

На правах рукописи



Арленинов Петр Дмитриевич

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ И
ВНЕЦЕНТРЕННО-СЖАТЫХ СТЕРЖНЕВЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ
ПОЛЗУЧЕСТИ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2016 г.

Работа выполнена в Научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «Научно-исследовательский центр «Строительство».

Научный руководитель:

доктор технических наук
Крылов Сергей Борисович

Официальные оппоненты:

Травуш Владимир Ильич
доктор технических наук, профессор
Вице президент РААСН
Заместитель генерального директора по научной работе – главный конструктор
ОАО «Экспериментальный научно-проектный институт»

Римшин Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор
Член корреспондент РААСН
Заместитель генерального директора по научной работе АО «ВНИИЖелезобетон»

Ведущая организация:

АО «ЦНИИПромзданий»

Защита диссертации состоится 22 ноября 2016 года в 15-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство» по адресу: 109428, г. Москва, 2-ая Институтская ул., д.б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НИЦ «Строительство» и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Саврасов Иван Петрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время наблюдается повышенный интерес к вопросам устойчивости железобетонных конструкций и неразрывно связанной с ней ползучестью бетона, который особенно возрос после аварии покрытия аквапарка в Ясенево. В этой области в нашей стране накоплен большой объем опытных и теоретических данных (большой частью во времена СССР). К сожалению, в те годы отсутствовали возможности компьютерной обработки этих данных. Поэтому, **актуальной** является задача, опираясь на большое количество экспериментальных исследований, и используя современные программные комплексы попытаться дополнить и унифицировать результаты последних исследований вопросов устойчивости и ползучести железобетонных элементов, которые являются в данной диссертации **предметом исследований**.

Степень разработанности темы. Несмотря на большое количество накопленных знаний и опыта в вопросах ползучести и устойчивости, в целом данная проблема разработана не достаточно, и в настоящее время господствует представление об устойчивости железобетонных конструкций, близкое к устойчивости упругих систем. Это затрудняет исследование работы конструкций и не позволяет выявить некоторые существенные особенности их поведения.

Цель диссертационной работы - уточнив основные выражения линейной теории ползучести бетона, разработать расчетный аппарат, позволяющий достоверно описывать деформирование сжатых и внецентренно-сжатых стержневых железобетонных элементов и оценивать их устойчивость на всех стадиях работы конструкции.

Задачи диссертационной работы

1. Исследование точности нормативного выражения меры ползучести бетона, используя при этом экспериментальные данные длительных испытаний бетонных образцов.

2. Оценка погрешностей основных уравнений линейной теории ползучести. Разработка существенно более точного и простого способа построения ядра релаксации, через ядро ползучести и меру ползучести.

3. Применение полученных результатов для бетона к анализу деформирования железобетонных стержневых элементов.

4. Разработка методики расчета внецентренно-сжатых стержней с учетом ползучести бетона и трещинообразования с использованием полученного выражения для ядра релаксации и сравнение с экспериментальными данными длительных испытаний колонн.

Научная новизна работы.

- Сформулирована инженерная постановка задачи устойчивости для стержневых железобетонных элементов. Получено выражение для определения критической силы, учитывающее историю загрузки.

- Установлено, что выражение для меры ползучести бетона, используемое в современной нормативной литературе, дает значительные погрешности. Внесены изменения, которые существенно повышают точность меры ползучести.

- Установлено, что уравнение современной линейной теории ползучести, связывающее ядро ползучести и ядро релаксации, дает значительные погрешности. Предложено новое выражение для ядра релаксации через ядро ползучести и меру ползучести.

- Получено уравнение изгиба внецентренно-сжатого стержня из нелинейного материала с учетом ползучести и трещинообразования для нагрузки, изменяющейся во времени произвольным образом. Разработана методика решения этого уравнения, с помощью современных программных комплексов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

- Предложенные уточнения и изменения в выражении для меры ползучести, приведенном в нормативной литературе, а также в уравнении, связывающем ядро ползучести и ядро релаксации, позволит избежать серьезных погрешностей при использовании этих выражений.

- Предложенное уравнение деформирования внецентренно-сжатого стержня из нелинейного материала и выражение для критической силы позволяют определять деформации стержня в любой момент времени и с учетом различной истории нагружения.

- Предложенные объяснения явления потери устойчивости с точки зрения условия равновесия внешних и внутренних сил в сечении элемента, позволяет инженеру глубже понять работу конструкций и избежать ряда ошибок при расчетах конструкций из нелинейно работающих материалов.

Реализация результатов работы. Методика, предложенная в диссертации, применялась при расчетах монолитного балочного перекрытия, строящегося торгового центра Леруа Мерлен в г. Кемерово. Был выполнен прогноз развития деформаций плиты перекрытия увеличенного пролета во времени с учетом ползучести бетона и истории нагружения, о чем имеется справка.

Методология и методы исследования. Вопросы деформирования и устойчивости сжатых и внецентренно-сжатых элементов разрабатывались с использованием строгих методов и принципов строительной механики, при анализе уравнений ползучести и релаксации использовался метод теории ползучести, а также численные и аналитические методы математики. Точность полученных результатов оценивалась путем сравнения с известными экспериментальными данными. Использовались программы MathCad и Лира-Сапр.

На защиту выносятся:

1. Инженерная постановка задачи устойчивости для стержневых железобетонных элементов, выражение для определения критической силы, учитывающее историю нагружения
2. Анализ нормативного выражения меры ползучести бетона и изменения, вносимые в это выражение.
3. Результаты анализа уравнений теории упруго-ползучего тела (уравнения ползучести, релаксации и уравнение, связывающее ядра ползучести и релаксации между собой), и новое выражение для ядра релаксации.
4. Уравнение изгиба внецентренно-сжатого стержня из нелинейного материала, обладающего ползучестью и трещинообразованием для нагрузки, изменяющейся во времени произвольным образом.
5. Результаты численных исследований предлагаемых выражений путем сравнения их с результатами испытаний.

Степень достоверности и апробация работы. В соответствии с методологией, использовались строгие методы и принципы строительной механики, метод теории ползучести, а также численные и аналитические методы математики. Это подтверждает достоверность полученных результатов. Основные положения диссертации доложены на следующих конференциях: 1. Санкт Петербург. 2007 г. Международная конференция МКДЗК-07. 2. Москва. 2009 г. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Международная конференция «Актуальные проблемы исследований по теории расчета сооружений». 3. Новочеркасск. 2010 г. ЮРГПУ им. М.И. Платова. III Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». 4. Челябинск. 2012 г. ЮУрГУ. IV Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений».

