

На правах рукописи



Кузнецов Владимир Вячеславович

**НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
НЕОДНОРОДНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЦИЛИНДРОВ
С УЧЁТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ**

2.1.9. Строительная механика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Ростов–на–Дону — 2026

Работа выполнена на кафедре «Строительная механика и теория сооружений» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Научный руководитель: **Литвинов Степан Викторович** — доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», профессор кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты», профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений»

Официальные оппоненты: **Пшеничкина Валерия Александровна** — доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», профессор кафедры «Строительные конструкции, основания и надёжность сооружений»

Хашхожев Казбек Нарзанович — кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции и механика»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

Защита диссертации состоится 30 октября 2026 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.295.01 при ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» по адресу: 367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, аудит. 202 (диссертационный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» <http://www.dstu.ru>. Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования РФ <https://vak.gisnauka.ru>.

Дата рассылки автореферата «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Ханзада Рауповна
ЗАЙНУЛАБИДОВА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Железобетонные конструкции представляют собой один из самых распространённых классов строительных элементов. В настоящее время и перспективу 80% всей номенклатуры строительных конструкций выполняются из железобетона, это колонны, балочные перекрытия, плиты перекрытия и покрытия и другое. С учётом особенностей эксплуатации отдельно можно выделить железобетонные конструкции цилиндрической формы, в качестве которых используются как слабо нагруженные трубы для колодцев, так и предназначенные для эксплуатации в экстремальных условиях водопроводные трубы под транспортными коммуникациями или конструкции — оболочки сухой защиты АЭС — подобные изделия могут работать при различных температурных режимах и больших значениях давления.

Задачи оптимизации строительных конструкций в настоящее время рассматриваются всё больше и больше в связи с развитием как аппаратного обеспечения современных компьютеров, так и существенных расширением возможностей программных комплексов. Подобные задачи могут решаться на использовании различных критериев: стоимости, оптимального сечения строительной конструкции, наиболее полного использования физико-механических характеристик бетона и арматуры и т. д. Последний критерий особенно важен для конструкций, которые под нагрузкой работают в объёмном напряжённом состоянии. В таких конструкциях напряжения по сечению распределяются неравномерно, предельное состояние может достигаться по одной оси, а по двум другим значительно меньше, что приводит к неполному использованию прочности материала и, как следствие, к его перерасходу. Поэтому одним из важных направлений в строительной механике признаётся разработка численных методов расчёта, позволяющих наиболее полно использовать физико-механические свойства материала. Внедрение таких методов способно обеспечить существенный экономический эффект, выражающийся либо в сокращении расхода материала при неизменных нагрузках, либо в повышении несущей способности конструкции при сохранении прежнего объёма материала.

Все расчёты основаны на определении напряжённо-деформированного состояния, возникающего в конструкции, а также различных критериях оценки прочности самой конструкции и оценки возможного развития несовершенств таких, как трещинообразование. Обеспечивается это полным анализом напряжённо-деформированного состояния, возникающего в конструкции под действием различных внешних факторов (давление, температурный градиент и т. д.). При этом для полноценного всестороннего анализа требуется учитывать нелинейную работу бетона, характерную даже для изделий из него при малых значениях нагрузжений. Данная нелинейность связана с развитием микротрещин в бетоне, а также другими факторами (геометрическая, конструктивная и монтажная нелинейности, ползучесть, усадка и релаксация в данной работе не рассматриваются).

Учёт реальной нелинейности работы материала при различных условиях нагружения способен существенно изменить картину распределения напряже-

ний и развития деформаций в исследуемых железобетонных конструкциях в виде труб не только количественно, но, что особенно важно, и качественно. Таким образом, становится особенно **актуальным** вопрос моделирования напряжённо-деформированного состояния железобетонных труб в целом, учитывая работу каждого компонента железобетона, их взаимное влияние друг на друга, что приводит к образованию ослабленных зон, связанных с наличием растягивающих напряжений в бетоне, так и достижением предела прочности материала при сложном напряжённом состоянии.

Степень разработанности проблемы. Значительный вклад в теорию упругости неоднородных тел был внесён отечественными учёными, такими как В. И. Андреев, Б. И. Биргер, А. Т. Василенко, И. И. Гольденблат, А. М. Григоренко, А. Д. Коваленко, Г. Б. Колчин, Ю. М. Коляно, С. Г. Лехницкий, В. А. Ломакина, С. Г. Михлин, Н. Д. Панкратова, В. П. Плевако, Я. С. Подстригач, Н. А. Ростовцев и другие.

Широкий спектр задач механики неоднородных тел был также решён польскими исследователями: В. Олышаком, Я. Рыхлевским, В. Урбановским, К. Голецким. Среди западных учёных данной проблемой занимались Б. Гейтвуд, Д. Л. Клементс, Х. Конвей и другие.

Многочисленные решения задач механики неоднородных тел представлены в работах академика В. И. Андреева и его учеников. В этих исследованиях рассматриваются, в частности, толстостенные цилиндры и сферы, подверженные различным видам воздействий. Неоднородность в таких задачах может быть обусловлена изменением модуля упругости материала из-за температурного градиента. Кроме того, в работах приводятся решения для железобетонных конструкций с неравномерным армированием.

Решение задач механики неоднородных тел, основано, как правило, на использовании строго численных методов применительно к решению краевых задач для дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, поскольку учёт неоднородности, физической нелинейности делают аналитическое решение возможным лишь в крайне ограниченном классе задач, приоритетными являются численные подходы. Развитие численных методов в теории упругости и строительной механике было обеспечено трудами Дж. Аргириса, Н. П. Абовского, Л. Сегерлинда, И. Чанга, И. С. Березина, С. К. Годунова, М. В. Келдыша, А. А. Самарского, Г. И. Марчука, Дж. Ортеги, С. Г. Михлина, Р. С. Варги, Р. Куранта, О. Зенкевича и др.

Значительный вклад в развитие теории расчета железобетонных конструкций внес Н. И. Карпенко, который разработал общую теорию деформирования железобетона с трещинами. Созданная им модель стала главным методологическим каркасом для верификации численных методов расчета железобетонных конструкций и сооружений с учетом сложного комплекса факторов физической нелинейности, анизотропии и трещинообразования.

Основой физических условий расчёта являются диаграммы деформирования бетона и арматуры — представляющих собой нелинейную связь между напряжениями и деформациями (σ — ϵ), которые в теории железобетона составляют основу диаграммных методов расчёта.

На базе единой фундаментальной модели механики железобетона существенный вклад в развитие специализированных, прикладных теорий расчёта железобетонных конструкций с учётом особенностей эксплуатационных условий внесли: А. А. Дыховичный, Ю. П. Гуца, М. И. Додонов, В. Н. Байков, С. Х. Байрамуков, В. А. Ерышев, В. И. Колчунов, В. С. Фёдоров, А. Л. Кришан, О. Г. Кумпьяк, Д. Н. Лазовский, Ф. Леонгард, Р. Л. Маилян, Л. Р. Маилян и др., а также зарубежные исследователи: L. Saenz, B. Sinha, K. Gerstle.

Анализ литературных источников показал, что существующие исследования по оценке прочности и жёсткости железобетонных конструкций с учётом сложного комплекса факторов физической нелинейности, анизотропии и трещинообразования относятся к плоскостным и массивным конструкциям и не затрагивали научную задачу напряжённо-деформированного состояния железобетонных конструкций цилиндрической формы — оболочек, решение которой является актуальным.

Объект исследования: железобетонные конструкции цилиндрической формы.

Предмет исследования: напряжённо-деформированное состояние цилиндрических железобетонных оболочек при силовом и температурном воздействиях.

Цель работы: разработать расчётные модули для современных программных комплексов по оценке напряжённо-деформированного состояния железобетонных конструкций цилиндрической формы — оболочек при статических нагрузках и тепловых воздействиях.

Задачи работы:

1. Выполнить анализ опубликованных научных работ по рассматриваемой теме — методах расчёта железобетонных элементов, в том числе цилиндрической формы, работающих при объёмном напряжённо-деформированном состоянии, изучить существующие теоретические и экспериментальные исследования в области физической нелинейности бетона, а также определения их напряжённо-деформированного состояния.

2. На основе экспериментальных данных выявить особенности деформирования бетона при объёмном напряжённом состоянии.

3. Разработать алгоритм определения напряжённо-деформированного состояния элемента железобетонной оболочки при силовом и температурном воздействии, а также изменения физико-механических свойств железобетона как функции напряжённого состояния и температуры.

4. Провести моделирование работы элемента железобетонной оболочки с учётом предварительного напряжения арматурных стержней или внешней стальной обоймы.

5. Разработать расчётные модули для современных программных комплексов по оценке напряжённо-деформированного состояния железобетонных конструкций цилиндрической формы — оболочек при статических нагрузках и тепловых воздействиях.

