

На правах рукописи



Бударин Александр Михайлович

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И
РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА С УЧЁТОМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И ЕЁ
ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ПЛОСКИХ
ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ ПРОДАВЛИВАНИЮ**

2.1.9. Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург, 2026

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: **Алехин Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, советник РААСН, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования объектов строительства», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Официальные оппоненты: **Теличко Виктор Григорьевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительство, строительные материалы и конструкции», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула

Болгов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией железобетонных конструкций и контроля качества, Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева (НИИЖБ им. А.А. Гвоздева) – Акционерное Общество «Научно – исследовательский центр «Строительство» (АО «НИЦ «Строительство»), г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится 15 апреля 2026 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел.: (843)519-42-20.

Отзывы на автореферат, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.04, haybullina.87@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/struktura-vuza/dissertatsionnye-sovety/dissertatsionnyu-sovet-24-2-310-04/soiskatel-budarin-aleksandr-mikhaylovich/>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к. т. н., доцент



Хайбуллина Айгуль
Ильгизаровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном строительстве широкое распространение получили железобетонные каркасы с бескапитальными безбалочными плитами перекрытия. Их использование позволяет снизить трудоемкость опалубочных работ, уменьшить материалоемкость, увеличить полезную высоту помещений и открывает широкие возможности для архитектурной выразительности. Особенностью данного конструктивного решения является наличие значительной концентрации усилий на относительно небольшой площади опоры, что может привести к разрушению плиты от продавливания. Опасность этого типа разрушения заключается в его хрупком, внезапном характере: формирование поверхностей разрушения, являющихся боковыми гранями пирамиды продавливания, может происходить без проявления внешних признаков на поверхности плиты в виде трещин до достижения разрушающей нагрузки. Эти обстоятельства подтверждают важность и актуальность изучения механизма разрушения плитных железобетонных конструкций от продавливания.

Несущая способность железобетонных плит при их разрушении от продавливания зависит от ряда конструктивных и механических параметров, часть которых не учитывается в существующих расчетных методиках, в том числе представленных в актуальных нормативных документах. Одной из основных проблем действующих норм является то, что большая часть лабораторных испытаний, на основе результатов которых строятся расчетные методики, была выполнена для плит с относительно малой рабочей высотой сечения, в то время как в строительных объектах встречаются плиты со значительно большей высотой. Например, плиты с рабочей высотой сечения 480 мм и более имеют малую величину пролета среза и составляют менее 4 % от общего числа испытанных в лабораториях образцов. Это обстоятельство не позволяет достоверно судить о допустимости применения той или иной расчетной методики для оценки несущей способности железобетонных плит на продавливание.

Для устранения этого пробела может быть применено численное моделирование в рамках метода конечных элементов (МКЭ) с использованием нелинейных моделей материала. Однако существующие модели бетона в так называемых «тяжелых» конечно-элементных комплексах, ориентированных на универсальное применение, обладают рядом недостатков:

1. Значительное отклонение формы предельной поверхности модели материала от результатов экспериментов.
2. Наличие нескольких зон сингулярности в предельной поверхности, ведущих к ухудшению сходимости численного решения.
3. Отсутствие алгоритмов, позволяющих корректно отразить основные особенности напряженно-деформированного состояния бетона при продавливании, включающие эффекты контракции, дилатации, масштабный эффект, а также зависимость деформаций, соответствующих пределу прочности, от вида напряженного состояния.

4. Использование моделей материала, учитывающих стадию разупрочнения, неизбежно ведет к возникновению проблемы локализации необратимых деформаций, суть которой заключается в наличии существенной зависимости результатов расчета от размера конечно-элементной сетки, а также ухудшении сходимости задачи при уменьшении размера конечного элемента.

5. Для построения предельной поверхности, поверхности пластического потенциала и использования механизмов упрочнения и разупрочнения в моделях используется множество параметров. При этом зачастую отсутствуют указания или алгоритмы для определения данных параметров.

Таким образом, актуальной является задача разработки модели бетона, позволяющей с достаточной точностью описывать поведение железобетонных плит при продавливании, обладающей алгоритмом решения проблемы локализации деформаций и алгоритмом подбора параметров модели. Также актуальна задача получения методики расчета плит на продавливание, учитывающей основные факторы, влияющие на несущую способность при продавливании.

Степень разработанности темы исследования. Изучением механизма разрушения плит от продавливания занимались отечественные и зарубежные инженеры: А. Н. Болгов, З. Ш. Галяутдинов, А. А. Гвоздев, К. Е. Ермуханов, А. С. Залесов, С. А. Зенин, О. В. Кабанцев, Н. И. Карпенко, С. Ф. Клованич, Н. Н. Коровин, С. Б. Крылов, А. С. Силантьев, А. З. Сокуров, А. Г. Тамразян, В. И. Травуш, Н. Н. Трекин, В. Б. Филатов, И. В. Шеховцов, Z. Bažant, W. H. Dilger, R. C. Eistner, A. Ghali, O. Graf, N. M. Hawkins, E. Hognestad, J. S. Lovorovich, D. I. McLean, P. Menetrey, J. Moe, A. Muttoni, F. E. Richart, M. Staller и др.

Разработкой нелинейных моделей бетона занимались: Г. А. Гениев, Н. И. Карпенко, С. Н. Карпенко, С. Ф. Клованич, В. И. Корсун, А. П. Кричевский, В. М. Круглов, Е. С. Лейтес, Л. Ю. Соловьев, А. В. Яшин, Z. Bažant, O. Buyukorturk, V. Červenka, J. Červenka, A. C. Y. Chen, W. F. Chen, D. J. Han, H. Kupfer, N. Ottosen, W. C. Schonobrich, M. Suidan, K. Willam и др.

Модели бетона, использующие в основе комбинацию теории пластичности и механики разрушения, представлены в работах С. Ю. Фиалко, G. Etse, L. G. Fenves, P. Grassl, M. Jirásek, M. Kaliske, J. Lee, P. Menetrey, I. Zreid и др.

Объект исследования: узлы сопряжения вертикальных железобетонных конструкций и плоских железобетонных плит.

Предмет исследования: влияние различных конструктивных и механических параметров на механизм разрушения плоских железобетонных плит от продавливания.

Научная гипотеза заключается в том, что разработка модели бетона для расчета железобетонных плит на продавливание может быть выполнена с применением комбинации теории пластического течения и механики разрушения. Прикладная методика данного расчета может быть разработана на основании результатов регрессионного анализа, выполненного методом наименьших квадратов.

Целью исследования является инженерная методика расчета плит на продавливание и разработка модели пластичного деформирования и разрушения бетона с учетом повреждаемости.

Задачи исследования:

1. Разработать нелинейную модель бетона, отражающую основные особенности напряженно-деформированного состояния материала в рамках кратковременного статического нагружения: эффекты контракции и дилатации; зависимость деформаций, соответствующих пределу прочности бетона, от вида напряженного состояния; учет масштабного эффекта.

2. Реализовать модель в программном комплексе «ANSYS» в качестве пользовательской модели материала. Выполнить процедуру валидации модели путем сравнения результатов лабораторных и численных испытаний образцов и конструкций при различных видах НДС.

3. Выполнить численные исследования с использованием разработанной модели бетона с целью изучения влияния различных конструктивных параметров на механизм разрушения плоских железобетонных плит от продавливания.

4. Разработать методику расчета плит на продавливание, отражающую влияние основных конструктивных и механических параметров и обладающую хорошим соответствием результатам лабораторных и численных испытаний.

Научная новизна результатов заключается в следующем:

1. Разработана нелинейная модель бетона на базе теории пластического течения (основные положения описаны в работах D. C. Drucker и W. Prager) и механики разрушения (подход основывается на работах Ю. Н. Работнова и P. Grassl). Она учитывает основные особенности напряженно-деформированного состояния бетона, характерные для статического кратковременного нагружения, и может быть использована для решения широкого спектра задач, включая моделирование механизма разрушения железобетонных плит от продавливания.

2. Получены результаты численных испытаний 107 образцов на продавливание с конструктивными и механическими параметрами, характерными для реальных строительных объектов, но отсутствующими в существующей научной базе лабораторных и численных экспериментов. Численные испытания были разделены на 4 серии. В первой серии испытаний изучено влияние масштабного эффекта, во второй – влияние пролета среза плиты, в третьей – относительного размера опоры, в четвертой – процента продольного армирования растянутой зоны плиты.