Личный вклад автора заключается: в проведенном анализе работ отечественных и зарубежных исследований вопросов ползучести и устойчивости железобетонных стержней; в разработке предлагаемой методики расчета железобетонных элементов, основанной на использовании математических и вычислительных программных комплексов; в сравнении результатов расчета по предложенной методике с экспериментальными данными длительных испытаний железобетонных балок и колонн. Все результаты получены с непосредственным участием автора.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 9 публикациях, в том числе 5 статей в печатных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы (136 наименований), приложения и содержит 143 страницы машинописного текста, 44 рисунка, 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен обзор проведенных работ отечественными и зарубежными авторами в части исследований вопросов деформирования бетона во времени и вопросов устойчивости сжатых стержней. Исследования устойчивости сжатых стержней были начаты Энгессером Ф. и Карманом Т., которые

впоследствии развивали отечественные учёные Ясинский Ф.С., Ильюшин А.А., Завриев К.С., Галеркин Б.Г., Карнаухов Н.В., Власов В.В., Травуш В.И. и др., которые и создали современную теорию устойчивости стержневых систем. По результатам работ этих и многих других специалистов в области строительной механики можно выделить следующие постановки задачи устойчивости: Эйлера и энергетическая постановки, Эйлера постановка с использованием приведённых модулей упругости, а также постановка задачи устойчивости по Ляпунову А.М. В обзоре приведены достоинства и недостатки этих четырёх постановок. В целом обзор показывает, что в области теории устойчивости, применительно к железобетонным элементам и конструкциям, наблюдается недостаточная проработка учёта влияния ползучести на устойчивость.

Другая часть обзора посвящена вопросам деформирования бетона во времени под нагрузкой. Широкие теоретические и экспериментальные исследования по изучению этого явления проводились с начала прошлого века отечественными учёными Александровским С.В., Арутюняном Н.Х., Бондаренко В.М., Васильевым П.И., Гвоздевым А.А., Карапетяном К.С., Ржаницыным А.Р., Улицким И.И., Карпенко Н.И., Галустовым К.З., Санжаровским Р.С., Римшиным В.И., Тамразяном А.Г., Кодышем Э.Н., Трекиным Н.Н., Крыловым С.Б., и др. За рубежом большой вклад в развитие этого вопроса внесли Г. Девис, Гленвилл, Хансен и др. При этом исследовались различные факторы, влияющие на деформативность бетонных и цементно-песчаных элементов под различной нагрузкой. Было выявлено множество параметров, влияющих на этот процесс, от исходного сырья, до технологических и эксплуатационных факторов.

Многими специалистами изучался вопрос влияния на ползучесть бетона величины напряжения в бетоне. При этом нагрузка на образцы прикладывалась в значительном диапазоне. Напряжения в образцах принимались, как значительно меньше расчётных сопротивлений, так и близкие к пределу прочности. Исследование деформационных свойств бетона производилось в основном в режиме сжатия, но для сравнения проводились испытания и в режиме растяжения. При сжатии также рассматривались вопросы как одноосной схемы прило-

жения нагрузки, так и двух и трёхосных схем. Необходимо отметить, что результаты, полученные разными авторами, иногда противоречат друг другу.

Отдельное внимание в обзоре было обращено на теоретические работы, посвящённые изучению природы ползучести бетона. Для объяснения этого явления был выдвинут ряд теорий, многочисленность, а порой противоречивость которых говорит о сложности в изучении данного вопроса.

Отсутствие полноценного теоретического объяснения природы ползучести, тем не менее, компенсируется значительным объёмом экспериментальных исследований, которые позволили достоверно прогнозировать работу бетона во времени. В связи с этим появилась техническая (феноменологическая) теория, устанавливающая соотношение между напряжениями и деформациями во времени, основанная на результатах механических испытаний материала. Благодаря такому подходу появились положения в нормативных документах и рекомендациях, позволяющие производить расчёты железобетонных конструкций с учётом ползучести бетона.

Заканчивается первая глава обзором существующих теорий ползучести бетона, которые можно разделить на три основные группы. Адаптацией теории упругой наследственности (теория Больцмана-Вольтерра) применительно к бетону занимались в частности Ржаницын А.Р., Арутюнян Н.Х, Васильев П.И.. Но эти работы не получили окончательного завершения из-за ряда недостатков. В частности, не учитывается старение бетона, и предполагается отсутствие необратимых деформаций при разгрузке.

Большое число исследований и решений практических задач осуществляется с использованием теории старения, которая базируется исключительно на экспериментальных исследованиях, согласно которым кривые деформации бетона во времени, загруженные в разном возрасте, почти параллельны для идентичных образцов. Основным достоинством теории старения является её простота, где уравнения теории легко решаются. Вместе с тем теория старения обладает существенным недостатком, таким как исходная предпосылка о полной необратимости деформаций ползучести. В развитии теории старения Алексан-

дровский С.В. и Яценко Е.А. предложили приближённо учитывать частичную обратимость деформаций ползучести. Этот вариант модифицированной теории старения широко использовался для решения ряда прикладных задач.

Предложенная Масловым Г.Н. и Арутюняном Н.Х. наследственная теория старения развивалась для бетона в работах Гвоздева А.А., Александровского С.В. Эта наиболее разработанная и общая теория, хотя и не без недостатков (не учитываются необратимые деформации от внешней нагрузки не связанные со старением). Из этой теории как частные случаи, могут быть получены теория упругой наследственности и теория старения. Она учитывает как свойства старения бетона, так и свойство наследственности. Она также учитывает частичную необратимость деформаций ползучести, которая связана со старением.

Проведенный обзор показывает, что в области теории ползучести не достаточно разработаны вопросы применения ее к нелинейно работающим материалам, подверженным трещинообразованию.

Во второй главе приведены результаты исследования точности выражения для меры ползучести бетона. В качестве базового выражения принималось выражение (1) из «Рекомендаций по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций» НИИЖБ. Это выражение было выбрано, поскольку это, по сути, единственное выражение для меры ползучести, встречающееся в нормативной литературе. Оно включает в себя большое число разнообразных параметров (класс, состав, возраст бетона, подвижность бетонной смеси, модуль открытой поверхности, влажность среды и т.д.).

$$C_B(t, t_0) = C_{28_besk} \cdot \Omega(t_0) \left(1 - k \cdot e^{-\gamma_1 \cdot (t - t_0)}\right) \quad (1)$$

$C_{28_besk} = C_{28_besk}^N \cdot \xi_{2c} \cdot \xi_{3c}$ – предельное значение меры ползучести бетона (определяет поведение функции при бесконечно большом значении времени);

$\Omega(t_0) = c + d \cdot e^{-\gamma \cdot t_0}$ – функция, учитывающая влияние старения бетона на меру ползучести (t_0 – время загрузки образца); $\left(1 - k \cdot e^{-\gamma_1 \cdot (t - t_0)}\right)$ – функция, учитывающая нарастание во времени меры ползучести (t – время испытания образца).