Научная новизна работы:

1. Проведённый анализ показал, что существующие методики расчёта железобетонных конструкций, работающих при объёмном напряжённом состоянии, не имеют единого алгоритма учёта изменения модуля деформации бетона при этом состоянии, что приводит к значительному расхождению теоретических моделей с экспериментальными результатами.

2. Предложена методика учёта изменения модуля деформации бетона при объёмном напряжённом состоянии, реализация которой в конечно-элементной модели показала появление ослабленных зон в бетоне, места появления которых не всегда очевидны.

3. Реализовано конечно-элементное моделирование задачи в среде Anaconda на языке Python определения напряжённо-деформированного состояния железобетонной оболочки при непосредственном учёте арматуры, в отличие от «традиционного размазывания» последней по сечению, а также валидация с известными решениями других авторов.

4. Выявлено существенное развитие зон концентрации напряжений и появление ослабленных зон при совместной работе бетона и преднапрягаемой стальной оболочки. При этом установлено существенное различие в работе конструкции цилиндрической формы при действии температурного градиента и без него.

Теоретическая значимость работы:

— Построен алгоритм расчёта элемента железобетонной конструкции цилиндрической формы — оболочки с учётом совместной работы бетона и арматуры, с учётом изменения физико-механических свойств бетона как функции температуры.

— Предложен учёт изменения модуля деформации бетона при объёмном напряжённо-деформированном состоянии.

— Выполнено определение для расчётных моделей напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций цилиндрической формы и математических выражений их описывающих.

Практическая значимость работы:

— Разработаны расчётные модули для современных программных комплексов по оценке напряжённо-деформированного состояния железобетонных конструкций цилиндрической формы — оболочек при статических нагрузках и тепловых воздействиях.

— Реализованы на основе свободных программных пакетов Python расчётные модули определения напряжённо-деформированного состояния элементов железобетонных конструкций цилиндрической формы при объёмном напряжённо-деформированном состоянии и учёте изменения физико-механических параметров связующего, что соответствует программе правительства по импортозамещению.

— Реализованы на языках программирования MatLab и Python расчётные модули определения напряжённо-деформированного состояния железобетонных конструкций цилиндрической формы, в том числе фундаментов, в составе ряда программ (приведены в приложении к диссертации).

Методология и методы исследования. Для получения решения поставленных задач в диссертационной работе использован численный метод — метод конечных элементов (далее — МКЭ). Реализация метода осуществлена созданием расчётных модулей, в том числе при помощи свободного программного обеспечения (язык Matlab в среде Octave и Python 3.12 в среде Anaconda), конечно-элементная сетка генерировалась при помощи pygmsh (модуля gmsh в составе Python), что соответствует Указу Президента Российской Федерации В. В. Путина от 30.03.2022 г. № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты сопоставления теоретических кривых деформирования бетона, построенных на основе нормативных документов и теории Г. А. Гениева, с некоторыми экспериментальными данными.

2. Алгоритм корректировки модуля деформации бетона для объёмного напряжённого состояния.

3. Алгоритмы расчёта элемента железобетонной оболочки с учётом совместной работы бетона и арматуры, с учётом изменения физико-механических свойств связующего как функции от напряжённого состояния и температурного поля.

4. Алгоритм расчёта элемента железобетонной оболочки с учётом предварительного напряжения арматурных стержней или внешней стальной обоймы.

Достоверность результатов обеспечивается: строгой математической постановкой задачи, проверкой выполнения граничных условий, дифференциальных и интегральных соотношений; сравнением результатов с экспериментальными данными других авторов.

Апробация работы. Результаты исследования докладывались на: II Международной научной конференции «Новейшие достижения в архитектуре и строительстве 2024» (The II International Scientific Conference «Recent Advances in Architecture and Construction 2024»), г. Казань, 2024; Международной научной конференции «Промышленное и гражданское строительство» (International Scientific Conference Industrial and Civil Construction), г. Белгород, 2024; Международной научно-технической конференции «Строительство и Архитектура: Теория и практика инновационного развития» (SATPID–2024), г. Нальчик, 2024.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах, из них в ведущих рецензируемых изданиях, определенных ВАК РФ — 4, в изданиях, входящих в международные реферативные базы Scopus/Web of Science — 2.

Внедрение результатов работы. Имеется 2 свидетельства о регистрации программ ЭВМ и 1 технический акт внедрения результатов работы в ГК АКС-строй.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложений. Изложена на 152 страницах машинописного текста и содержит 65 рисунков и 6 таблиц.

Соответствие работы паспорту научной специальности. В соответствии с паспортом специальности ВАК 2.1.9. Строительная механика работа включает следующие области исследований:

— п. 2: «Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета»;

— п. 4: «Численные и численно-аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы и выбор направления исследования. Сформулированы цели и задачи, основные положения.

В главе 1 приводится обзор публикаций, посвященных решению задач механики неоднородных тел и физической нелинейности бетона; использованные в диссертации гипотезы; основные уравнения теории упругости, пластичности и ползучести. В диссертации исследуются толстостенные цилиндры, отвечающие условию $(R_a - R_b)/R_b \geq 1/10 \div 1/20$ (см. рис. 1).

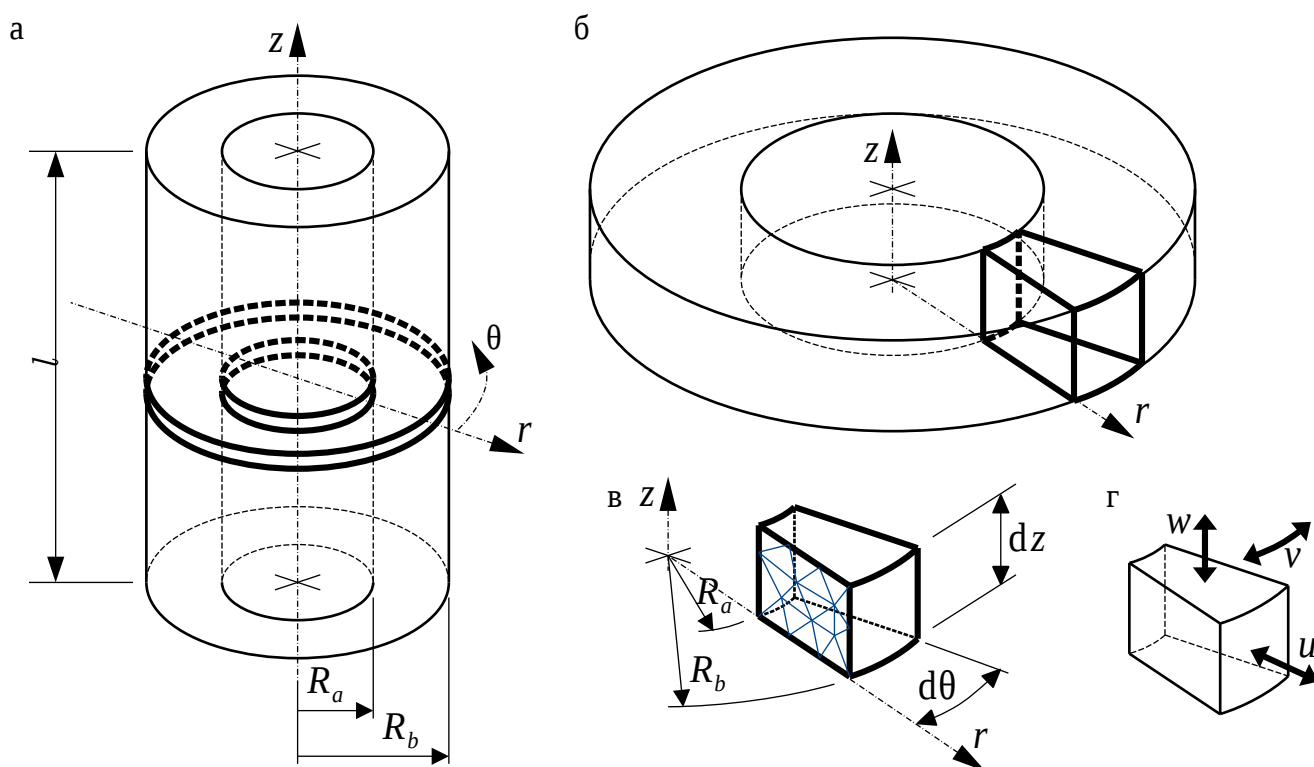


Рис. 1. Схематизация рассматриваемых в диссертации задач

Все рассматриваемые в диссертации задачи решены при помощи метода конечных элементов (далее — МКЭ). Использован традиционный треугольный конечный элемент (далее — КЭ), приведённый на рис. 2.