3. Разработана инженерная методика расчета плит на продавливание, которая отражает влияние основных механических и конструктивных параметров плит и имеет более высокую степень соответствия результатам лабораторных испытаний по сравнению с расчетными методиками, представленными в СП 63.13330.2018, Eurocode 2, ACI 318-25, Model Code 2020.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методики расчета плоских железобетонных плит на продавливание. В работе получены данные о несущей способности и деформациях железобетонных плит различной конфигурации.

Практическая значимость работы:

1. Дана оценка точности нормативных методик расчета плит на продавливание на основании сравнения с результатами опытных данных.
2. Разработанная модель бетона позволяет выполнять численное моделирование бетонных и железобетонных конструкций в рамках статического кратковременного нагружения и может быть использована для решения широкого спектра задач.
3. Разработанная инженерная методика расчета плит на продавливание может быть использована для проверки несущей способности на продавливание плитных конструкций с различными механическими и конструктивными параметрами.

Методология и методы исследования.

При выполнении работы использованы теоретические методы исследования, основанные на теории пластического течения и механике разрушения.

Методологическое основание исследования составили: анализ теоретических и практических материалов по теме исследования с применением методов системного анализа и общенаучных методов исследования, методы идеализации и моделирования, эксперимент.

Достоверность и обоснованность достигается за счет:

1. Использования апробированных математических и статистических методов анализа результатов.
2. Согласованности результатов численных исследований и экспериментальных данных.
3. Использования программного комплекса «ANSYS», верифицированного в системе РААСН для проведения численных исследований.

Личный вклад автора.

1. Разработка и реализация нелинейной модели бетона.
2. Выполнение четырех серий численных испытаний, посвященных изучению влияния различных параметров на механизм разрушения плоских железобетонных плит при продавливании.
3. Разработка методики расчета плит на продавливание с помощью регрессионного анализа методом наименьших квадратов с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt Algorithm).

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования были доложены и получили одобрение на следующих конференциях: International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Владивосток, 2018); 7th International Symposium «Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering» (Новосибирск, 2018); International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (Челябинск, 2019); 10th International Scientific Conference on Building Defects (Ceske Budejovice, Чехия, 2018); 4th International Scientific and Practical Conference on New Information Technologies in the Architecture and Construction (Екатеринбург, 2021); VII International Conference «Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures»

(Екатеринбург, 2021), III Международный научно-практический симпозиум «Будущее строительной отрасли: Вызовы и перспективы развития» (Москва, 2025).

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертационного исследования внедрены в производственную деятельность ООО НПФ «СКАД СОФТ» и АО «Институт Гидропроект» и использованы в учебном процессе Института Строительства и Архитектуры ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 8 работах, 6 из которых входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 2 работы опубликованы в сборниках трудов конференций, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (186 наименований). Общий объем диссертации составляет 165 страниц, включая 21 таблицу и 112 рисунков.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю В. Н. Алехину, канд. техн. наук, заведующему кафедрой «Системы автоматизированного проектирования объектов строительства» института строительства и архитектуры ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», доценту, советнику РААСН, В. В. Ходыкину, канд. техн. наук, научному руководителю ООО НПФ «СКАД СОФТ», главному государственному эксперту ГАУ НО «Управление госэкспертизы», Г. И. Ремпелю, главному эксперту АО «Институт Гидропроект», А. П. Долгих, начальнику отдела расчетных обоснований АО «Институт Гидропроект», А. А. Камзолкину, ведущему инженеру АО НИЦ «СтаДиО».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, степень ее разработанности, формулируются цели и задачи исследования, описывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Далее характеризуется методология и методы исследования, обозначаются положения, выносимые на защиту, а также обосновывается достоверность и апробация полученных результатов. Дается общая информация о структуре диссертации.

Первая глава посвящена обзору и обобщению результатов отечественных и зарубежных исследований влияния различных факторов на несущую способность железобетонных плит при продавливании. К основным факторам можно отнести: масштабный эффект, величину периметра опоры, отнесенную к рабочей высоте сечения конструкции, пролет среза плиты, процент продольного армирования растянутой зоны плиты, тип и интенсивность поперечного армирования.

Выполнен обзор и оценка точности методик расчета железобетонных плит на продавливание, представленных в нормативных документах СП 63.13330.2018, ACI 318-25, Eurocode 2, Model Code 2020. Оценка точности методик выполнялась путем сравнения величины предельного продавливающего усилия, полученного с помощью рассматриваемых методик, с величиной продавливающего усилия, полученного в результате лабораторных испытаний. Для выполнения задачи

использовались результаты испытаний 590 плит на продавливание с поперечной арматурой и без нее, представленные в работах отечественных и зарубежных исследователей. Отмечается, что отсутствие учета или некорректный учет перечисленных выше факторов негативно влияет на точность нормативных методик расчета железобетонных плит на продавливание.

Глава содержит краткий обзор ряда отечественных и зарубежных моделей бетона. На основании сформулированных требований дана характеристика моделей. Представлены основные параметры, которым должна соответствовать разрабатываемая модель бетона.

Вторая глава посвящена описанию разработанной нелинейной модели бетона. В качестве основы в модели используется комбинация теории пластического течения и механики разрушения. Для разделения областей пластической и упругой работы материала в модели используется трехинвариантная предельная поверхность Menetrey-Willam, модифицированная путем добавления шатра сжатия. Предельная поверхность описывается следующими уравнениями:

$$f = \left(\left(\frac{q}{R_b} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \right)^2 + \frac{c_h \cdot m \cdot q}{\sqrt{6} \cdot R_b} \cdot r(e, \theta) \right)^2 - f_{comp}(p) \cdot \left(c_h - c_h \cdot m \cdot \frac{p}{\sqrt{3} \cdot R_b} \right)^2, \quad (1)$$

$$f_{comp}(p) = 1 - \left(\frac{p - X \cdot R_{vh}}{X \cdot (1 - R_{vh})} \right)^2 \cdot H(X - p), \quad (2)$$

где: R_b , R_{bt} , R_{2b} – пределы прочности бетона на одноосное сжатие, одноосное растяжение и двухосное равномерное сжатие соответственно; p , q – гидростатический и девиаторный инварианты соответственно; θ – угол подобия; c_h – параметр девиаторного упрочнения модели; $f_{comp}(p)$ – понижающая функция, описывающая шатер сжатия поверхности; X – координата пересечения шатра сжатия с гидростатической осью; R_{vh} – безразмерный множитель к X , определяющий координату начала шатра сжатия по гидростатической оси.

Квадратичная функция (1) имеет «отражение» в области трехосного растяжения, поэтому для точек с $p > 0$ в модели используется оригинальное уравнение Menetrey-Willam. Сравнение предельной поверхности модели с результатами опытных данных представлено на рисунке 1:

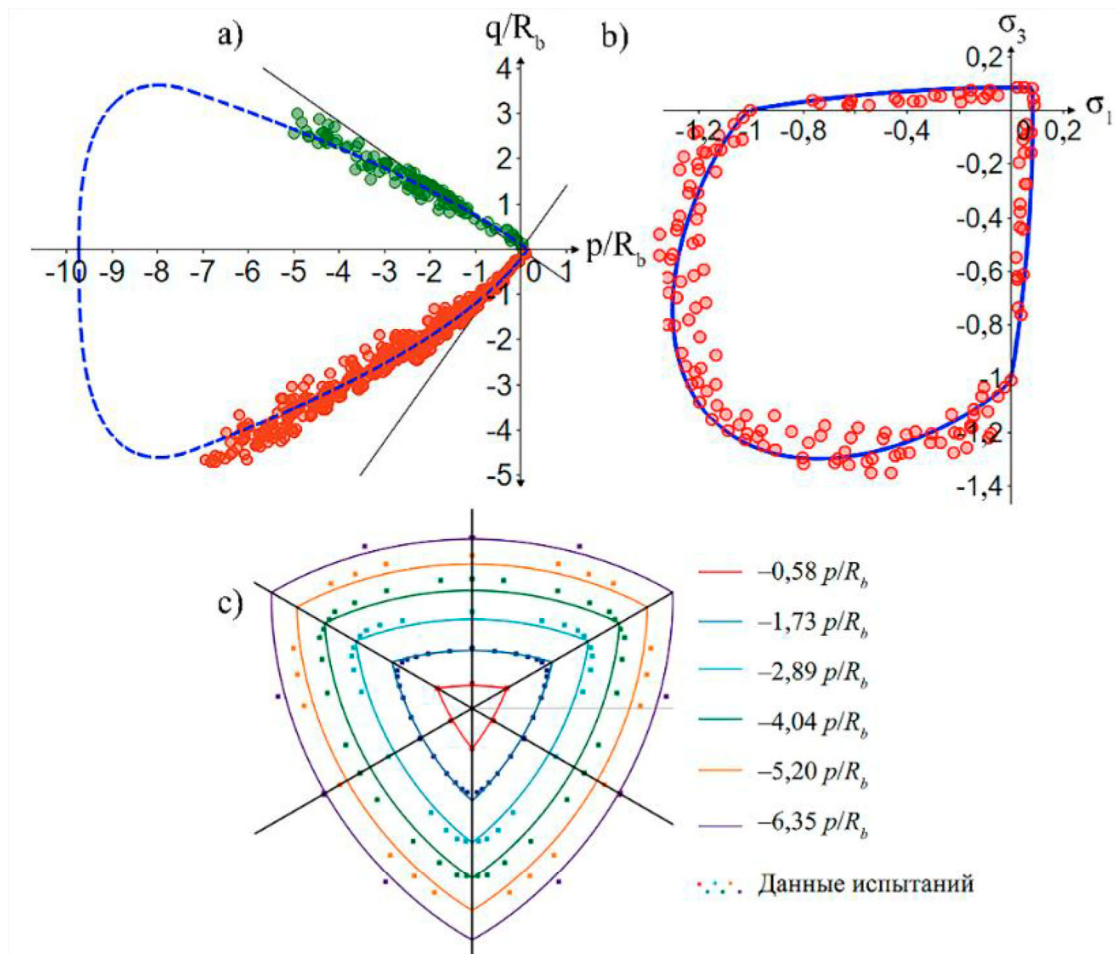


Рисунок 1. Сравнение предельной поверхности с результатами опытов: меридиональное сечение (а), сечение σ_1 – σ_3 (б), девиаторные сечения (с)

Для моделирования эффектов контракции и дилатации в разработанной модели используется комбинированная поверхность пластического потенциала, состоящая из трех частей: g_{shear} , g_{tens} , g_{comp} (Рисунок 2).

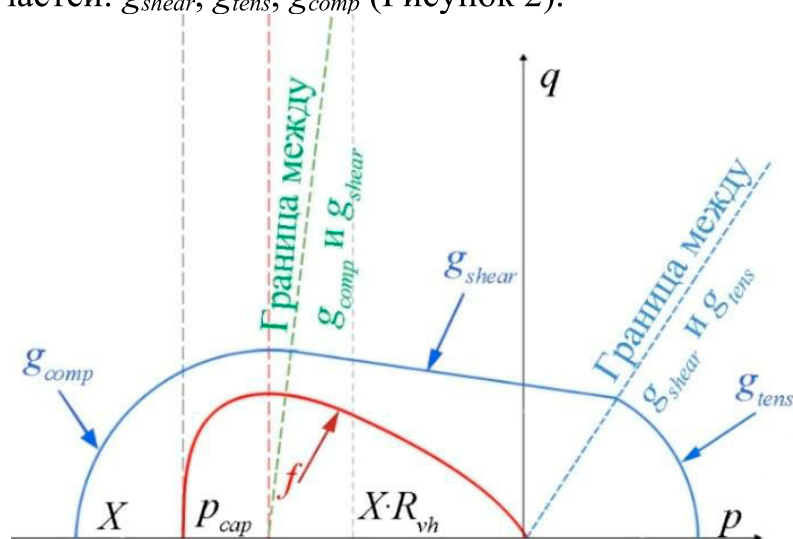


Рисунок 2. Комбинированная поверхность пластического потенциала
Поверхность описывается следующим набором выражений:

$$g_{shear} = \frac{r(e, \theta)}{R_b} \cdot \left(q \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \right)^2 + \frac{q}{\sqrt{6}} \cdot m + m_g(p), \quad (3)$$

$$\partial m_g(p) / \partial p = A_g \cdot \exp(C_g(p)^2 \cdot B_g), \quad (4)$$

$$A_g = \sqrt{3} \cdot (R_b \cdot m + 6 \cdot R_{bt} \cdot r(e, \theta)) / (6 \cdot R_b), \quad (5)$$

$$B_g = 3 \cdot \left(\frac{R_b}{R_{bt} + R_b} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{\Psi_b \cdot \sqrt{2} \cdot R_b \cdot (m + 6)}{R_b \cdot m + 6 \cdot R_{bt}} \right), \quad (6)$$

$$C_g(p) = (p - R_{bt} / \sqrt{3}) / R_b, \quad (7)$$

$$g_{tens} = q^2 + (p - R_b \cdot \sqrt{3} / m), \quad (8)$$

$$g_{comp} = q^2 + (p - p_{cap})^2, \quad (9)$$

где Ψ_c – угол дилатации при одноосном сжатии.

В модели используется двойное независимое упрочнение предельной поверхности: девиаторная эволюция и эволюция шатра сжатия (Рисунок 3).

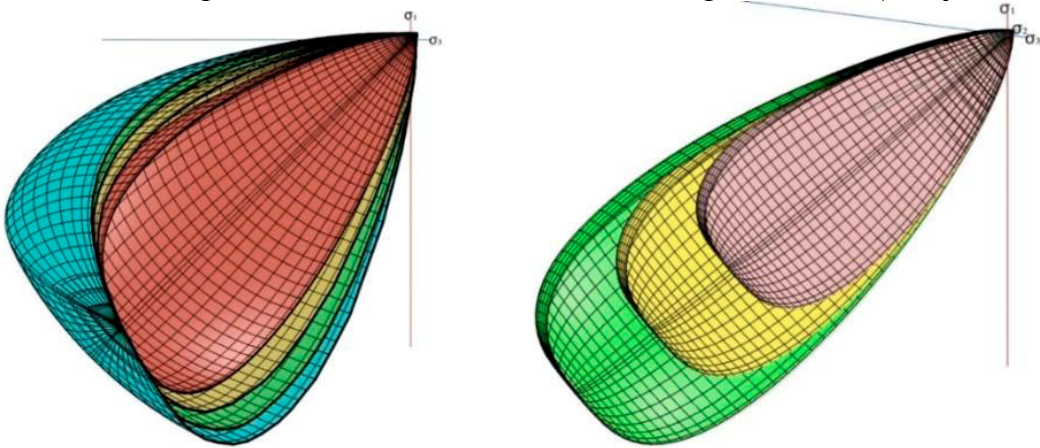


Рисунок 3. Механизм эволюции предельной поверхности: девиаторная эволюция предельной поверхности (слева) и эволюция шатра сжатия (справа)

Скорость девиаторной эволюции поверхности зависит от вида напряженного состояния: чем выше степень гидростатического обжатия в материале, тем больше пластических деформаций требуется для достижения поверхности, соответствующей пределу прочности материала. Подобный механизм позволяет отразить изменение деформаций бетона, соответствующих пределу прочности материала в зависимости от вида напряженного состояния. Эволюция шатра сжатия позволяет учесть контракцию бетона.

Механизм повреждений позволяет моделировать разупрочнение материала, а также изменение жесткости при циклическом и знакопеременном нагружениях. Механизм подразумевает использование в модели параметров поврежденности материала при растяжении (W_t) и сжатии (W_c), которые представляют собой скалярные безразмерные множители к компонентам тензора напряжений. Значения параметров варьируются от 0 (неповрежденный материал) до 1 (полностью

поврежденный материал). Скорость роста параметров зависит от вида напряженного состояния и замедляется с ростом обжата материала.

Для описания процесса разупрочнения бетона при растяжении в модели используется энергетический подход, в рамках которого используется зависимость напряжений от ширины раскрытия трещины. Использование энергетического подхода позволяет учесть масштабный эффект и решить проблему локализации необратимых деформаций.

Для использования разработанной модели необходимо 15 параметров, которые могут быть найдены на основании класса бетона по прочности на сжатие (соответствующие формулы представлены в диссертационной работе). Модель материала реализована в программном комплексе «ANSYS» в виде пользовательской модели USERMAT на языке программирования FORTRAN77.

Третья глава посвящена валидации разработанной модели материала. Процедура валидации заключается в сопоставлении результатов лабораторных испытаний и результатов численного моделирования. Успешное выполнение процедуры позволяет убедиться в корректности работы модели материала. Для численного моделирования бетона использовались трехмерные двадцатиузловые конечные элементы SOLID186. Армирование в железобетонных конструкциях моделировалось дискретно с помощью конечных элементов REINF264.