Для оценки точности базового выражения для меры ползучести было выполне-

но ее сравнение с выражением для меры ползучести, предложенным С.В. Александровским на основании большого объема экспериментов:

$$C_{\text{Э}}(t, t_0) = \psi(t_0) - \psi(t) \cdot \left(\frac{e^{(A_1 \cdot t_0)} - A_2}{e^{(A_1 \cdot t)} - A_2} \right) + \Delta(t_0) (1 - e^{(-\alpha(t-t_0))}) \quad (2)$$

Учитывая детальность проводившихся исследований, это выражение можно считать эталонным. Однако в нем игнорируются некоторые технологические параметры, которые входят в выражение (1).

До прямого сравнения выражений по формулам (1) и (2) были выполнены различные проверки для анализа постоянных и табличных коэффициентов, входящих в базовое выражение (1). В частности, было установлено, что постоянный коэффициент $\kappa = 0.8$, входящий в последний множитель, необходимо изменить на $\kappa = 1$. Это связано с тем, что при определении деформаций ползучести бетона в момент загрузки ($t=t_0$), ползучесть отсутствует, и, соответственно, множитель $(1 - \kappa \cdot e^{-\gamma_1(t-t_0)})$ должен быть равен 0, а с коэффициентом $\kappa = 0.8$ из Рекомендаций $(1 - \kappa \cdot e^{-\gamma_1(t-t_0)}) = 0.2$, что противоречит физическому смыслу явления. На рисунке 1 показано сравнение мер ползучести по формулам (1) и (2) с учетом внесенного изменения ($\kappa = 1$).

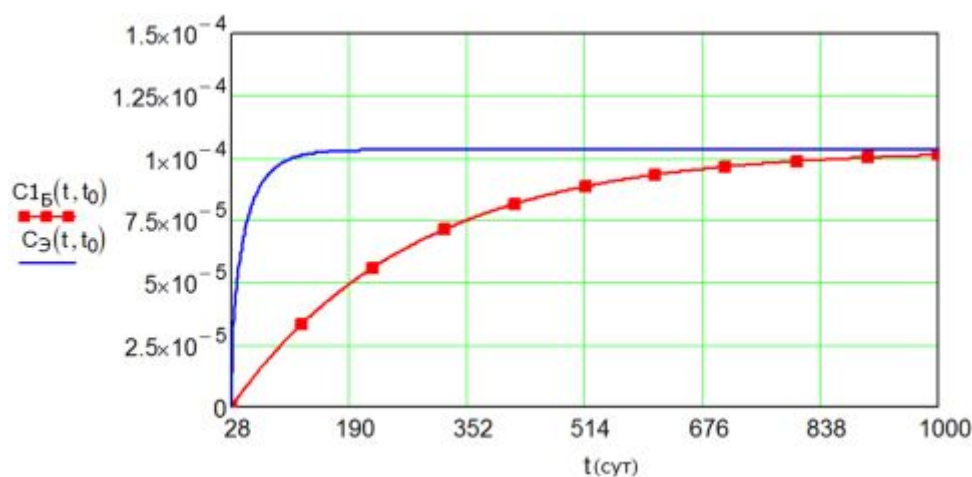


Рисунок 1 Графики меры ползучести по формулам (1) и (2) при $t_0=28$ сут.

Приведенный график показывает значительные различия в мере ползучести в первые полтора года. Для более резкого возрастания расчетных деформаций ползучести сразу после приложения нагрузки предложена замена множителя $(1 - \kappa \cdot e^{-\gamma_1(t-t_0)})$ на (3), базовое выражение меры ползучести примет вид (4):

$$F(\Delta t) = \frac{(1 - e^{-Q_1 \gamma_1 \cdot (t-t_0)}) \cdot (1 - e^{-Q_2 \gamma_1 \cdot (t-t_0)}) \cdot (1 - e^{-Q_3 \gamma_1 \cdot (t-t_0)}) \cdot (1 - e^{-Q_4 \gamma_1 \cdot (t-t_0)})}{4} \quad (3)$$

Тогда базовое выражение для меры ползучести примет вид:

$$C1_B(t, t_0) = C_{28_besk} \cdot \Omega(t_0) \cdot F(\Delta t) \quad (4)$$

Выражение (3) включает в себя коэффициенты Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 . Они определяются из условия наименьших погрешностей расчетной кривой (4) по отношению к эталонной (2). В частности, для технологических параметров образцов из опытов Александровского С.В. получены следующие значения постоянных:

$$Q_1 = 1.258 \cdot 10^3; \quad Q_2 = 17.431; \quad Q_3 = 12.936; \quad Q_4 = 6.291.$$

Подбор выполнялся из условия совпадения функций (2) и (4) в четырех временных точках t_i при $t_0=28$ сут. При этом дополнительно контролировалась степень совпадения в остальных точках. Подставляя эти коэффициенты в выражение (3), а затем в (4) мы получили практически абсолютное совпадение графиков на всех временных отрезках, что подтверждает правильность предлагаемого выражения (4). Через выражение для меры ползучести (4) получено выражение для ядра ползучести, использованное в дальнейших расчетах:

$$L(t, t_0) = -E(t, t_0) \cdot \int_{t_0}^t \left(\frac{1}{E(t, t_0)} + C1_B(t, t_0) \right) \quad (5)$$

В третьей главе рассматриваются основные уравнения линейной теории ползучести. Форма записи уравнений принималась по Александровскому С.В.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} + \int_{t_0}^t \frac{\sigma(\tau)}{E(\tau)} L(t, \tau) d\tau \quad \text{уравнение ползучести} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma(t)}{E(t)} = \varepsilon(t) - \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau) R(t, \tau) d\tau \quad \text{уравнение релаксации} \quad (7)$$

$$L(t, \tau) - R(t, \tau) = \int_{\tau}^t L(\xi, \tau) R(t, \xi) d\xi \quad \text{уравнение, связывающее ядра L и R} \quad (8)$$

Уравнение (8) обычно принимается из теории интегральных уравнений в предположении, что выражение (7) является решением уравнения (6). Проведенный анализ показал, что уравнение (8) не соответствует уравнениям (6) и

(7). Поэтому было решено исследовать и уточнить связь между ядрами $L(t, \tau)$ и $R(t, \tau)$. После подстановки правой части уравнения (7) в уравнение (6), приведения подобных членов и внесения всех слагаемых под знак интеграла, получим:

$$\int_{t_0}^t \left[\frac{\sigma(\tau)}{E(\tau)} L(t, \tau) - \varepsilon(\tau) R(t, \tau) \right] d\tau = 0 \quad (9)$$

Так как пределы интегрирования t и t_0 являются произвольными, то этот интеграл в общем случае будет равен 0 только тогда, когда подынтегральная функция равна 0.