Вывод разрешающих уравнений для треугольного КЭ производится минимизация полной энергии системы $\mathcal{E}$, равной разности между энергией упругой деформации тела Π и работой внешних сил W_A , по перемещениям $\mathbf{U}$ системы

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \mathbf{U}} = \frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{U}} - \frac{\partial W_A}{\partial \mathbf{U}} = 0.$$

В диссертации рассматривается подробный вывод уравнений, окончательно матрица жёсткости и вектор нагрузок для рассматриваемого КЭ записываются

$$k^{(e)} = \bar{\mathbf{B}}^T \cdot \bar{\mathbf{D}} \cdot \bar{\mathbf{B}}; \quad f^{(e)} = \left(\bar{\mathbf{B}}^T \cdot \bar{\mathbf{D}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{вын}} - \bar{\mathbf{B}}^T \cdot \boldsymbol{\sigma}_{ps} \right) 2\pi \cdot A \cdot \bar{r} - \frac{\partial W_A}{\partial \mathbf{U}},$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{вын}} = \boldsymbol{\varepsilon}_T + \boldsymbol{\varepsilon}_{pl} + \boldsymbol{\varepsilon}_{cr} + \boldsymbol{\varepsilon}_{shr} + \dots$ — вынужденная деформация; $\boldsymbol{\varepsilon}_{el}$ — упругая компонента; $\boldsymbol{\varepsilon}_T$ — температурная деформация; $\boldsymbol{\varepsilon}_{pl}$ — пластическая деформация; $\boldsymbol{\varepsilon}_{cr}$ — деформация ползучести; $\boldsymbol{\varepsilon}_{shr}$ — деформация, связанная с усадкой материала; $\boldsymbol{\sigma}_{ps}$ — вектор преднапряжения в КЭ; матрицы $\bar{\mathbf{B}}$ и $\bar{\mathbf{D}}$ типичны для треугольного КЭ и подробно рассмотрены в диссертации.

В диссертации рассматривается только температурная компонента $\boldsymbol{\varepsilon}_T = \{1 \ 1 \ 1 \ 0\}^T \cdot \alpha \cdot \Delta T$, где α — коэффициент линейной температурной деформации материала; ΔT — величина изменения температуры.

Модуль упругости материала в моделях определяется при помощи коэффициентов

$$E = E_0 \cdot \prod_{i=1}^N k_i,$$

где E_0 — начальный модуль упругости (при $\varepsilon \rightarrow 0$); k_i — коэффициент, учитывающие влияние на модуль упругости внешних факторов: температуры, изменения напряжённо-деформированного состояния и т. д.; N — общее количество факторов, вызывающих изменение значения изначального модуля упругости материала.

В главе 2 исследуется построение теоретических кривых деформирования бетона (диаграммы $\sigma - \varepsilon$) и проводится их сопоставление с некоторыми экспериментальными результатами. В диссертации приводится подробный алгоритм построения теоретических кривых деформирования бетона в случае одноосного сжатия на основе уравнений Еврокода, свода правил и теории Г. А. Гениева.

Источником экспериментальных данных стали работы А. М. Мкртчяна, М. Д. Медянкина и Б. Таинг. Для всех опытных кривых строились согласно исходным данным 8 теоретических:

1. Согласно своду правил.
2. Согласно формуле Сарджина: на основе данных Еврокода; на основе свода правил по первой группе предельных состояний; на основе свода правил по второй группе предельных состояний.
3. По теории Г. А. Гениева: без учёта дилатации по первой группе предельных состояний; без учёта дилатации по второй группе предельных состояний; с учётом дилатации по первой группе предельных состояний; с учётом дилатации по второй группе предельных состояний.

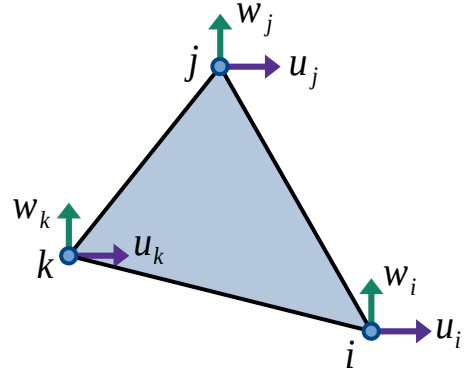


Рис. 2. Треугольный конечный элемент

Для связи параметров бетона по СП и Еврокод, использован подход из работы А. М. Мкртчяна и В. Н. Аксенова. Связь между призмочной прочностью бетона R_b и кубиковой R принята

$$R_b = (0.77 - 0.00125R)R,$$

где $R = B$.

Для бетонов с кубиковой прочностью $R < 60$ МПа

$$R_b = (0.77 - 0.00125R)R \rightarrow f_{cm} = (0.77 - 0.00125B)B.$$

Если $R \geq 60$ МПа, то необходимо использовать следующую зависимость

$$R_b = \{0.77[1.123 + 0.00115(R - 60)] - 0.00125R\}R \rightarrow$$

$$\rightarrow f_{cm} = \{0.77[1.123 + 0.00115(B - 60)] - 0.00125B\}B.$$

В диссертации представлены таблицы с численными значениями отклонения максимального значения напряжения экспериментальных данных и соответствующего ему значения относительной продольной деформации от такого

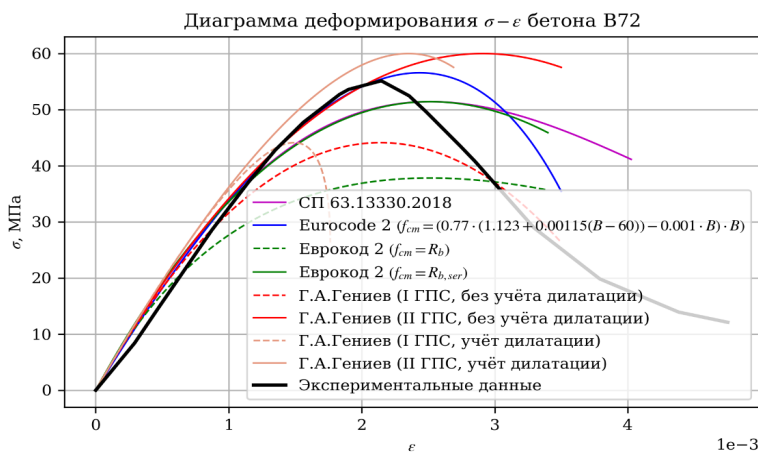


Рис. 3. Пример сопоставление теоретических кривых и экспериментальных данных для образцов из работы А. М. Мкртчяна

или лучше всего согласуется с экспериментальными данными, или имеет минимальные отклонения по значениям максимального напряжения.

Однако, значения относительной продольной деформации в точках с наибольшим напряжением чаще дают лучшее согласование теоретических кривых на основе свода правил и теории Г. А. Гениева. Объяснить это можно тем, что данные на основе свода правил имеют несколько меньшие цифры по допускаемым значениям максимального напряжения в пользу дополнительного запаса прочности готового изделия.

Предлагается методика учёта изменения модуля упругости бетона в зависимости от объёмного напряжённого состояния, поскольку в современных нормативных документах таких, как свод правил (СП) и Еврокод, основное внимание уделяется работе бетона в сжатом состоянии при одноосном напряжённом состоянии. В теории Г. А. Гениева основное внимание уделяется интенсивности касательных напряжений, связанной со вторым инвариантом девиатора напряжений, формально определяемому как радикал касательных напряжений на октаэдрических площадках $\tau_i = \sqrt{(I_2^D)} = \sqrt{3/2} \tau_{\text{окт}}$.

значения теоретических кривых. Пример полученных теоретических кривых и экспериментальных данных показан на рис. 3. Анализ результатов показал, что по характеру распределения экспериментальным данным хорошо соответствует кривая по, построенная на основе формулы Сарджина и исходных данным из Еврокода. Это же подтверждает и сопоставление численных данных из соответствующих таблиц. Кривая по Еврокоду

Было принято решение сопоставлять с нормальными напряжениями σ на кривой деформирования значения интенсивности напряжений σ_i , а с продольной деформацией ε — значение интенсивности деформаций ε_i . В курсе теории упругости, пластичности и ползучести приводятся соотношения для интенсивности напряжений и деформаций через главные напряжения и деформации

$$\sigma_i = \sqrt{3} \tau_i = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{\text{окт}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2};$$

$$\varepsilon_i = \frac{3}{2\sqrt{2}(1+\nu)} \gamma_{\text{окт}} = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}.$$

Откуда модуль деформации материала определяется $E = \sigma_i / \varepsilon_i$.

