures to chloride corrosion and carbonization.*] Saratov: IC "Rata", p. 259.
3. Ovchinnikov I.I., Migunov V.N. (2012). Simulation of creep and damage accumulation in arkapolimetal designs with the influence of aggressive smradi. *Building materials*, 12, pp. 7-10. (in Russian).
4. Migunov V.N., Ovchinnikov I.G. (2011). Experimental study of the influence of transverse and longitudinal cracks on the durability, deformation and strength properties of normal concrete elements under exposure to chloride – containing media. *Collection of ROADS and BRIDGES*, 26(2), pp. 173-204. (in Russian).
5. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. (2013). Application of the nonlinear deformation model for the analysis of the behavior of reinforced plates on an elastic Foundation interacting with a chloride-containing medium. The basic relation. *Magazine of civil Engineering*, 1(36), pp. 27-38. (in Russian).
6. Migunov V.N., Ovchinnikov I.G., Shamshina K.V. (2015). The influence of the liquid floridageorgia environments and variable operational load on the deformation properties of reinforced concrete elements and characteristics of corrosion damage of rebar in the calculation of transverse cracks of concrete. *Naukovedenie*, [online] 6(7). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/11KO615.pdf> (in Russian). DOI 10.15862/11KO615.
7. Ovchinnikov I.I., Chen T., Ovchinnikov I.G. (2016). Probabilistic modeling of reinforced concrete pile under combined action of load and chloride-containing medium. *Regional architecture and construction*, 4(29), pp. 55-61. (in Russian).
8. Ovchinnikov I.I., Chen Tao, Ovchinnikov I.G. (2017). Probabilistic modeling of the behavior of reinforced bridge structures in aggressive operating conditions. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4, pp. 1-20. Available at: <https://t-s.today/PDF/03TS417.pdf> (in Russian). DOI 10.15862/03TS417.
9. Ovchinnikov I.I., Chen Tao, Ovchinnikov I.G. (2017). Probabilistic modeling of load-bearing reinforced concrete structures of textile enterprises under the joint action of load and floridageorgia environment. *News of higher educational institutions. Technology of textile industry*, 5(371), pp. 198-204. (in Russian).
10. Biondini F., Vergani M. (2012). Damage modeling and nonlinear analysis of concrete bridges under corrosion. *Taylor & Francis Group*, pp. 209-210.
11. Frangopol D.M., Akiyama M., Matsuzaki H. (204). Reliability-Based Durability Design and Service Life Assessment of Concrete Structures in an Aggressive Environment. *Taylor & Francis Group*. pp. 1-26.
12. Rosenthal N.K. (2004). Korroziionnaya stoikost' tsementnykh betonov nizkoi i osobo nizkoi pronitsaemosti. [*Corrosion resistance of cement concretes of low and very low permeability.*] Moscow: NIIZHБ, p. 432.

13. Moskvina V.M., Rebecca T.V. (1953). Influence of chloride salts on the formation of it has calcium. *Cement*, 6, pp. 3-8. (in Russian).
14. Dronov A.V. (2017). Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov s korroziionnymi povrezhdeniyami. [*Strength and deformability of reinforced concrete bending elements with corrosion damage.*] Belgorod, p. 163.
15. Kawadkar K.G., Krishnamoorthy S. (1981). Behavior of cement concrete under common salt solution both under hydrostatic and atmospheric pressure. *Cement and Concrete Research*, pp. 103-113. (in Russian).
16. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. (1980). Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity. [*Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection.* Ed. by V.M. Moskvina.] Moscow: Stroyizdat, p. 536.
17. Bob C. (1996). Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee. *Scot-land*, pp. 17-28.
18. Zivica V. (2003). Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbon dioxide. *Bulletin of Materials Science*. 6(26). pp. 605-608.
19. Shavykina M.V. (2006). Estimation of service life of reinforced concrete structures with reinforcement corrosion. *Concrete and reinforced concrete*, 5, pp. 26-31. (in Russian).
20. Huseynov M.Sh. (1972). Corrosion of reinforcement in concrete structures. *DNTOA zhel. dor.*, pp. 196-200. (in Russian).
21. Bondarenko V.M. (1968). Nekotorye voprosy nelineinoy teorii zhelezobetona. [*Some problems of nonlinear theory of reinforced concrete.*] Kharkov: publishing House of Kharkov University, p. 323.
22. Barashikov A.Ya. (1977). Issledovanie dlitel'noi raboty zhelezobetonnykh konstruksii pri peremennykh nagruzkakh. [*Investigation of long-term operation of reinforced concrete structures under variable loads.*] Kiev, p. 297.
23. Aleksandrovsky S.V., Bagriy V.J. (1970). Polzuchest' betona pri periodicheskikh vozdeistviyakh. [*Creep of concrete under periodic stress.*] Moscow: Stroyizdat, p. 167.
24. Schenk H. (1972). Teoriya inzhenerenogo eksperimenta. [*The Theory of engineering experiment.*] Moscow: Publishing house of the World, p. 381.
25. Migunov V.N. (1983). Installation for regime tests of reinforced concrete beams under the action of slowly changing loads in the presence of an aggressive environment. *Abstract journal of construction and architecture*, 7(17), p. 39. (in Russian).
26. Migunov V.N. (2002). Influence of variable load and amplitude of change of crack opening width on corrosion damage of reinforcement in cracks of reinforced concrete structures. *Izv. higher educational. Construction*, 10, pp. 134-137. (in Russian).
27. Abramovich M.I., Starodubtseva M.T. (1976). Matematika, geometriya i trigonometricheskie funktsii. [*Mathematics, geometry and trigonometry functions.*] Moscow: High school, p. 164.