Учитывая, что ядра $L(t, \tau)$ и $R(t, \tau)$ в соответствии с теорией не зависят от изменения нагрузки во времени, можем выбрать любую зависимость напряжений от времени при установлении связи между ядрами. Чтобы перейти к загрузке образца, используемому при построении меры ползучести, положим: $\sigma(\tau) = const = S$. Такой функции σ будет соответствовать $\varepsilon(\tau) = S \cdot \delta(\tau, \tau_0)$.

$$\delta(\tau, \tau_0) = \frac{1}{E(\tau_0)} + C(\tau, \tau_0), \quad (10)$$

где $\delta(\tau, \tau_0)$ - полная податливость материала, включающая упругую и ползучую составляющую. Здесь $C(\tau, \tau_0)$ – мера ползучести, τ_0 – время начальной загрузки образца постоянной по времени нагрузкой, τ – текущий момент времени. Подставим значения $\sigma(\tau)$, $\varepsilon(\tau)$ и $\delta(\tau, \tau_0)$ в уравнение (9):

$$\frac{S}{E(\tau)} L(t, \tau) - S \left(\frac{1}{E(\tau_0)} + C(\tau, \tau_0) \right) \cdot R(t, \tau) = 0 \quad (11)$$

Разделив обе части этого уравнения на S , найдём зависимость R от L .

$$R(t, \tau) = \frac{\frac{L(t, \tau)}{E(\tau)}}{\frac{1}{E(\tau_0)} + C(\tau, \tau_0)} \quad (12)$$

После получения выражения для ядра релаксации из первых двух уравнений теории ползучести была произведена численная проверка уравнения (8), подстановкой в него ядра релаксации (12). По результатам проверки оказалось,

что ядро релаксации не является решением этого уравнения. В зависимости от времени наблюдения (28 сут.+2.5 ч.; 29 сут.; 78 сут.; 128 сут.) были получены значительные погрешности: +122.3%; -55.8%; -74.6%; -74.7% соответственно.

Далее была проверка правильности выражения (12) посредством его подстановки в выражение (7), а затем выражения (7) в (6). Относительные погрешности по результатам проверки оказались практически равны 0.

После этого была выполнена проверка соответствия выражения (12) по методике СП 63.13.330.2012, где ползучесть учитывается в расчете снижением модуля упругости бетона. Для бетона класса В25 при длительном действии нагрузки разница с результатами СП составила 8% при использовании уравнения (6); при использовании уравнения (7) разница составила 35%; при использовании выражения (8) были получены погрешности – до 5 раз.

Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод, что использование ядра релаксации, удовлетворяющего уравнению (8), может давать большие погрешности. Поэтому связь между ядрами L и R следует принять по предлагаемой зависимости (12).

В четвертой главе рассматривается уравнение внецентренно сжатого стержня при кусочно-линейном законе деформирования ползучего материала. Зависимость между кривизной и изгибающим моментом для железобетонного стержня при постоянных во времени нагрузках разной длительности, приведенная на рисунке 2, соответствует нелинейной модели СП 63.13330.2012.

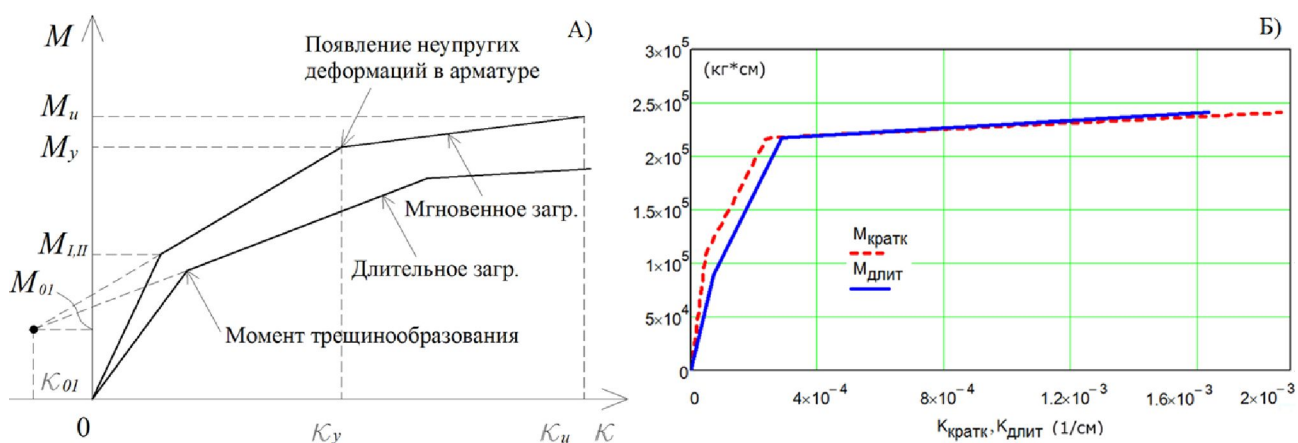


Рисунок 2 Кусочно-линейный закон деформирования железобетонного стержня. А) Теоретическая зависимость; Б) Зависимость, для конкретной колонны.

Функции состоят из трех линейных отрезков, соответствующих стадиям работы конструкций: до образования трещин, с трещинами при упругой работе арматуры, и при неупругих деформациях арматуры и бетона вплоть до разрушения. Для вывода уравнения деформирования стержня заменим неоднородный материал (железобетон) соответствующим однородным нелинейно-упругим приведенным материалом. Общий вид зависимости между напряжениями и относительными деформациями для такого приведенного материала показан на рисунке 3. Линии «1» и «2» соответствуют постоянной во времени нагрузке кратковременной и длительной соответственно.