Решение задачи определялось методом последовательных приближений. Пусть E_i — модуль деформации (упругости) принятый на каждом шаге i . Далее, под модулем упругости материала E_0 понимается модуль упругости материала на первом шаге $i=1$ при $\varepsilon \rightarrow 0$ и определяется из нормативных документов (в дальнейшем кривые деформирования материала будут строиться на основе норм Еврокод), а на последующих этапах для обозначения E_i применяется термин модуль деформации, соответствующий текущему модулю упругости на кривой деформации материала. Тогда общий алгоритм представлен в виде блок-схемы на рисунке 4, а подробное описание шагов приводится в диссертации.

В заключении по главе сказано, что проведённые исследования показывают, преимущества каждого из подходов в отдельном случае. Если моделируется работа конструкции в сжатом состоянии в научном исследовании, то лучше использовать данные только на основе Еврокода. Если моделируется работа реальной конструкции, то данные на основе свода правил, поскольку они закладывают некоторый дополнительный запас прочности. Если моделируется работа массивной конструкции при объёмном напряженно-деформированном состоянии, то предпочтительней теория Г. А. Гениева, поскольку она сразу включает в себя объёмные компоненты напряжений и относительной деформации.

В главе 3 проводится исследование напряжённо-деформированного состояния в железобетонном цилиндре с учётом температурного поля. Непосредственный расчёт проводится при помощи МКЭ. Использован простой треугольный КЭ без дополнительных узлов. Связано это с тем, что первоначально стоит задача продемонстрировать общее напряжённо-деформированное состояние в конструкции, возникающее с учётом множества факторов, таких как физическая нелинейность материала как от возникающего напряжения (деформации материала), так и от действия температуры. Точности выбранного КЭ вполне для этих целей хватает, а для описания возникающего в теле градиента физико-механических параметров более предпочтительным оказывается применение большего количества подобных КЭ.

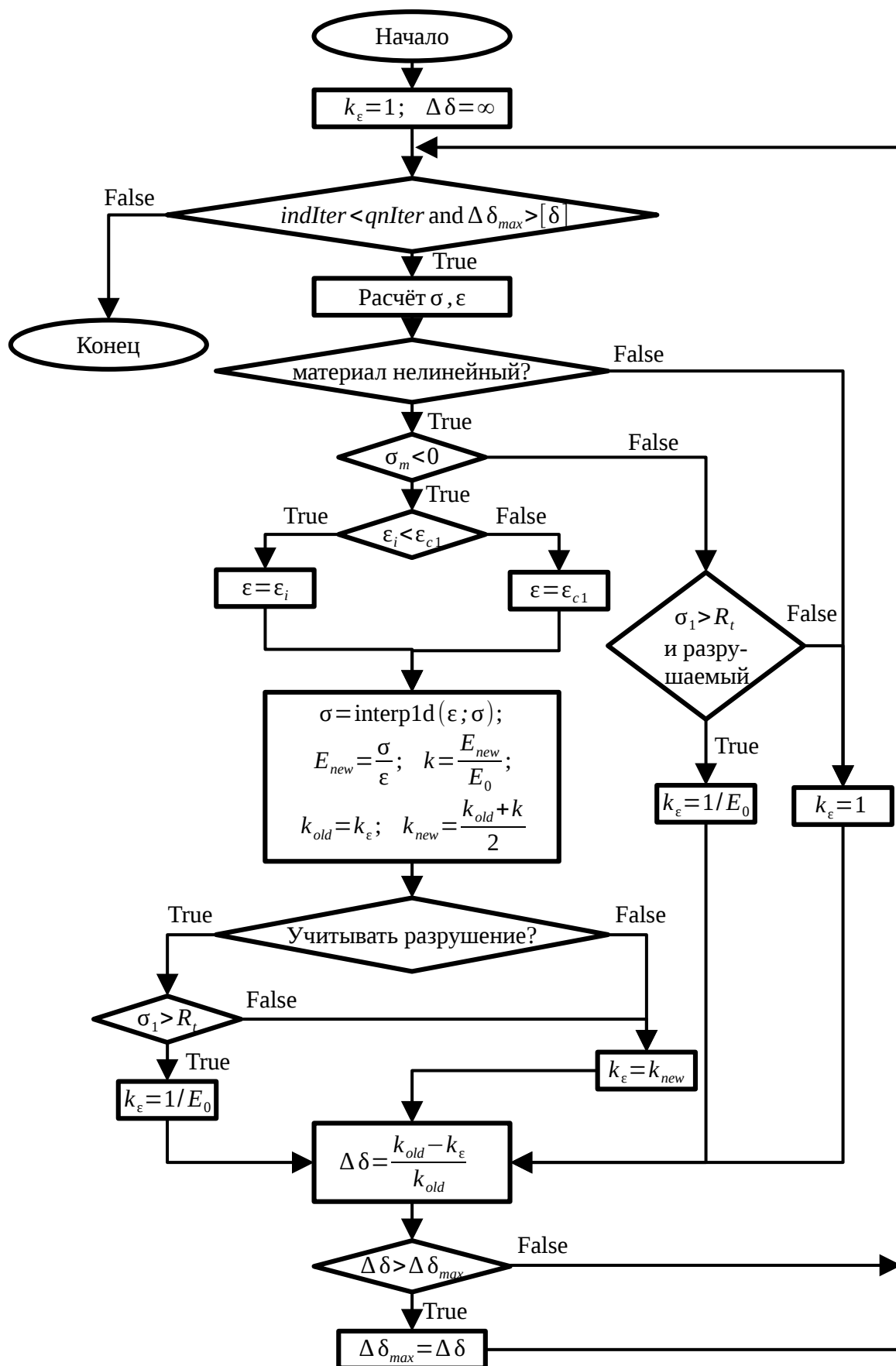


Рис. 4. Блок-схема

Изначально результаты полученного решения основаны на задачах, исследуемых в работах проф. Б. М. Языева, доц. И. А. Потехина, доц. А. В. Смолова, доц. С. В. Литвинова и др. с целью оценки достоверности полученных результатов путём сопоставления решений, полученных разными авторами и в разными методами.

Влияние температурного воздействия на изменение модуля упругости бетона производится с учётом СП 27.13330.2011 «Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур».

Корректировка значения модуля упругости бетона производится по формуле 5.9 СП 27.13330.2011:

$$E_{bt} = E_b \cdot \beta_b,$$

где значения β_b принимаются согласно таблице 5.3 СП 27.13330.2011 при температуре бетона в диапазоне 50–300 °С для кратковременного и длительного нагрева, номеров составов бетона 1, 1а, 2 (вяжущее — портландцемент, быстротвердеющий потрландцемент, шлакопортландцемент) согласно таблице 5.1 СП 27.13330.2011.

В диссертации аппроксимация по приведённым значениям β_b может быть производится при помощи экспоненциальной зависимости

$$\beta_b(T) = a \cdot \exp(b \cdot T),$$

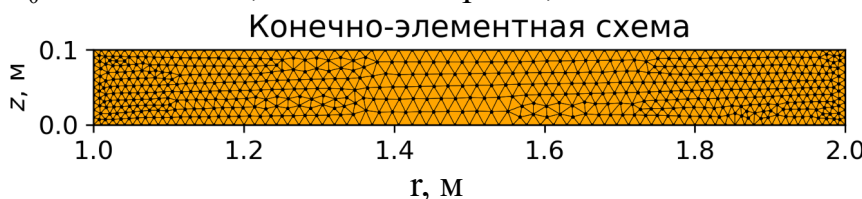
где $a = 1.16868795879125$, $b = -0.00352087362046568$.

В диссертации приводятся результаты сопоставления экспоненциальной зависимости с квадратичным и кубическим полиномами.

Что касается арматуры, то согласно схеме 5.2 СП 27.13330.2011 кривая диаграмма растянутой арматуры в пределах 20–300 °С не меняется, поэтому в дальнейших расчётах изменение физико-механических параметров арматуры не учитывалось.

Рассматривается ряд задач при различных силовых и температурных режимах нагружения.

Задача №1. Для оценки достоверности полученных результатов проводится решение задачи, полученное А. В. Смоловым. Расчётная схема задачи представлена на рис. 1, конечно-элементная сетка задачи №1 — на рис. 5. Решена задача определения напряжённо-деформированного состояния бетонного цилиндра при следующих исходных данных: $a = 1.0$ м; $b = 2.0$ м; $T_0 = 300^\circ\text{C}$; $E_0 = 20 \cdot 10^3$ МПа; $\alpha = 0.1 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$; $\nu = 0.2$.



Для моделирования плоского деформированного состояния рассматривается диск высотой 0.1 м. Анализ показыва-

Рис. 5. Конечно-элементная сетка задачи №1

ет, что влияние неоднородности материала из текущей задачи по сравнению с однородной постановкой приводит к существенному снижению напряжений. Учёт изменения физико-механических параметров от бетона приводит к существенному снижению

напряжений. Связано это с тем, что наибольшие напряжения возникали в местах, где за счёт перепада температуры возникали наибольшие температурные деформации (на внутренней поверхности). Здесь же происходило наибольшее снижение значения модуля деформации, что приводит к меньшим значениям напряжений при сохранении уровня деформации. Распределение понижающего коэффициента приведено на рис. 6.