Валидация выполнялась на бетонных образцах и железобетонных конструкциях. Бетонные образцы испытывали разные виды напряженного состояния (одноосное, двухосное и трехосное). В ходе моделирования, где на бетонных образцах воссоздавалось двухосное напряженное состояние (двухосное сжатие и сжатие-растяжение), наиболее существенная разница между величинами предельных осевых напряжений, полученными численно и экспериментально, составила 7,6 %. Для опытов, где бетонные образцы испытывали трехосное неравномерное сжатие, максимальное отклонение между величинами предельных осевых напряжений составило 6,1 % для первой серии опытов и 5,9 % для второй серии опытов.

Для тестирования зависимости результатов от размера конечно-элементной сетки в работе были воспроизведены испытания шарнирно опертых балок с надрезом из работы Н. А. Kormeling. Было выполнено три численных испытания с разными размерами конечно-элементной сетки (размеры элементов в испытаниях – 1,5 мм, 3 мм и 7,5 мм соответственно). Сравнение результатов «нагрузка-перемещение» лабораторных и численных образцов представлено на рисунке 4.

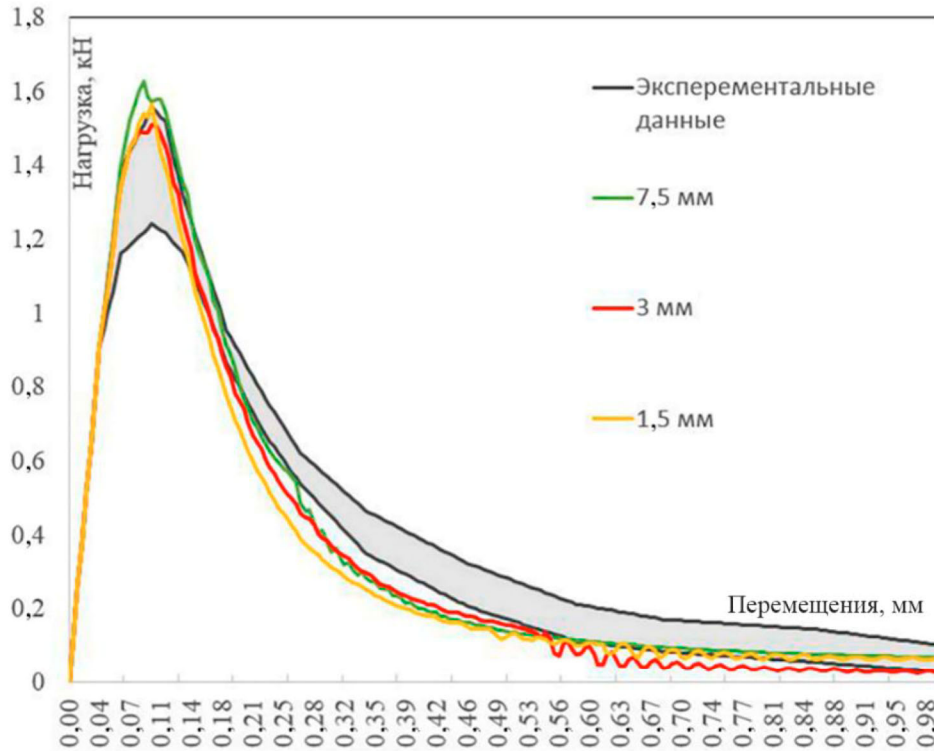


Рисунок 4. Сравнение результатов «нагрузка-перемещения» лабораторных и численных образцов

Можно заключить, что различие между результатами для образцов с разным размером конечно-элементной сетки несущественно.

В работе было выполнено численное испытание 12 шарнирно опертых железобетонных балок, нагруженных сосредоточенной силой в середине пролёта. Разрушение балок происходило по наклонному сечению в результате действия поперечной силы. Картина трещинообразования и графики «нагрузка-перемещения» для лабораторных и численных образцов имеют аналогичный характер. Максимальная разница между величинами разрушающей нагрузки, полученными в лабораторных и численных испытаниях, составила 9,4 %. Максимальная разница между перемещениями балок, соответствующими разрушающей нагрузке, полученными в лабораторных и численных испытаниях, составила 13,2 %.

В работе было выполнено численное моделирование 11 железобетонных плит, имеющих различную рабочую высоту сечения и процент продольного армирования растянутой зоны. На рисунке 5 представлено сопоставление картин трещинообразования для образца PG-6. На рисунке 6 представлено сопоставление результатов «нагрузка-перемещения» лабораторных и численных образцов-плит.

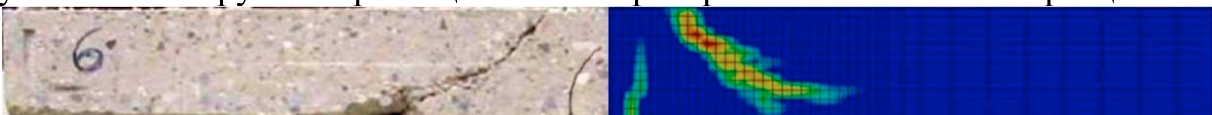


Рисунок 5. Картина трещинообразования образца PG-6

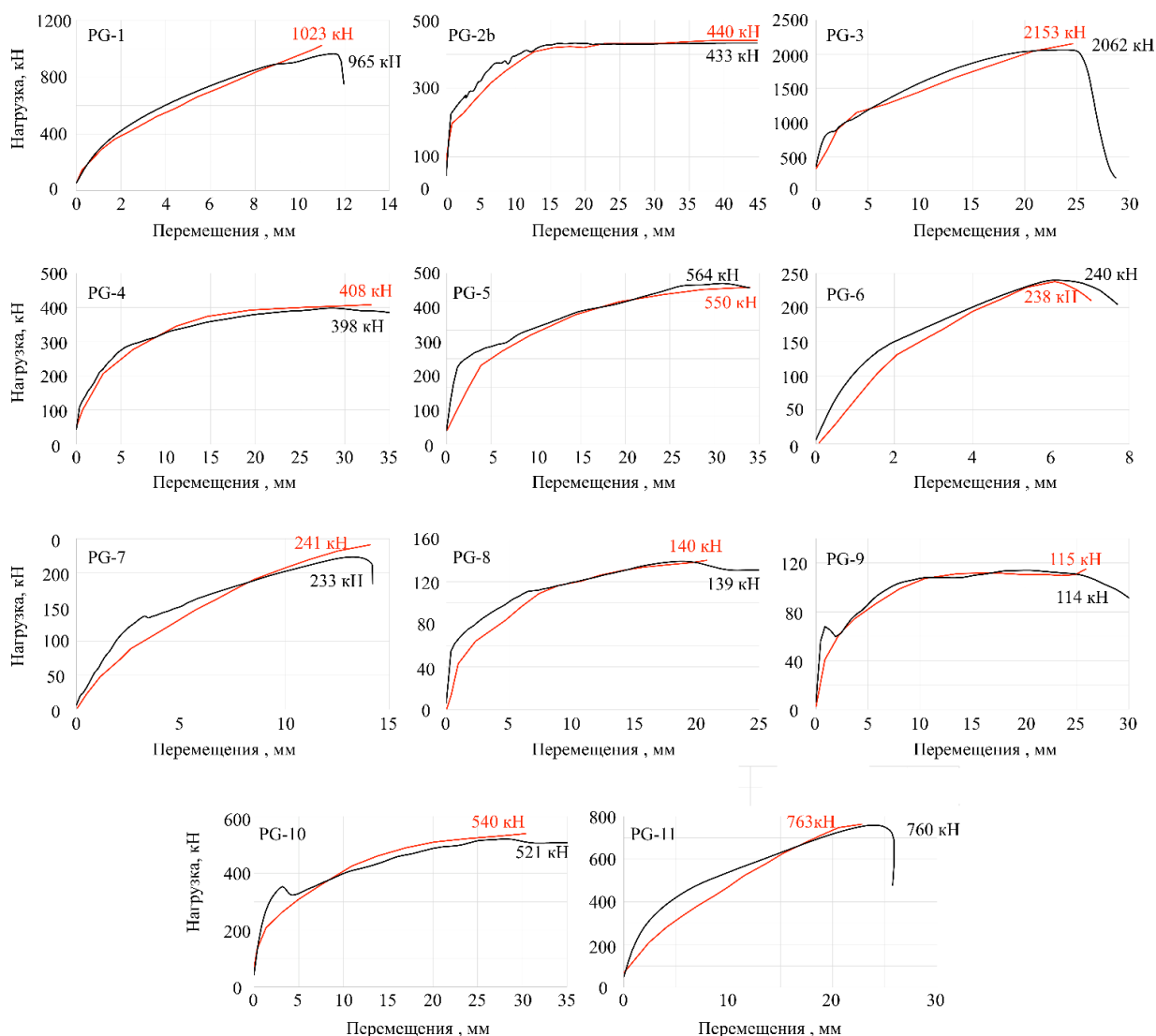


Рисунок 6. Сравнение результатов «нагрузка-перемещение» для лабораторных (красные линии) и численных образцов (черные линии)

В лабораторных и численных испытаниях наблюдались схожая картина трещинообразования и схожие графики «нагрузка-перемещение». Максимальная разница между величинами предельного продавливающего усилия, полученными в лабораторных и численных испытаниях, составила 5,7 %. Максимальная разница между перемещениями плиты, соответствующими предельному продавливающему усилию, полученными в лабораторных и численных испытаниях, составила 13,5 %.