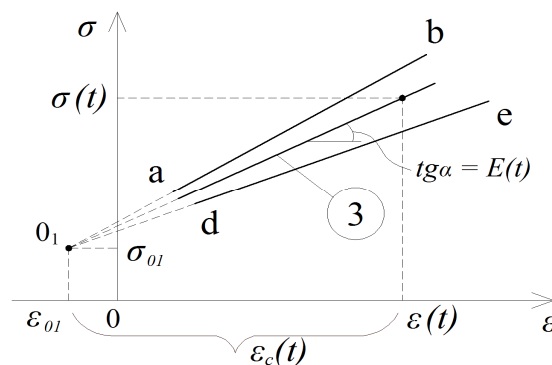
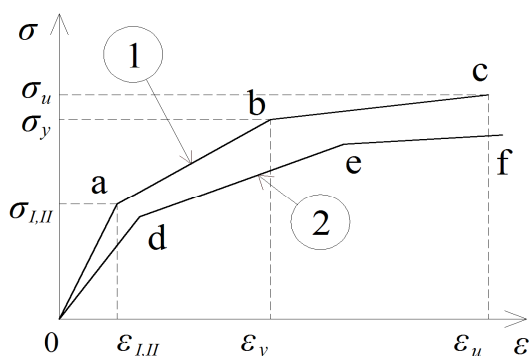


Рисунок 3 Зависимость σ - ε .

Рисунок 4 Фрагмент графика на рисунке 3.

Принимаем, что прямые, соответствующие промежуточной длительности приложения нагрузки, пересекаются в той же точке O_1 . Это допущение основано на том, что при увеличении времени действия нагрузки от 0 до ∞ , соответствующая прямая 3 (рисунок 4) должна монотонно перемещаться из положения ab в положение de . В качестве исходной физической зависимости воспользуемся уравнением для упруго-ползучего тела вида (7), и перепишем его в виде:

$$\sigma(t) = E(t)\varepsilon(t) - E(t) \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau)R(t,\tau)d\tau \quad (13)$$

Для нагрузки промежуточной длительности уравнение прямой «3» может быть записано как: $AE(t)\varepsilon_c(t) + \sigma_{01}$, где $\varepsilon(t) = \varepsilon_c(t) + \varepsilon_{01}$, здесь $\varepsilon_c(t)$ - относительная деформация, отсчитываемая от точки O_1 ; ε_{01} - отрицательная величина; A - постоянная, зависит от армирования элемента из бетона с начальным модулем $E(t)$. Тогда выражение (13) примет вид:

$$\sigma(t) = AE(t)(\varepsilon(t) - \varepsilon_{01}) + \sigma_{01} - BE(t) \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau) R(t, \tau) d\tau \quad (14)$$

В этом выражении B – постоянная, позволяющая учесть отличия в развитии релаксации напряжений в бетоне и в железобетоне. Причем величины A и B будут различными на разных интервалах зависимости на рисунке 2.

Дальнейший вывод уравнения изгиба выполняется так, как это обычно принято в строительной механике: записываются уравнения равновесия внешних и внутренних сил и моментов в сечении, затем в эти уравнения подставляется выражение для напряжения (14), осуществляется переход от деформаций к кривизне, и после преобразований уравнение принимает вид:

$$AE(t)(\kappa_{01} - \kappa(t))(J - y_0(t)S) - M_{01} + BE(t) \int_{t_0}^t \kappa(\tau)(J - y_0(\tau)S)R(t, \tau) d\tau = -M \quad (15)$$

В таком виде уравнение деформирования справедливо для произвольного сечения и для произвольного расположения продольной оси. Если выбирается ось, проходящая через центр тяжести сечения, то статический момент $S = 0$; уравнение изгиба упрощается и принимает вид:

$$AE(t)J(\kappa_{01} - \kappa(t)) - M_{01} + BE(t)J \int_{t_0}^t \kappa(\tau)R(t, \tau) d\tau = -M \quad (16)$$

В уравнениях (15), (16) произведение $AE(t)$ представляет собой касательный модуль упругости приведенного материала для данного участка диаграммы деформирования. Величина $(\kappa(t) - \kappa_{01})$ задает сдвиг координат по горизонтальной оси. Величины A и B определяются из условия удовлетворения опытным данным или результатам расчета M и κ по методике СП для кратковременной или длительной нагрузки.

На базе полученного уравнений изгиба стержня предлагается новый подход к расчету стержневых конструкций, который можно рассматривать как дальнейшее расширение и обобщение методов расчета с использованием приведенных жесткостей конструкций. Каждый стержень в стержневой системе разбивается на отдельные элементы по длине. Рассматриваемый временной ин-

тервал (t_0, t) разбивается на отдельные временные промежутки. Выполняется переход к упругому материалу, модуль упругости которого принимается постоянным в течение данного временного промежутка для данного конечного элемента. При переходе от одного временного промежутка к другому он вычисляется заново с учетом результатов расчета на предыдущем временном шаге. Для вычисления жесткости сечения запишем уравнение изгиба упругого стержня:

$$D(t)\kappa(x, t) = M(t) \quad (17)$$

Здесь $D(t)$ – приведенная жесткость сечения (при текущем модуле упругости). Рассмотрим случай до образования трещин (т.е. в упругой стадии). Приравняем левые части уравнений (16) и (17) и разделим на $\kappa(t, x)$:

$$D(t) = AE(t)J - BE(t)J \int_{t_0}^t \frac{\kappa(x, \tau)}{\kappa(x, t)} R(t, \tau) d\tau \quad (18)$$

Постоянные A и B корректируются на каждом шаге по времени для каждого конечного элемента в зависимости от результатов расчета всей конструкции на предыдущих временных шагах. Исходя из выражения (18) можно получить выражение для длительной жесткости в общем случае.

По сравнению с подходом, изложенным в СП, предложенный метод позволяет вести расчет не только на постоянную во времени длительную или кратковременную нагрузку, но и на нагрузку любой длительности, а также на нагрузку, изменяющуюся во времени произвольным образом. При использовании данного подхода совместно с вычислительными комплексами, расчет может проводиться для расчетных схем любой сложности.

В настоящее время предложено множество способов вычисления критической силы, но до сих пор нет решения, приемлемого для инженеров во всех отношениях. В большинстве случаев в таких расчетах вводится ряд допущений, сильно ограничивающих круг решаемых задач. Обычно рассматривается случай работы бетона без трещин и с сильно упрощенной мерой ползучести. С использованием уравнение изгиба (16) было получено выражение для критических нагрузок, вызывающих потерю устойчивости сжатых железобетонных элементов с учетом трещинообразования и ползучести бетона. Для этого была

предложена инженерная постановка задачи устойчивости: Конструкция является устойчивой при продольном изгибе, когда в процессе приращения поперечных деформаций под воздействием влияния поперечных усилий или возмущающих воздействий, приращение внутренних усилий происходит таким образом, что уравнивает приращение усилий от внешней нагрузки (продольной и поперечной). Если скорость роста внутренних усилий отстает от скорости роста усилий от внешних воздействий, то конструкция неустойчива.