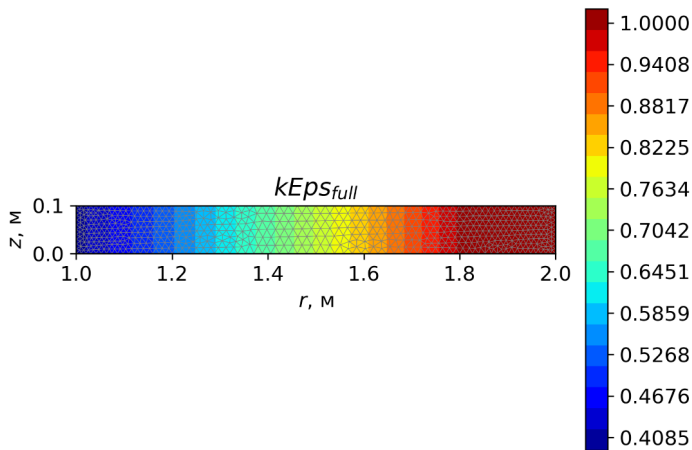


Рис. 6. коэффициент снижения модуля упругости в задаче №1, неоднородная постановка

Задача №2. Проведено моделирование адаптации задачи №1 к реальным условиям. Для этого помимо «абстрактного» материала, представляющего бетон, определяемого основными двумя физикомеханическими параметрами (модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν) учитывается изменение соотношения между деформациями и напряжениями для конкретного класса бетона на основе формулы Сарджина, как дающие весьма удовлетворительное согласование теоретических значе-

ния с экспериментальными данными, без учёта дополнительных коэффициентов запаса.

Конечно-элементная сетка задачи №2 представлена на рис. 7. Тёмно-жёлтым цветом представлены конечные элементы, моделирующие бетон, бирюзовым — арматуру.

На схеме для простоты восприятия приведена грубая сетка, при непосредственном расчёте использован более частый шаг: для бетона

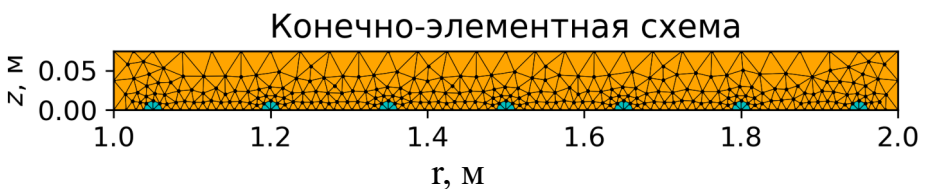


Рис. 7. Конечно-элементная сетка задачи №2

— сетка, максимальным размером не более $d/2$, для арматуры — не более $d/10$, где d — диаметр арматурного стержня принятый в расчёте $d = 2.4$ см. Шаг между арматурными стержнями принят $h_s = 15$ см, как в радиальном направлении r , так и в осевом z . В силу симметрии рассматривается участок по высоте в половину шага арматуры в осевом направлении, т. е. $h_s/2 = 7.5$ см. Расстояние от внутренней и внешней поверхности цилиндра до центров крайних арматурных стержней составляет 5.0 см. В сечении вмещается 7 арматурных стержней. Внутренний радиус цилиндра $R_A = 1$ м, внешний — $R_B = 2$ м. Процент армирования сечения по площади равен $\mu_s = 2.16\%$.

Коэффициент линейного температурного расширения материала и для бетона, и для стали принят $\alpha = 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$. Модуль деформации арматуры принят

$E_s = 2.06 \cdot 10^5$ МПа постоянным и от температуры не изменяется. Коэффициент Пуассона бетона $\nu = 0.2$, арматуры $\nu = 0.3$.

Решение задачи №2 производится в следующих постановках:

1. Однородная постановка: модуль упругости бетона не изменяется и равен $E_{b,0} = 2.0 \cdot 10^4$ МПа, прочность бетона на сжатие $R = 30$ МПа, на растяжение $R_t = 1.5$ МПа; температура изменяется от $T_a = 300^\circ\text{C}$ на внутренней поверхности до $T_b = 0^\circ\text{C}$ на внешней.

2. Неоднородная постановка: модуль упругости бетона изменяется, начальное значение составляет $E_{b,0} = 2.0 \cdot 10^4$ МПа, модуль упругости бетона изменяется для каждого конечного элемента через понижающий коэффициент, прочность бетона на сжатие $R = 30$ МПа, на растяжение $R_t = 1.5$ МПа; температура изменяется от $T_a = 300^\circ\text{C}$ на внутренней поверхности до $T_b = 0^\circ\text{C}$ на внешней.

3. Неоднородная постановка: модуль упругости бетона изменяется для каждого конечного элемента через понижающий коэффициент; температура изменяется от $T_a = 50^\circ\text{C}$ на внутренней поверхности до $T_b = 0^\circ\text{C}$ на внешней. Бетон В40.

4. Неоднородная постановка: модуль упругости бетона изменяется для каждого конечного элемента через понижающий коэффициент; температурный перепад на внешней и внутренней поверхностях отсутствует. На внутреннюю поверхность действует сжимающее напряжение $P_a = 1.50$ МПа. Бетон В40.

5. Неоднородная постановка: модуль упругости бетона изменяется для каждого конечного элемента через понижающий коэффициент; температурный перепад на внешней и внутренней поверхностях отсутствует. На внутреннюю поверхность действует сжимающее напряжение $P_a = 1.80$ МПа. Бетон В50.

Представлено общее заключение по главе: Проведённое моделирование показало существенное расхождение в расчётах железобетонных конструкций при однородной постановке задачи, при неоднородной, и при учёте работы конструкции согласно кривой деформирования и учёта появления растянутых зон.

При использованном соотношении внешнего и внутреннего радиусов конструкции $(R_a - R_b)/R_b = 0.5$ развитие температурных деформаций во всей толще носит преобладающий характер, при котором развиваются значительные растягивающие напряжения и материал, работа которого на растяжение и сжатие существенно различается, наподобие бетона, должен разрушаться даже при значительном армировании конструкции.

В главе 4 исследуется изменение напряжённо-деформированного состояния в железобетонном цилиндре с учётом температурного нагружения и преднапряжения арматурных стержней.

Учёт преднапряжения происходит при помощи задания компоненты σ_{ps} в векторе нагрузки $\sigma_{ps} = [\sigma_{ps,r} \quad \sigma_{ps,\theta} \quad \sigma_{ps,z} \quad 0]^T$. При этом в осесимметричной задаче преднапряжение может происходить в различных направлениях, но в последующих задачах под преднапряжением понимают только одну компоненту в

окружном направлении θ , т. е. $\sigma_{ps} = \begin{bmatrix} 0 & \sigma_{ps,\theta} = \sigma_{ps} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$. Поскольку после снятия нагрузки, вызывающей преднапряжение, материал стремится сжаться, то напряжения преднапряжения имеют знак «минус».

Задача №3. Железобетонная оболочка с внутренней преднапряжённой арматурой. Проводится моделирование толстостенной железобетонной цилиндрической оболочки с внутренним радиусом $R_A = 0.4$ м и внешним $R_B = 0.5$ м с соотношением внешнего и внутреннего радиусов конструкции $(R_a - R_b)/R_b = 0.2$. Учитывается изменение соотношения между деформациями и напряжениями для конкретного класса бетона, определяемого согласно методикам, приведённым в главе 2. За основу были взяты соотношения соотношения на основе формулы Сарджина.