Сопоставление результатов лабораторных и численных экспериментов показывает, что разработанная модель бетона позволяет с достаточной точностью моделировать работу материала при кратковременном статическом нагружении и может быть использована для численных исследований механизма разрушения железобетонных плит от продавливания.

В четвертой главе было выполнено 107 численных испытаний плит на продавливание с целью изучения влияния различных конструктивных параметров на несущую способность плит. Испытания были разделены на 4 серии, каждая из которых была посвящена изучению влияния определенного параметра. Сравнение результатов испытаний выполнялось с помощью величины номинальных касательных напряжений τ_n , нормализованных относительно прочности бетона на

одноосное растяжение R_{bt} . Номинальные касательные напряжения τ_n представляют собой предельное продавливающее усилие F_{ult} , деленное на рабочую высоту сечения h_0 и периметр расчетного контура u , расположенный на расстоянии $h_0/2$ от грани опоры. Для численного моделирования бетона использовались трехмерные конечные элементы SOLID186. Армирование в железобетонных конструкциях моделировалось дискретно с помощью конечных элементов BEAM188.

В первой серии изучалось влияние масштабного эффекта. Всего было выполнено 20 образцов: 5 образцов без поперечного армирования, 15 образцов с поперечной арматурой, имеющие разную интенсивность поперечного армирования. Среди образцов с поперечной арматурой 5 имели поперечную арматуру, обеспечивающую вклад в несущую способность плиты, составляющую 50 % от вклада бетона согласно СП 63.13330.2018, следующие 5 – вклад на уровне 75 % от вклада бетона, последние 5 – вклад на уровне 100 % от вклада бетона. Остальные конструктивные и механические параметры оставались неизменными для всех образцов. На рисунке 7 представлено сравнение зависимостей τ_n/R_{bt} от величины h_0 для плит с разной интенсивностью поперечного армирования.

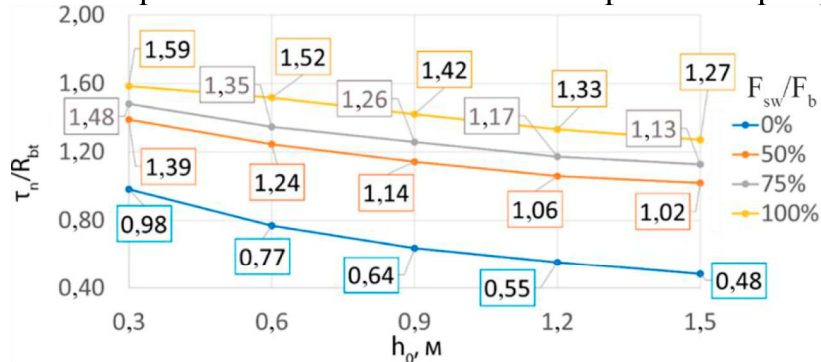


Рисунок 7. Серия №1. Сравнение зависимостей τ_n/R_{bt} от величины h_0 для плит с разной интенсивностью поперечного армирования

Несмотря на то, что с увеличением рабочей высоты сечения плиты ее несущая способность и деформации, соответствующие наступлению предельного состояния, растут, величина τ_n/R_{bt} и перемещения, нормализованные относительно h_0 – падают. Уменьшение τ_n/R_{bt} с ростом h_0 зависит от интенсивности поперечной арматуры: для плит без поперечного армирования уменьшение τ_n/R_{bt} с ростом h_0 с 0,3 м до 1,5 м составило 51,02 %, для плит с $F_{sw}/F_b = 0,5$ изменение составило 26,62 %, для плит с $F_{sw}/F_b = 0,75$ изменение составило 23,65 %, для плит с $F_{sw}/F_b = 1$ изменение составило 20,13 %. Уменьшение влияния масштабного эффекта при росте интенсивности поперечного армирования можно объяснить участием арматуры в уравнении энергетического баланса: поперечная арматура поглощает энергию и позволяет осуществлять стабильный рост трещины.

Во второй серии исследовалось влияние пролета среза r_λ на несущую способность плиты при продавливании. Всего было выполнено 30 образцов: 10 образцов с $h_0 = 0,3$ м, 10 образцов с $h_0 = 0,6$ м и 10 образцов с $h_0 = 0,9$ м. Для каждой рабочей высоты сечения выполнялись испытания 5 образцов без поперечного армирования, 5 образцов с равномерным распределением поперечной арматуры вокруг опоры. Интенсивность поперечного армирования подбиралась таким образом, чтобы вклад арматуры в несущую способность на продавливание

согласно СП 63.13330.2018 составлял 75 % от вклада бетона. На рисунке 8 представлено сравнение зависимостей τ_n/R_{bt} от величины r_λ .

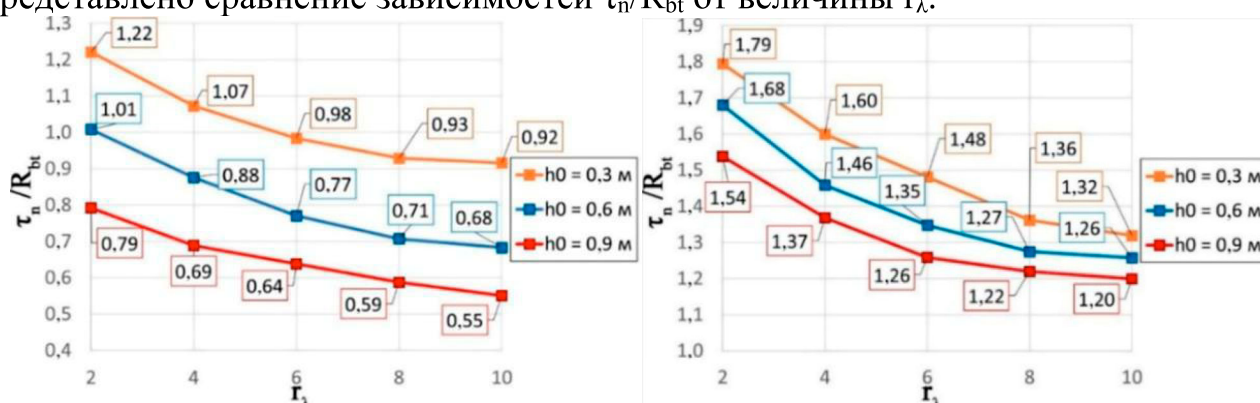


Рисунок 8. Серия №2. Сравнение зависимостей τ_n/R_{bt} от r_λ для плит без поперечной арматуры (слева) и с поперечной арматурой (справа)

На основании полученных результатов можно заключить, что с уменьшением величины пролета среза r_λ несущая способность плиты увеличивается. Наиболее интенсивный рост несущей способности наблюдается при $r_\lambda \leq 4$. Увеличение номинальных нормализованных касательных напряжений τ_n/R_{bt} с уменьшением r_λ с 10 до 2 было примерно одинаковым для плит с поперечным армированием и без него и составило в среднем 26,83 %.

В третьей серии исследовалось влияние относительного размера опоры u_0/h_0 на несущую способность плиты при продавливании. Всего было выполнено 27 образцов: 9 образцов с $h_0 = 0,3$ м, 9 образцов с $h_0 = 0,6$ м и 9 образцов с $h_0 = 0,9$ м. Для каждой рабочей высоты сечения выполнялись испытания 3 образцов без поперечного армирования, 3 образцов с равномерным распределением поперечной арматуры вокруг опоры и 3 образцов с крестообразным распределением арматуры. На рисунке 9 представлено сравнение зависимостей τ_n/R_{bt} от u_0/h_0 для плит с разной рабочей высотой сечения.