Если в уравнении (16) заменить кривизну второй производной прогиба и дважды продифференцировать получившееся уравнение по x , а в величине изгибающего момента выделить составляющую от продольных и поперечных сил, записанных в виде $M(x, t) = M_q(x, t) + Nv(x, t)$, то получим:

$$A \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} - B \int_{t_0}^t \frac{\partial^4 v(x, \tau)}{\partial x^4} R(t, \tau) d\tau - \frac{N}{E(t)J} \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{E(t)J} \frac{\partial^2}{\partial x^2} M_q(x, t) \quad (19)$$

Умножим обе части этого уравнения на $E(t)J$ и, переходя к задаче устойчивости, положим правую часть равной нулю, общее решение ищем в виде (21):

$$AE(t)J \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} - BE(t)J \int_{t_0}^t \frac{\partial^4 v(x, \tau)}{\partial x^4} R(t, \tau) - N(t) \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (20)$$

$$v(x, t) = F_0(t) + F_1(t)x + F_2(t) \sin \frac{n\pi x}{l} + F_3(t) \cos \frac{n\pi x}{l} \quad (21)$$

Функции $l, x, \sin(n\pi x/l), \cos(n\pi x/l)$ определяют форму изгиба стержня при потере устойчивости, а функции $F_i(t)$ определяют изменения этой формы во времени. Рассмотрим решение задачи устойчивости на примере стержня с шарнирными граничными условиями, тогда

$$v(x, t) = F(t) \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (22)$$

Подставляем решение (22) в уравнение (20) и делим его на $\sin(n\pi x/l)$:

$$A \left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 F(t) - B \left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 \int_{t_0}^t F(\tau) R(t, \tau) d\tau + \frac{N(t)}{E(t)J} \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 F(t) = 0 \quad (23)$$

Обозначим Эйлерову критическую силу, как $|N_{\text{Э}}| = (E(t)J(n\pi)^2)/l^2$ и получим из уравнения (23) выражение для критической силы:

$$N = N_{\varepsilon}(t) \left[A - B \frac{1}{F(t)} t \int_{t_0}^t F(\tau) R(t, \tau) dt \right] \quad (24)$$

В формуле для Эйлеровой критической силы левая часть принята по абсолютному значению, т.к. сжимающие силы были приняты отрицательными.

Формула (24) отличается простотой и имеет ясный физический смысл. В качестве модуля упругости (в величине N_{ε}) принимается начальный модуль упругости бетона в возрасте t .

В пятой главе приведены результаты численных исследований предложенных выражений и сравнение результатов с опытными данными. В качестве экспериментальных данных, использовались результаты длительных испытаний гибких колонн, приведенные в докторской диссертации Е.А. Чистякова.

Из большого числа испытанных колонн была выбрана внецентренно-сжатая железобетонная колонна КГ-26-3, поскольку испытания этой колонны длились почти 700 суток, колонна обладала сравнительно высокой гибкостью и испытывалась с эксцентриситетом. Дополнительно были рассмотрены центрально-сжатые бетонные колонны КГ-34-5 и КГ-34-6. Все проверки были проведены, опираясь на выражения, полученные во второй, третьей и четвертой главах. Ниже приведен общий алгоритм расчета для колонны КГ-26-3:

- А) По формуле (4) определяется мера ползучести бетона C .
- Б) Через полученное выражение для меры ползучести C , определяется ядро ползучести L по формуле (5).
- В) Затем ядро ползучести подставляется в выражение для ядра релаксации (12).
- Г) В поперечном сечении колонны задаются различные значения изгибающего момента в диапазоне от 0 до разрушения. По нелинейной деформационной модели СП 63.13330.2012. вычисляются соответствующие значения нормальных напряжений в поперечном сечении в бетоне и усилия в арматуре, а также относительные деформации в крайних волокнах и соответствующие значения кривизны. По этим данным строятся зависимости момента от кривизны для кратковременной и длительной нагрузки (рис. 2Б).

Д) Вычисления постоянных A и B проводились из условия равенства значений M и κ в уравнении (16), и значений M и κ вычисленных по СП 63.13330.2012 в характерных точках графиков на рис. 2. (точки перегиба).

Е) Полученные значения A , B , κ_{01} , M_{01} , и выражения для ядра релаксации R подставляются в уравнение изгиба (16), и в соответствии с предложенным подходом определяются деформации стержня в любой момент времени.

Ж) При вычислении критической силы предполагалось (в запас устойчивости), что прогиб колонны при потере устойчивости является большим и в зоне трещинообразования распространяется на всю длину колонны. Небольшие участки без трещин около опор мало влияют на результаты. При этом вычисленные значения постоянных A , B и выражения для ядра релаксации (12) подставляются в формулу (24). Ниже приведены результаты численных проверок:

1. По предложенному алгоритму получены зависимости прогиба середины стержня от времени при постоянной нагрузке для внецентренно-сжатой колонны КГ-26-3. Выполнено сравнение с экспериментальными данными (рисунок 5). Получено хорошее совпадение результатов.

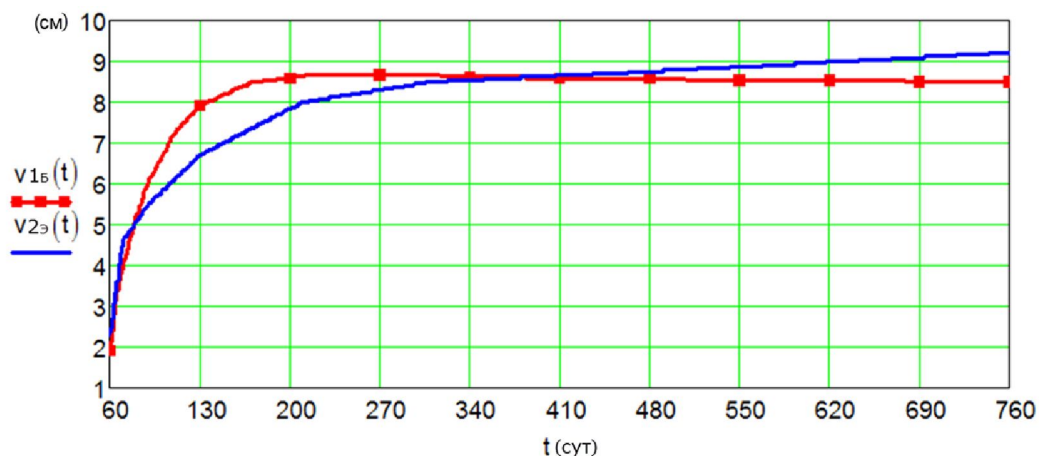


Рисунок 5 Зависимость прогиба от времени для колонны КГ-26-3 по предложенной методике $v_{1Б}(t)$ и по экспериментальным данным $v_{2Э}(t)$.