Конечно-элементная сетка задачи №3 представлена на рис. 8. Тёмно-жёлтым цветом представлены конечные элементы, моделирующие бетон, бирюзовым — арматуру. На схеме для простоты восприятия приведена грубая сетка, при непосредственном расчёте использован более частый шаг: для бетона — сетка, максимальным размером не более $d/5$, для арматуры — не более $d/20$, где d — диаметр арматурного стержня принятый в расчёте $d = 2.0$ см. Шаг между арматурными стержнями принят $h_s = 15$ см, как в осевом направлении

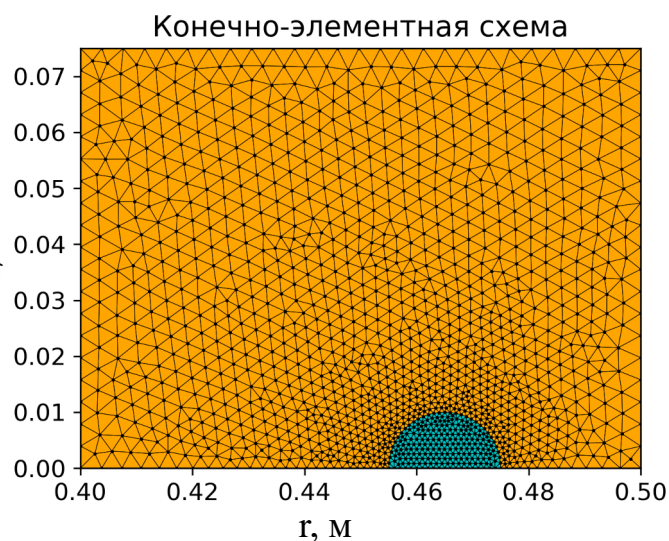


Рис. 8. Конечно-элементная сетка задачи №3

z. В силу симметрии рассматривается участок по высоте в половину шага арматуры в осевом направлении, т. е. $h_s/2 = 7.5$ см. Защитный слой бетона принят 2.5 см от внешней поверхности. Процент армирования сечения по площади равен $\mu_s = 3.11\%$. Коэффициент линейного температурного расширения материала и для бетона, и для стали принят $\alpha = 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$. Модуль деформации арматуры принят $E_s = 2.06 \cdot 10^5$ МПа постоянным и от температуры не изменяется. Коэффициент Пуассона бетона $\nu = 0.2$, арматуры $\nu = 0.3$. Задача рассматривается при неоднородной постановке: модуль упругости бетона изменяется как от температуры, так и от напряжённо-деформированного состояния — согласно методике из главы 2.

При работе метода последовательных приближений во время корректировки коэффициентов, определяющих значения модуля упругости, задано предельное число шагов итерации 20, что вполне достаточно для обеспечения точности в коэффициенте на двух соседних шагах не более $\delta = 0.0001$.

Решение задачи №3 производится в следующих постановках:

1. Задача моделирует работу конструкции без преднапряжения $\sigma_{sp} = 0$ арматурных стержней; температурный перепад на внешней и внутренней поверх-

ностях отсутствует. На внутреннюю поверхность действует сжимающее напряжение $P_a = 0.55$ МПа. Бетон В40. Моделирование показало, что наибольшее допустимое внутреннее давление составляет $P_a = 0.55$ МПа ≈ 5.5 ат, а разрушение происходит не от достижения бетоном своей предельной несущей способности, а от появления зон растяжения.

2. Задача моделирует работу конструкции с учётом преднапряжения $\sigma_{sp} = -265$ МПа арматурных стержней, но без наличия внутреннего давления $P_a = 0$ и температурного перепад $\Delta T = 0$; температурный перепад на внешней и внутренней поверхностях отсутствует. Бетон В40. Моделирование показало, что наибольшее допустимое преднапряжение составляет $[\sigma_{sp}] = -265$ МПа, превышение которого приводит к потере конструкцией своей несущей способности, о чём будет сказано в следующей задаче.

3. Задача моделирует работу конструкции в момент начала разрушения при превышении уровня преднапряжения $\sigma_{sp} = -270$ МПа $< [\sigma_{sp}] = -265$ МПа арматурных стержней, но без наличия внутреннего давления $P_a = 0$ и температурного перепад $\Delta T = 0$; температурный перепад на внешней и внутренней поверхностях отсутствует. Бетон В40. Коэффициент k_ϵ (рис. 9,б) показывает, что зона разрушения находится на границе стыка бетона и арматуры, обращённой к внешней поверхности цилиндра, в точке, где радиальное напряжение превышает предел прочности бетона на растяжение $\sigma_r = 2.549$ МПа $> R_t = 2.264$ МПа, при этом наибольшие касательные напряжения $\tau_{rz} = 2.504$ МПа достигают своего максимума у верхней точки контакта арматуры и бетона, однако, среднее напряжение здесь показывают сжатие. О разрушении бетона в этой области говорит и радиальная компонента деформации ϵ_r (рис. 9,а).

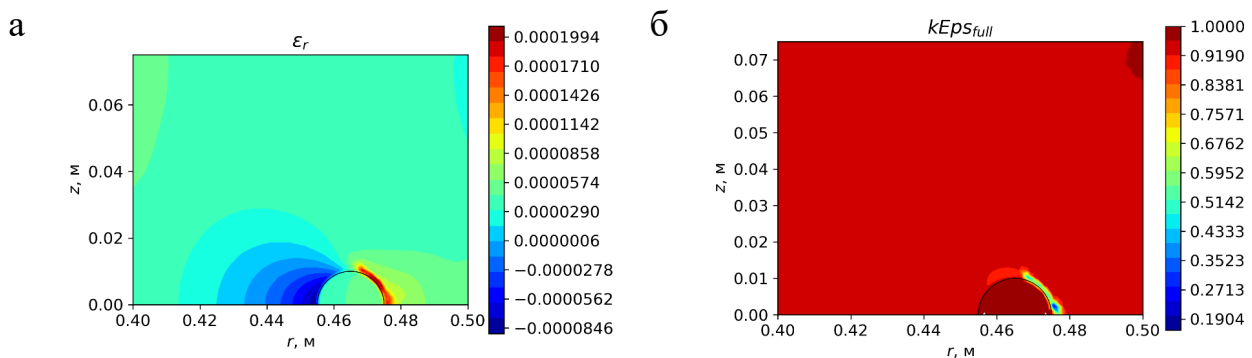


Рис. 9. Задача №3.3: а — относительная деформация в радиальном направлении ϵ_r ; б — коэффициент k_ϵ

4. Задача моделирует работу конструкции с учётом преднапряжения $\sigma_{sp} = -250$ МПа арматурных стержней, но без температурного перепад $\Delta T = 0$; производится поиск наибольшего значения внутреннего давления, при котором конструкция сохраняет свою эксплуатационную способность. Бетон В40; температурный перепад на внешней и внутренней поверхностях отсутствует. Установлено, что предельное внутреннее усилие, при котором сохраняется эксплуатационная способность конструкции, составляет $P_a = 1.1$ МПа. Картина распре-

деления напряжений и деформаций существенно не изменяется по сравнению с задачами №3.1–3.3. Таким образом, использование преднапряжения $\sigma_{sp} = -250$ МПа по сравнению с задачей без преднапряжения арматуры $\sigma_{sp} = 0$, приводит к повышению несущей способности с $P_a = 0.55$ МПа до $P_a = 1.1$ МПа. При этом разрушение материала происходит из-за появления зон с растянутым бетоном.

5. Задача моделирует работу конструкции без преднапряжения $\sigma_{sp} = 0$ арматурных стержней, но при наличии температурного нагружения $T_a = 50^\circ\text{C}$ на внутренней поверхности до $T_b = 0^\circ\text{C}$ на внешней; давление на внутреннюю и внешнюю поверхности отсутствует. Бетон В40. Температурные деформации вызывают значительный рост напряжений, даже при снижении толщины бетонной части с 1.0 м до 0.1 м.

6. При этом арматурные стержни препятствуют свободному росту деформаций, в результате на внутренней поверхности цилиндра возникают значительные сжимающие напряжения, вблизи внешней поверхности — растягивающие. Кроме того, бетон над арматурным стержнем стремится сместиться в сторону внешней поверхности, что так же вызывает появление растянутых зон. Рис. 10 отчётливо показывает области, где будет происходить разрушение бетона.

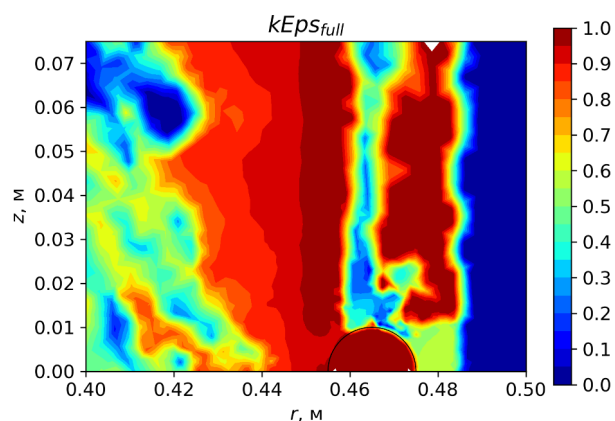


Рис. 10. Задача №3.5, коэффициент k_ε

Решение задачи: внутренний радиус $R_A = 1.0$ м, внешний $R_B = 2$ м, давление на внутреннюю поверхность цилиндра $P_a = 10$ МПа, модуль упругости бетона $E_b = 2.16 \cdot 10^5$ МПа, модуль упругости арматуры $E_s = 2.06 \cdot 10^5$ МПа, уровень преднапряжения $\sigma_{sp} = 500$ МПа. Диаметр арматуры напрямую указан не был, но принимался процент армирования $\mu_s = 0.01$. Пусть шаг между стержнями арматуры $h_s = 20.0$ см, тогда для обеспечения принятого процента армирования требуется диаметр арматурного стержня $d \approx 5$ см.