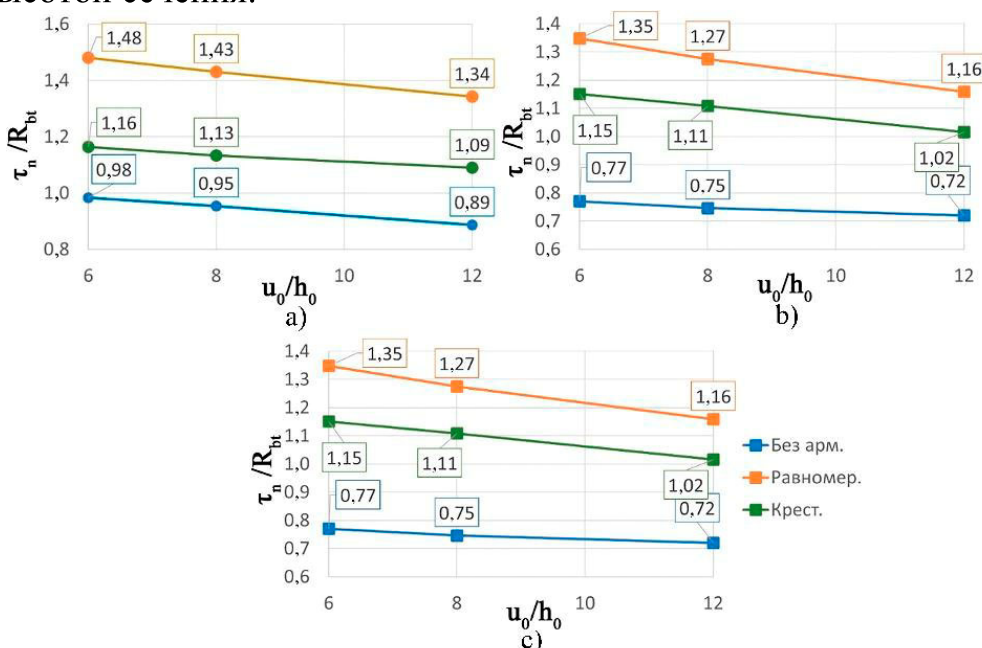


Рисунок 9. Серия №3. Сравнение зависимостей τ_n/R_{bt} от u_0/h_0 для плит с рабочей высотой сечения $h_0 = 0,3$ м (а), $h_0 = 0,6$ м (б), $h_0 = 0,9$ м (с)

Увеличение u_0/h_0 приводит к росту несущей способности и деформаций, соответствующих наступлению предельного состояния. Подобное поведение объясняется увеличением периметра контура расчетного поперечного сечения u . Рост параметра u_0/h_0 также приводит к уменьшению величины τ_n/R_{bt} . Для плит без поперечной арматуры снижение τ_n/R_{bt} с ростом u_0/h_0 в среднем составило 8,35 %, для плит с равномерным распределением арматуры – 10,23 %, для плит с крестообразным распределением арматуры – 8,46 %. Таким образом, уменьшение τ_n/R_{bt} практически не зависит от наличия поперечного армирования и его распределения вокруг опоры. Следовательно, изменение u_0/h_0 влияет не только на вклад бетона F_b в несущую способность плиты, но и на вклад поперечного армирования F_{sw} .

В четвертой серии исследовалось влияние процента продольного армирования растянутой зоны плиты μ на ее несущую способность при разрушении от продавливания. Всего было выполнено 30 образцов: 10 образцов с $h_0 = 0,3$ м, 10 образцов с $h_0 = 0,6$ м и 10 образцов с $h_0 = 0,9$ м. Для каждой рабочей высоты сечения выполнялись испытания 5 образцов без поперечного армирования, 5 образцов с поперечной арматурой. На рисунке 10 представлено сравнение зависимостей τ_n/R_{bt} от величины μ для плит с разной рабочей высотой сечения:

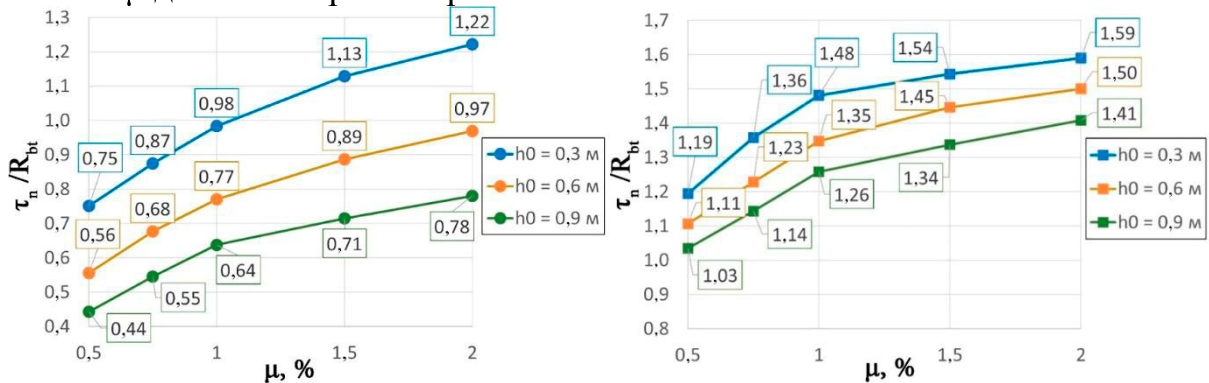


Рисунок 10. Серия №4. Сравнение зависимостей τ_n/R_{bt} от μ для плит без поперечной арматуры (слева) и с поперечной арматурой (справа)

На основании полученных результатов можно заключить, что увеличение процента продольного армирования растянутой зоны μ ведет к росту несущей способности плиты при продавливании. Зависимость изменения τ_n/R_{bt} от μ является нелинейной: с увеличением процента продольного армирования ее вклад в передачу сдвиговых усилий становится менее эффективным. При росте величины μ с 0,5 % до 2 % увеличение номинальных нормализованных напряжений τ_n/R_{bt} для плит без поперечной арматуры составило в среднем 71,05 %, для плит с поперечной арматурой – 35,21 %. Более высокий рост несущей способности для плит без поперечного армирования объясняется тем, что изменение процента продольного армирования растянутой зоны оказывает влияние только на вклад бетона F_b .

Пятая глава посвящена разработке методики расчета железобетонных плит на продавливание. Разработка методики выполнена с помощью регрессионного анализа методом наименьших квадратов (МНК). Основная идея МНК заключается в поиске значений коэффициентов функции, дающих наименьшую сумму квадратов разностей между результатами экспериментальных данных и

результатами, полученными с помощью рассматриваемой функции. Данная задача может быть выполнена с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта, который осуществляет итеративный поиск решения задачи о наименьших квадратах. Анализ выполнялся в два этапа: на первом этапе, используя результаты испытаний плит без поперечной арматуры, выполнялось построение функции F_b , описывающей продавливающее усилие, воспринимаемое бетоном; на втором этапе выполнялось построение функций, позволяющих оценить несущую способность плиты с поперечной арматурой.

Построенная в результате регрессионного анализа методика расчета сводится к вычислению предельного продавливающего усилия F_{ult} . Для плит без поперечной арматуры F_{ult} принимается равной усилию F_b , воспринимаемому бетоном (10). Для плит с поперечной арматурой F_{ult} вычисляется как минимальная величина среди условий (11)-(13).