2. В качестве демонстрации возможностей предложенной методики, были рассмотрены 4 варианта загрузки колонны, отличных от эксперимента, два из которых представлены в автореферате (рисунок 6): 1-ый случай позднего загрузки в возрасте 90 суток (рисунок 6А). Из приведенных графиков видно, что при более позднем загрузении конструкция работает более жестко, и пре-

дельные прогибы ее меньше, чем при загрузке в раннем возрасте. Это соответствует положениям теории ползучести; 2-ой случай, при котором прикладывается нагрузка на 15% большая, чем при испытаниях. Эта нагрузка выдерживается первые 30 суток, а потом сбрасывается до нагрузки при эксперименте (рисунок 6Б). Удалось получить скачок деформаций при частичном сбросе нагрузки, после которого последующие деформации превышают соответствующие деформации от постоянной во времени нагрузки. Характер полученного графика вполне соответствует теоретическим представлениям, что подтверждает достоверность предложенного подхода к расчету стержневых конструкций.

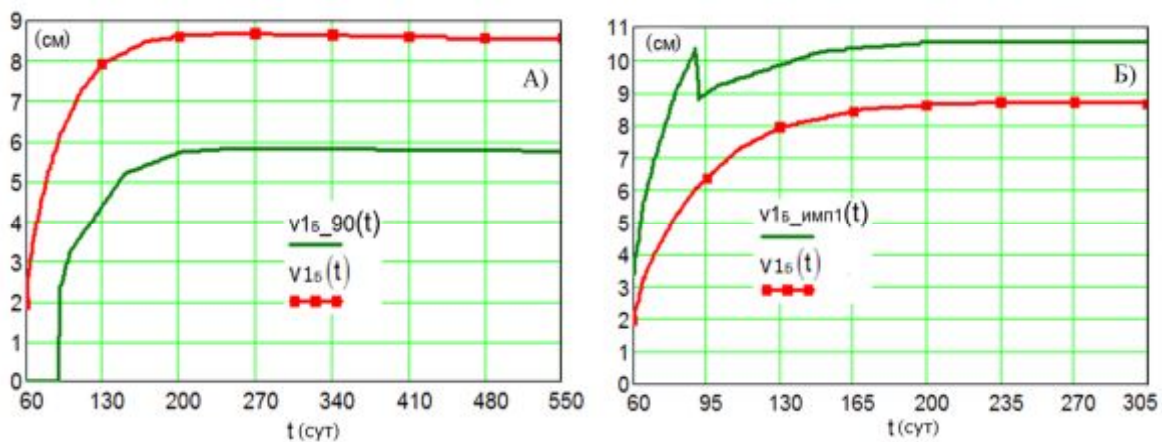


Рисунок 6 Графики зависимости прогибов от времени для колонны КГ-26-3
 А) 1-ый случай позднего загрузения; Б) импульсное приложение нагрузки.

3. Для центрально-сжатых бетонных колонн КГ-34-5 и КГ-34-6 определялись относительные деформации по формуле (4) и (6) и сравнивались с экспериментальными данными.

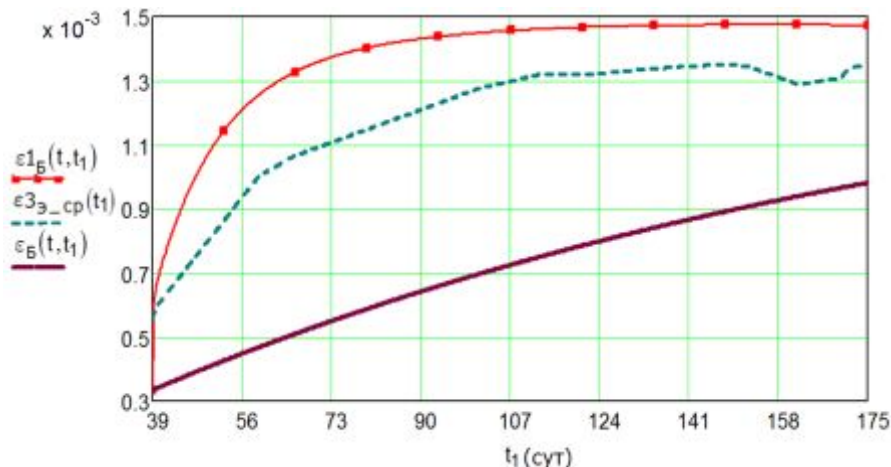


Рисунок 7 Графики относительных продольных деформаций колонны.

Из рисунка 7 видно: график, построенный по предлагаемой зависимости (4) - сплошная с маркерами, показывает лучшее совпадение с экспериментальными данными (пунктир), чем график по базовому нормативному выражению (1) - сплошная. При этом наблюдается разница между опытными и расчетными данными по предложенным выражениям. Разница идет в запас деформаций. Это связано с тем, что параметры в предложенных выражениях принимались не по опытным данным, а по нормативным, что предполагает некоторый запас.

4. В соответствии с выражением (24) определены критические силы в зависимости от истории нагружения и произведено сравнение с критическими силами, посчитанными по СП 63.13330.2012. На рисунке 8 показано сравнение графиков величин критической силы от времени до образования трещин (функции $N_{cr_1}(t)$ и $N_{cr_{СП}}$) и после (все остальные функции).

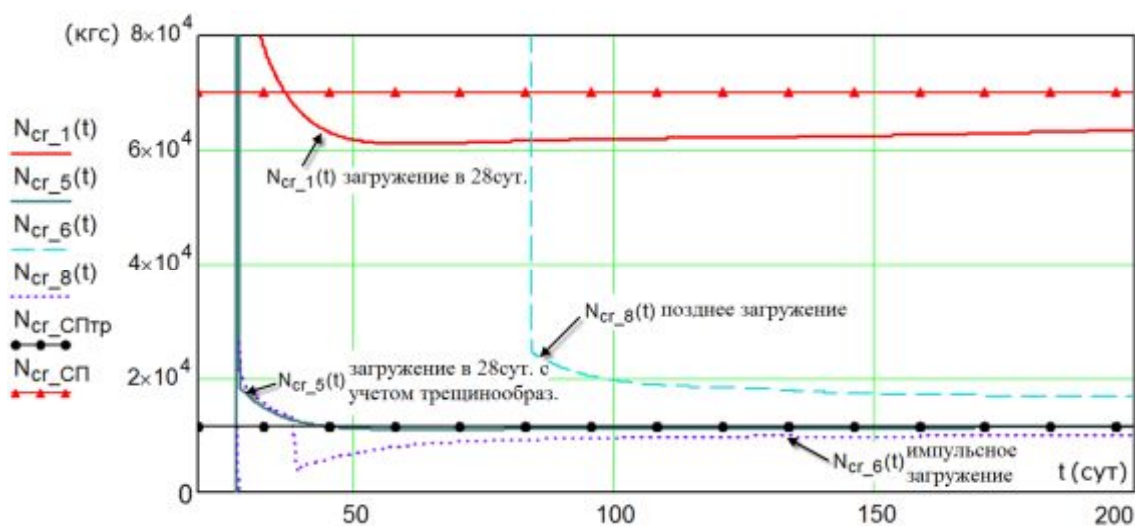


Рисунок 8 Сводный график зависимости изменения критической силы во времени при работе конструкции с трещинами и без трещин.