В реальности стальная арматура будет вдавливаться в бетон и для полноценного моделирования необходимо контролировать взаимное перемещение узлов, поскольку в месте контакта арматуры и бетона будет возникать бесконечно большое напряжение и возможно пересечение несвязанных между собой конечно-элементных сеток, принадлежащих бетону и арматуре, было принято ре-

Задача №4. Исследуется работа железобетонной оболочки с внешней стальной преднапряжённой арматурой. Проводится сравнение с результатами, приведёнными в работе А. В. Муханова. Рассматривается прямая задачи для предварительно напряжённого железобетонного цилиндра с внешним армированием, представляющим собой обмотку арматурой по внешней поверхности. По-

становка задачи: внутренний радиус

шение упростить модель, заменив арматуру на прямоугольный хомут высотой 5 см и шириной 4 см (в силу симметрии половина конечно-элементной схемы представлена на рис. 11). Тогда процент армирования по площади составляет $\mu_s = A_s / A_b = 0.01$, что по проценту армирования полностью соответствует задаче, рассматриваемой в работе А. В. Муханова. На внутреннюю поверхность так же прикладывается давление $P_a = 10$ МПа, хомут имеет преднапряжение $\sigma_{sp} = -500$ МПа. Задача моделирует работу конструкции с учётом преднапряжения арматурных стержней, но без температурного перепада $\Delta T = 0$; производится поиск наибольшего значения внутреннего давления, при котором конструкция сохраняет свою эксплуатационную способность. Задача рассматривается при неоднородной постановке: модуль упругости бетона изменяется как от температуры, так и от напряжённо-деформированного состояния — согласно методике из главы 2, возможное разрушение бетона не моделируется. Бетона В40.

В работе А. В. Муханова утверждается, что при заданном армировании в бетоне не возникает растягивающих окружных напряжений, однако реальная

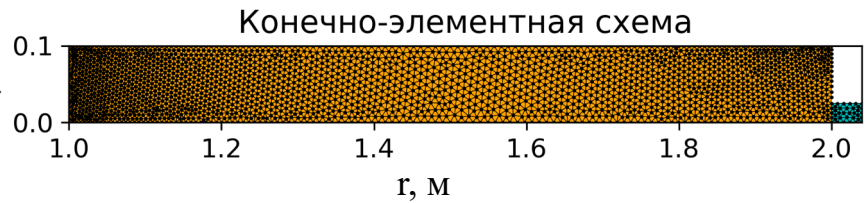


Рис. 11. Конечно-элементная сетка задачи №4

эпюра окружных напряжений показывает, что практически всё сечение оказывается растянутым ($\min(\sigma_{b,\theta}) = 0.326$ МПа; $\max(\sigma_{b,\theta}) = 8.667$ МПа). Анализ использования бетона по несущей способности показал, что коэффициент k_s меняется до уровня 0.803. Таким образом, при расчёте материала необходимо проводить непосредственное моделирование; численно-аналитическое решение, использованное в работе А. В. Муханова, даёт сильно искажённую картину.

Задача №5. Железобетонная конструкция с внешней стальной преднапряжённой оболочкой. Проводится моделирование толстостенной железобетонной цилиндрической оболочки с внутренним радиусом $R_A = 0.4$ м и внешним $R_B = 0.5$ м. Учитывается изменение соотношения между деформациями и напряжениями для конкретного класса бетона, определяемого согласно методикам, приведённым в главе 2. За основу были взяты соотношения соотношения на основе формулы Сарджина, приведённые в главе 2.

Конечно-элементная сетка задачи №5 представлена на рис. 12. Тёмно-жёлтым цветом представлены конечные элементы, моделирующие бетон, бирюзовым — внешний преднапрягаемый стальной хомут. На схеме для простоты восприятия приведена грубая сетка, при непосредственном расчёте использован более частый шаг: для бетона — сетка, максимальным размером не более $h_s/5$, для хомута — не более $b_s/5$, где h_s — шаг между центрами хомутов $h_s = 20$ см, b_s — ширина хомута $b_s = 0.5$ см. Высота хомута принята в 0.8 от шага $0.8 h_s = 16$ см. В силу симметрии рассматривается участок по высоте в половину шага арматуры в осевом направлении, т. е. $h_s/2 = 10.0$ см. Процент армирования

сечения по площади равен $\mu_s = A_s / A_b \cdot 100\% = 4.0\%$. Коэффициент линейного температурного расширения материала и для бетона, и для стали принят $\alpha = 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$. Модуль деформации арматуры принят $E_s = 2.06 \cdot 10^5$ МПа постоянным и от температуры не изменяется. Коэффициент Пуассона бетона $\nu = 0.2$, арматуры $\nu = 0.3$.

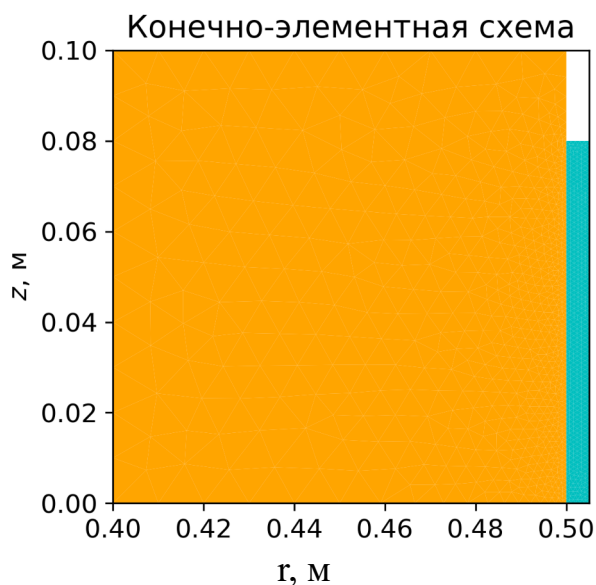


Рис. 12. Конечно-элементная сетка задачи №5

При работе метода последовательных приближений во время корректировки коэффициентов, определяющих значения модуля упругости, задано предельное число шагов итерации 20, что вполне достаточно для обеспечения точности в коэффициенте на двух соседних шагах не более $\delta = 0.0001$. Задача рассматривается при неоднородной постановке: модуль упругости бетона изменяется как от температуры, так и от напряжённо-деформированного состояния — согласно методике из главы 2.

Решение задачи №5 производится в следующих постановках:

Задача моделирует работу конструкции без преднапряжения $\sigma_{sp} = 0$ хомута; температурный перепад на внешней и внутренней поверхностях отсутствует. На внутреннюю поверхность действует сжимающее напряжение $P_a = 0.6$ МПа. Бетон В40. Бетон, согласно коэффициенту k_ϵ

работает практически на пределе в точке стыка открытой поверхности бетона и хомута с минимальным отношением $E(\epsilon_i) / E(\epsilon \rightarrow 0) = 0.667$. Так же в этом месте ярко выделяются средняя деформация ϵ_m и интенсивность деформации ϵ_i и среднее напряжение $\sigma_m = 2.088$ МПа, которое по величине близко к прочности бетона на растяжение $R_t = 2.264$ МПа, а главное напряжение $\sigma_2 = 2.339$ МПа даже превышает его. Резюмируя, в данной постановке наибольшее допустимое внутреннее давление составляет $P_a = 0.6$ МПа ≈ 6 ат.

Задача моделирует работу конструкции с преднапряжением $\sigma_{sp} = -250$ МПа хомута, и при наличии температурного нагружения $T_a = 40^\circ\text{C}$ на внутренней поверхности, $T_b = 0^\circ\text{C}$ на внешней; давление на внутреннюю и внешнюю поверхности отсутствует. Бетон В40. В данном случае хомут отлично сдерживает весь бетонный массив от расширения, создавая значительное усилие обжатия. При этом основные напряжения $\sigma_\theta = -17.50$ МПа и $\sigma_z = -13.49$ МПа возникают на внутренней поверхности в связи с температурным расширением материала и невозможностью развития деформаций, кроме как обратно, к центру цилиндра. Об этом же говорит и развитие перемещений $u = -7.860 \cdot 10^{-5}$ м на внутренней поверхности.

Резюмируя, в данной постановке разрушение наступает при температурном градиенте 40 градусов, при развитии наибольших сжимающих напряжений

на внутренней поверхности цилиндра. Модуль упругости при этом снижает своё значение до уровня 0.8101 от первоначального. Бетон В40.