$$F_b = 1,15 \cdot R_{bt} \cdot u \cdot h_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + h_0/d_0}} \cdot \left(\frac{\mu \cdot R_s}{R_b} \right)^{1/3} \cdot r_\lambda^{-1/4} \cdot \left(\frac{a}{h_0} \right)^{-1/5}, \quad (10)$$

$$F_w = F_b + F_{sw} = F_b + 0,8 \cdot A_{sw} \cdot R_{sw} \cdot \left(\frac{a}{h_0} \right)^{-1/5}, \quad (11)$$

$$F_{out} = 1,15 \cdot R_{bt} \cdot u_{out} \cdot h_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + h_0/d_0}} \cdot \left(\frac{\mu \cdot R_s}{R_b} \right)^{1/3} \cdot r_\lambda^{-1/4} \cdot \left(\frac{a_{0,out}}{h_0} \right)^{-1/5}, \quad (12)$$

$$F_{cr} = C \cdot F_b, \quad (13)$$

где: F_{sw} – усилие, воспринимаемое поперечной арматурой; F_w – усилие, воспринимаемое плитой при разрушении внутри контура установки поперечного армирования; F_{out} – усилие, воспринимаемое плитой при разрушении за контуром установки поперечного армирования; F_{cr} – усилие, воспринимаемое плитой при разрушении по грани опоры; u , u_{out} – длина контрольного периметра, расположенного на расстоянии $h_0/2$ от грани опоры и от границы размещения поперечной арматуры соответственно; A_{sw} – площадь поперечной арматуры, расположенной в границах $1/3 \cdot h_0 \dots h_0$ вокруг опоры; R_{sw} – предел текучести поперечной арматуры; a – параметр, принимаемый равным $\pi \cdot d$ для круглых опор (d – диаметр опоры) и $4 \cdot a_{max} \leq 16 \cdot a_{min}$ для остальных видов опор (a_{max} и a_{min} – размеры наиболее длинной и короткой сторон опоры в плане, соответственно); a_{out} – параметр, вычисляемый аналогично параметру a , но для контура установки поперечной арматуры с учетом размеров его сторон и формы; $d_0 = 0,1$ м – переходный размер; μ – коэффициент продольного армирования растянутой зоны плиты (принимается не более 2 %); C – эмпирический коэффициент, зависящий от типа поперечного армирования. Коэффициент принимается равным $C = 2$ для поперечной арматуры с высаженными головками и арматуры, сформированной из обрезков металлоконструкций, $C = 1,5$ для остальных типов арматуры.

Вклад поперечной арматуры учитывается при $F_{sw} \geq 0,25 \cdot F_b$. Величина r_λ принимается не менее 0,25. Значение функции $(\mu \cdot R_s / R_b)^{1/3}$ принимается не менее 1 и не более 3,5.

Оценка точности инженерной методики может быть выполнена с помощью статистических показателей на основании сравнения величины предельного продавливающего усилия, полученного с помощью рассматриваемой методики (F_{calc}), и величин, полученных в лабораторных (F_{exp}) и численных испытаниях (F_{num}). Коэффициент детерминации (R^2) является показателем соответствия математической модели данным лабораторных испытаний. Величина R^2 принимает значения от 0 до 1: чем ближе значение R^2 к 1, тем выше степень соответствия. Коэффициент вариации (CV) является показателем стабильности вычислений и характеризует относительную меру отклонения измеренных значений от среднего арифметического значения. Чем ближе CV к нулю, тем стабильнее результаты.

На рисунках 11 и 12 представлено сравнение величины предельного продавливающего усилия, полученного с помощью выражений (10)-(13), с величиной предельного продавливающего усилия, полученного в лабораторных и численных испытаниях соответственно. В таблицах 1 и 2 представлены показатели сравнения результатов, полученных с помощью выражений (10)-(13), с результатами, полученными в лабораторных и численных испытаниях соответственно.

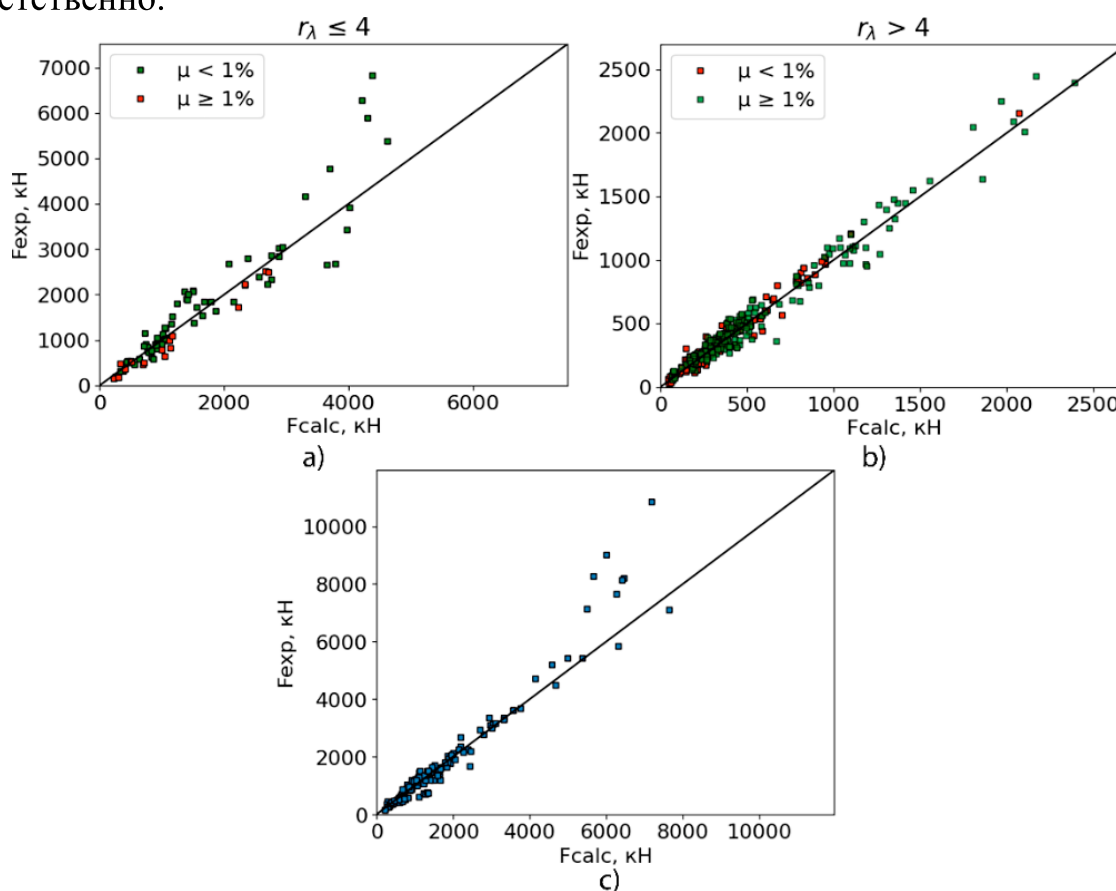


Рисунок 11. Сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в лабораторных испытаниях (F_{exp}) и с помощью выражений (10)-(13) (F_{calc}): а) плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda \leq 4$; б) плиты без поперечной арматуры с величиной $r_\lambda > 4$; в) плиты с поперечной арматурой

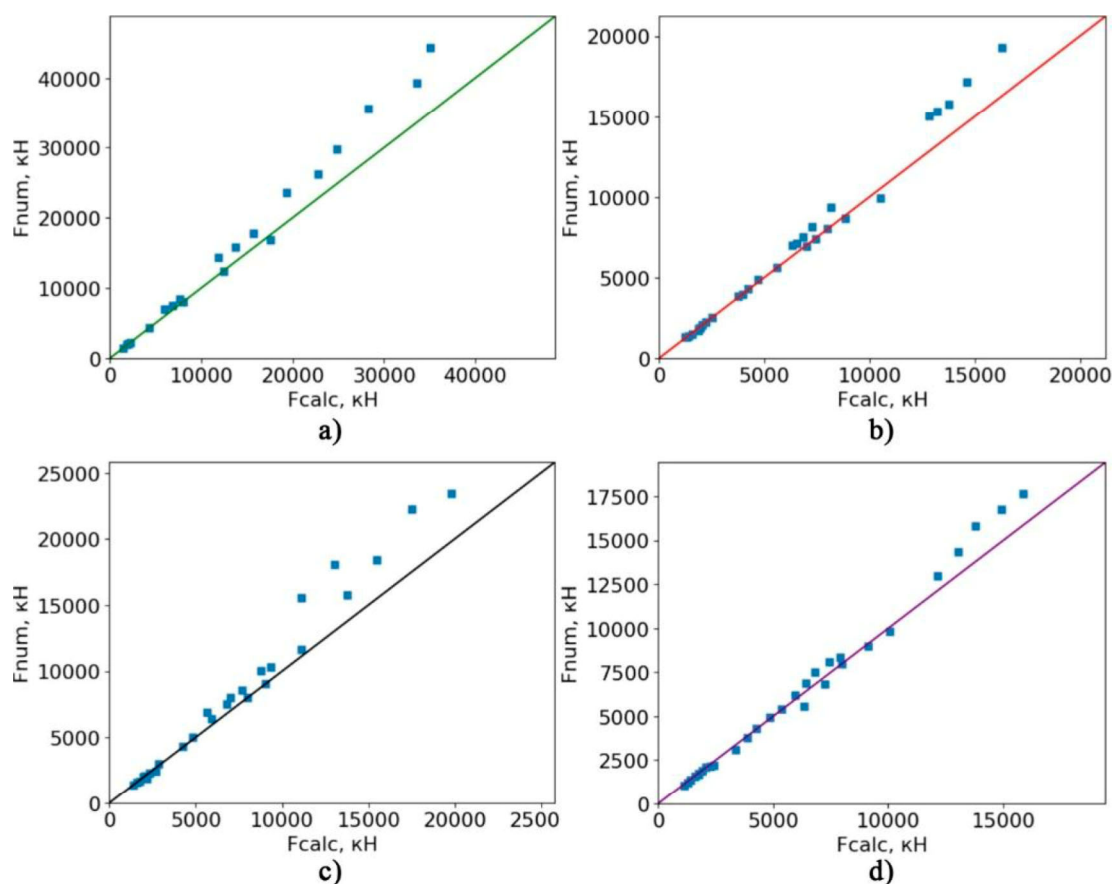


Рисунок 12. Сравнение величин предельного продавливающего усилия, полученного в численных испытаниях (F_{num}) и с помощью выражений (10)-(13) (F_{calc}): а) для серии №1; б) для серии №2; в) для серии №3 д) для серии №4