Разница между критической силой при работе конструкции в упругой стадии и в неупругой с учетом трещинообразования составляет около 4-5 раз, что согласуется с СП 63.13330.2012. В упругой стадии значение критической силы, посчитанное по СП ($N_{cr_{СП}}$ - отмечена маркерами), показывает несколько большие значения, чем в расчете по предлагаемой зависимости. При нелинейном расчете получено практически полное совпадение с СП ($N_{cr_{СПтр}}$ - отмечена маркерами). Полученные результаты говорят о достоверности предлагаемой методики. Также предлагаемый подход позволяет учитывать историю нагружения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ научных публикаций и нормативных документов показал, что вопросы устойчивости железобетонных стержневых элементов разработаны не достаточно. Классические подходы к решению задачи устойчивости не вполне применимы к железобетонным конструкциям. Как правило, не учитывается трещинообразование и не достаточно полно учитывается ползучесть.
2. Анализ научно-технической литературы, посвященной вопросам ползучести бетона, указывает на то, что в этой области есть целый ряд вопросов, которые разработаны в недостаточной степени. В частности, на это указывает множество вариантов выражений меры и ядра ползучести. Выявлены противоречия в современных выражениях этих параметров. Выявлены серьезные погрешности в современной форме записи уравнений линейной теории ползучести.
3. Проведены исследования точности выражения меры ползучести бетона, широко применяемого на практике, и, в частности, приведенного в нормативной литературе. Проанализированы постоянные и табличные коэффициенты, входящие в это выражение. Выявлена неточность в одном из коэффициентов. Предложено уточненное значение коэффициента $k=1$, в место $k=0.8$.
4. Выявлено серьезное несоответствие распространенного выражения меры ползучести, приведенного в нормативной литературе, опытным данным в период наиболее интенсивного развития деформаций и ползучести бетона – до 1.5-2 лет с момента загрузки. Предложен уточняющий множитель в данном выражении, с сохранением общей структуры формулы.
5. Предложен более точный способ построения ядра релаксации, через ядро ползучести и меру ползучести, удовлетворяющий основным уравнениям теории ползучести.
6. Выполнен вывод уравнения изгиба стержня под воздействием продольных и поперечных нагрузок с учетом ползучести материала и трещинообразования для нагрузки, изменяющейся во времени произвольным образом. Полученное уравнение предназначено, в первую очередь, для железобетонных конструкций,

но также может применяться для стержневых конструкций из других материалов, обладающих ползучестью.

7. Дано инженерное решение предложенного уравнения изгиба. Задача сведена к вычислению секущего модуля упругости для расчета с помощью современных программных комплексов. Алгоритм опробован, выполнено сравнение результатов расчета по предложенному алгоритму с результатами натуральных испытаний внецентренно-сжатых и центрально-сжатых колонн, проведенных в НИИЖБ Чистяковым Е.А. Получено хорошее совпадение экспериментальных результатов и результатов расчета по предложенным зависимостям.

8. Из предложенного уравнения изгиба было получено выражение для длительной жесткости железобетонных элементов для сравнения со значениями СП 63.13330.2012 при режиме загрузки соответствующем СП. Получено хорошее совпадение результатов, погрешность не превышает 10%.

9. Предложена инженерная постановка задачи устойчивости. Предложенная постановка задачи не противоречит классическим постановкам, но позволяет лучше учесть особенности работы конструкций из нелинейного ползучего материала.

10. Получено решение задачи устойчивости железобетонного стержня с учетом ползучести бетона и трещинообразования. Предложена новая формула для критической силы. Проведены численные исследования, в которых моделировалось влияние истории загрузки на величину критической силы. Полученные результаты согласуются с теоретическими представлениями о поведении конструкций. При соответствующей истории загрузки полученные результаты согласуются с результатами расчетов по СП63.13330.2012 и СП 52-103-2007.

Публикации по теме диссертации.

Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Крылов, С.Б. Новая постановка задачи устойчивости / С.Б. Крылов, П.Д. Арленинов // Бетон и железобетон. - №5. – 2007 - С.23-25.
2. Арленинов, П.Д. Опыт совместного использования уравнений теории ползу-

чести и современных программных расчетных комплексов / П.Д. Арленинов, С.Б. Крылов // Бетон и железобетон. - №3. – 2013 - С.9-10.

3. Крылов С.Б. Уравнение изгиба стержня при кусочно-линейном законе деформирования ползучего материала / С.Б. Крылов, П.Д. Арленинов // Строительная механика и расчет сооружений. - №3. – 2013 - С.6-9.

4. Крылов С.Б. Инженерный подход к решению задачи об изгибе упруго ползучего стержня / С.Б. Крылов, П.Д. Арленинов // Строительная механика и расчет сооружений. - №2. – 2013 - С.9-11.

5. Крылов С.Б. Метод линеаризации в задачах ползучести бетона и железобетона / С.Б. Крылов, П.Д. Арленинов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. - т.6 №1-2. – 2010 - С.144-15.

Публикации в других изданиях:

1. Арленинов, П.Д. Численное исследование влияния ползучести на критическую силу в сжато-изогнутых элементах. / П.Д. Арленинов // Челябинск. ЮУрГУ: IV Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». Сборник тезисов APSCE – 2012. - С.135-136.

2. Крылов С.Б. Совершенствование существующих математических выражений для характеристик ползучести / С.Б. Крылов, П.Д. Арленинов // Санкт Петербург: Международная конференция «Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве». Сборник трудов МКДЗК-07 – 2007.

3. Крылов С.Б. Проверка совместимости уравнений линейной теории ползучести и предложение ряда более точных зависимостей / С.Б. Крылов, П.Д. Арленинов // Москва. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко: Международная конференция «Актуальные проблемы исследований по теории расчета сооружений». Сборник научных статей в двух частях. Часть 2 – 2009. - С.245-252.

4. Крылов С.Б. Критическая сила для железобетонных стержневых элементов / С.Б. Крылов, П.Д. Арленинов // Academia. Архитектура и строительство - №2. – 2012. - С.136-138.