Как было показано в прошлой задаче №5.2, температурное поле и ограничение перемещений преднапряжённым хомутом сильно изменяют картину напряжённо-деформированного состояния. При этом несущая способность конструкции повышается с $P_a = 0.6 \text{ МПа} \approx 6 \text{ ат}$ для задачи №5.1 до $P_a = 1.2 \text{ МПа} \approx 12 \text{ ат}$. Модуль упругости при этом снижает своё значение до уровня 0.8599 (см. рис. 13) от первоначального на внутренней поверхности цилиндра, разрушение материала от возникновения растягивающих напряжений при этом не происходит.

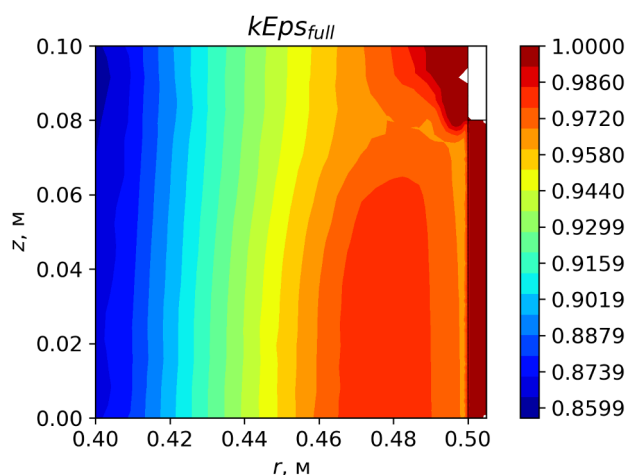


Рис. 13. Задача №5.3, коэффициент k_{ϵ}

Проведённое моделирование задач №3–№5 показало:

1. В задаче №3 использование преднапряжённой арматуры: технологически сложно изготовление подобной конструкции; не даёт существенного преимущества в работе конструкции по несущей способности. Разрушение конструкции происходит во внешних слоях бетона, развитие расширения в которых никак не ограничено.

2. В задаче №4 показано, что напряжённо-деформированное состояние,

возникающее в толстостенном цилиндре с внешним армированием, весьма сложно. Использование численно-аналитических решений даёт весьма грубую оценку, не учитывающую реальное распределение напряжений и деформаций.

3. В задаче №5 показано, что использование преднапряжённого хомута на цилиндре носит весьма неожиданный эффект. При наличии температурного поля, меняющегося от большего значения, на внутренней поверхности, к меньшему, на внешней поверхности, может увеличить несущую способность по внутреннему давлению в 2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и результаты:

1. Построены теоретические кривые деформирования бетона для линейного напряжённого состояния на основе различных теорий и нормативных документов и проведено сопоставление с некоторыми реальными экспериментальными данными, взятыми из открытых источников в различных диссертационных работах. Кривая по Еврокоду наиболее хорошо согласуется с экспериментальными данными, имеет минимальные отклонения по значениям максимального напряжения. Однако, значения относительной продольной деформации в точках с наибольшим напряжением чаще дают лучшее согласование теоретических кривых на основе свода правил и теории Г. А. Гениева. Объяснить это мож-

но тем, что данные на основе свода правил имеют несколько меньшие цифры по допускаемым значениям максимального напряжения в пользу дополнительного запаса прочности готового изделия, что наиболее подходит для построения математических моделей, максимально полно согласующихся с опытными данными.

2. Предложена и реализована в расчётных модулях методика учёта изменения модуля деформации бетона при объёмном напряжённом состоянии. Модель учитывает возникновение ослабленных зон, что позволяет оценивать возможное разрушение конструкции. Для конструкций, работающих в ограниченной среде, учёт изменения свойств бетона как от напряжённо-деформированного состояния, так и от температурного поля, может давать снижение напряжений до трёх раз.

3. Реализована на основе метода конечных-элементов в среде Anaconda на языке Python методика определения напряжённо-деформированного состояния железобетонной оболочки при непосредственном учёте арматуры, в отличие от «традиционного размазывания» последней по сечению, а также выполнена валидация с известными решениями других авторов. Показано, что разрушение конструкции часто происходит не из-за исчерпания несущей способности бетона, а из-за перераспределения напряжённо-деформированного состояния в конструкции, что приводит к образованию областей с растягивающими напряжениями.

4. Доказана нецелесообразность использования внутренней преднапрягаемой арматуры путём моделирования работы толстостенной цилиндрической железобетонной оболочки в различных условиях нагружения. Представлено, что разрушение начинается в первую очередь с внешней поверхности цилиндра, где внутренний слой бетона ничем не ограничен от развития растягивающих напряжений и деформаций.

5. Выявлено существенное развитие зон концентрации напряжений и появление ослабленных зон при непосредственном моделировании совместной работы бетона и преднапрягаемой стальной оболочки. Моделирование показало, что наличие предварительно напряженной стальной обоймы может иметь не столько существенный положительный эффект, однако наличие температурного градиента в пределах 40 градусов может, меняющегося от большего значения, на внутренней поверхности, к меньшему, на внешней поверхности, может увеличить несущую способность конструкции по внутреннему давлению в 2 раза.

Перспективы исследования

В настоящей работе рассмотрены только элементы конструкции, имеющие осевую симметрию. Дальнейшие исследования могут быть направлены на решение задачи точного определения температурных полей и напряжений при возведении массивных монолитных конструкций в трехмерной постановке, учёте развития деформаций ползучести в связующем, появлении усадочных деформации при твердении бетона в начальный период времени. Армирование в настоящей работе моделируется в окружном направлении, необходимо разработать методики учёта арматуры в радиальном и осевом направлениях. Данная ра-

бота даёт примерную работу конструкций, не опираясь на теории прочности, существующие для бетона — работа бетона на сжатие принята лишь по восходящей кривой деформирования.

Разработка собственных программных модулей позволяет уйти от некоторой ограниченности универсальных программных комплексов, независимо рассмотрении множества факторов, влияющих на физико-механические параметры материала, при произвольных законах их изменения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

Научные статьи, опубликованные в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (ВАК):

1. Магомедов, М. А., Моделирование ползучести для замкнутой цилиндрической оболочки при гидростатическом давлении / М. А. Магомедов, **В. В. Кузнецов**, Б. М. Языев, С. В. Литвинов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2024. — Т. 51. — № 4. — С. 191–200. — URL: <https://vestnik.dgtu.ru/jour/article/view/1631>. — DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-191-200>.

2. Litvinov, S.V. Study of the concordance between various concrete deformation models and experimental data for uniaxial compression cases / S. V. Litvinov, B. M. Yazyev, **V. V. Kuznetsov**, N. V. Belyugin, A. A. Avakov // Construction Materials and Products. — 2024. — № 7 (5). — С. 6. — URL: <https://bstu-journals.ru/archives/12143>. — DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-5-6.

3. **Кузнецов, В. В.** Исследование влияния армирования на напряжённно-деформированное состояние бетонных цилиндров при температурных воздействиях с учётом физической нелинейности материала / **В. В. Кузнецов**, С. В. Литвинов, К. В. Черненко, Т. А. Волосатова // Вестник Евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 2. — С. 24SAVN226. — URL: <https://esj.today/PDF/24SAVN226.pdf>.

4. **Кузнецов, В. В.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния преднапряженной физически нелинейной железобетонной оболочки / **В. В. Кузнецов**, С. В. Литвинов, Т. А. Волосатова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026. — Т. 53, №2. — С. 210-222. — URL: <https://vestnik.dgtu.ru/jour/article/view/2108/1106>. — DOI: doi.org/10.21822/2073-6185-2026-53-2-210-222.

Научные статьи, опубликованные в зарубежных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus/ Web of Science:

5. Knyazeva, N. Modeling of Creep of a Closed Cylindrical Shell Under Hydrostatic Pressure / N. Knyazeva, **V. Kuznetsov**, M. Magomedov, A. Popov,

S. Yazyev // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2024. — № 627. — С. 372–384. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82938-3_41.

6. Turina, V. Determination of Temperature Stresses During Construction of a Dock Wall / V. Turina, A. Chepurnenko, K. Novikov, **V. Kuznetsov**, M. Petrov // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. – С. 36-42. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82938-3_5.

Авторские свидетельства на программу для ЭВМ:

7. Расчет напряжённно-деформированного состояния железобетонных стоек с локальным предварительным напряжением арматуры / Стеблянка А.О., Гомелаури В.Г., **Кузнецов В.В.**, Чепурненко А.С., Языев С.Б., Языев Б.М., Зинькова В.А., Сабитов Л.С.; Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024680159, 26.08.2024. Заявка от 21.08.2024.

8. Расчет остаточного напряжённно-деформированного состояния полимерного цилиндра в процессе экструзии: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025660313 / Хежев Т. А., Литвинов С. В., Ерофеев В. Т., Языев Б. М., **Кузнецов В. В.**, Тюряхина Т. П.; Кабардино-Балкарский гос. ун-т. Заявка № 2025617477; заявл 04.04.2025; зарег. 23.04.2025.