Таблица 1. Показатели оценки результатов сравнения F_{exp} и величины F_{calc} , вычисленной с помощью разных инженерных методик

Документ	Показатель	Серия				попереч. арм.
		$r_\lambda \leq 4$		$r_\lambda > 4$		
		$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	$\mu < 1\%$	$\mu \geq 1\%$	
СП 63.13330.2018	CV	0,24	0,51	0,49	0,33	0,49
	R^2	0,80	0,70	-0,07	0,81	0,81
Eurocode 2	CV	0,20	0,36	0,20	0,19	0,20
	R^2	0,68	0,95	0,97	0,96	0,81
ACI 318-25	CV	0,23	0,52	0,31	0,23	0,31
	R^2	0,41	0,88	0,85	0,80	0,59
МС 2020	CV	0,22	0,49	0,22	0,19	0,19
	R^2	0,79	0,67	0,96	0,94	0,83
Выражения (10)-(13)	CV	0,20	0,24	0,20	0,16	0,19
	R^2	0,84	0,95	0,97	0,97	0,91

При сравнении с результатами опытных данных, представленная методика обладает наименьшим коэффициентом вариации (CV), а также величиной коэффициента детерминации (R^2) наиболее близкой к 1. Для 83 % плит с поперечной арматурой приоритетный механизм разрушения совпал с механизмом разрушения, наблюдаемым в лабораторных испытаниях.

Таблица 2. Показатели оценки результатов сравнения F_{num} и величины F_{calc} , вычисленной с помощью разных инженерных методик

Документ	Показатель	Серия			
		1	2	3	4
СП 63.13330.2018	CV	0,16	0,18	0,14	0,21
	R^2	0,26	0,63	0,34	0,45
Eurocode 2	CV	0,21	0,22	0,25	0,39
	R^2	0,69	0,75	0,66	0,64
ACI 318-25	CV	0,10	0,14	0,13	0,18
	R^2	0,96	0,95	0,96	0,95
МС 2020	CV	0,14	0,11	0,12	0,10
	R^2	0,93	0,93	0,92	0,94
Выражения (10)-(13)	CV	0,09	0,07	0,12	0,07
	R^2	0,93	0,96	0,92	0,98

В рамках сравнения с результатами численных экспериментов, представленная методика обладает наименьшим CV среди всех рассмотренных подходов. Для всех серий испытаний наблюдается высокая степень соответствия опытными данным. Максимально близкие к 1 величины R^2 получены для 2-й и 4-й серий испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа работ различных авторов, посвященных изучению механизма разрушения железобетонных плит от продавливания, выделены основные факторы, влияющие на несущую способность конструкции: масштабный эффект, пролет среза плиты, относительный размер опоры, коэффициент продольного армирования растянутой зоны плиты, тип и интенсивность поперечного армирования. Отсутствие либо некорректный учет описанных выше факторов существенно влияет на точность расчетных методик. Большая часть из них использует некорректную функцию для отражения влияния масштабного эффекта. По этой причине для нормативной методики СП 63.13330.2018 наблюдается тенденция к завышению несущей способности плит без поперечной арматуры с ростом их рабочей высоты. Для рассмотренной выборки лабораторных испытаний отношение величины предельного продавливающего усилия, полученного с помощью расчетной методики, к усилию, полученному в испытаниях, составляет 2,3. Для выполненных численных испытаний максимальное завышение несущей способности достигло значения 2,1.

1. Данные о механизмах разрушения плит с большой рабочей высотой, отсутствующие в литературе, могут быть получены с помощью численных исследований, выполненных методом конечных элементов с использованием нелинейной модели бетона. Однако значительная часть рассмотренных в работе моделей бетона содержит недостатки, влияющие на точность результатов моделирования и стабильность конечно-элементного решения: значительное отклонение формы предельной поверхности от результатов опытных данных, отсутствие учета эффектов дилатации и контракции, отсутствие механизмов,

позволяющих учесть влияние масштабного энергетического эффекта и выполнить регуляризацию проблемы локализации необратимых деформаций.

2. Разработана модель бетона, использующая в основе комбинацию теории пластического течения (основные положения которой описаны в работах D. C. Drucker и W. Prager) и механики разрушения (подход основывается на работах Ю. Н. Работнова и P. Grassl). Теория пластического течения используется для моделирования эффектов дилатации и контракции, а также для отражения зависимости деформаций бетона от вида напряженного состояния. Механика разрушения используется для моделирования процесса разупрочнения материала и изменения жесткости в рамках циклического и знакопеременного нагружения. Для моделирования процесса разупрочнения при растяжении используется энергетический подход, позволяющий учесть масштабный эффект и выполнить регуляризацию проблемы локализации необратимых деформаций. Модель учитывает основные особенности напряженно-деформированного состояния материала, характерные для статического кратковременного нагружения, и может быть использована для решения широкого спектра задач (в первую очередь для моделирования разрушения железобетонных плит от продавливания). Модель реализована в ПК «ANSYS» на языке программирования FORTRAN77.

3. Корректность работы модели бетона подтверждена на основании серии валидационных тестов, в которых воспроизводилась работа бетонных образцов и железобетонных конструкций под статической нагрузкой. В ходе опытов, где на бетонных образцах воссоздавалось двухосное напряженное состояние (двухосное сжатие и сжатие-растяжение), наиболее существенная разница между величинами предельных осевых напряжений, полученными численно и экспериментально составила 7,6 %. Для опытов, где бетонные образцы испытывали трехосное неравномерное сжатие, максимальное отклонение между величинами предельных осевых напряжений составило 6,1 % для первой серии опытов и 5,9 % для второй серии опытов.

В работе выполнено численное моделирование серии железобетонных балок, нагруженных сосредоточенной силой в середине пролета. Картина трещинообразования, а также графики нагрузка-перемещения в лабораторных и численных опытах имеют схожий характер и значения. Максимальная разница между величинами разрушающей нагрузки среди всех образцов составила 9,4 %, а между перемещениями, соответствующими разрушающей нагрузке – 13,2 %.

Проведено численное моделирование серии железобетонных плит на продавливание. Образцы имели разную рабочую высоту сечения и содержание продольной арматуры. Максимальная разница между величинами предельного продавливающего усилия составила 5,7 %, а между перемещениями, соответствующими разрушающей нагрузке – 13,5 %.

На основании результатов валидации сделан вывод, что разработанная модель позволяет с достаточной точностью моделировать работу бетона при разных видах напряженно-деформированного состояния при статическом кратковременном нагружении, отражает влияние масштабного эффекта и не обладает чувствительностью результатов к размеру конечно-элементной сетки.

4. Для исследования влияния ряда факторов на несущую способность железобетонных плит при продавливании было выполнено 107 численных опытов, разделенных на 4 серии в соответствии с исследуемым фактором. В результате получены зависимости, подтверждающие существенное влияние исследуемых факторов на несущую способность железобетонных плит при их разрушении от продавливания как с поперечной арматурой, так и без нее.

В первой серии численных опытов выполнялось исследование влияния масштабного эффекта на несущую способность плит при разном соотношении вклада поперечной арматуры F_{sw} и бетона F_b согласно СП 63.13330.2018. Согласно полученным результатам, с увеличением рабочей высоты сечения плиты h_0 ее относительная несущая способность, выраженная с помощью нормализованных номинальных напряжений τ_n/R_{bt} – падает. Для плит без поперечного армирования уменьшение τ_n/R_{bt} с ростом h_0 с 0,3 м до 1,5 м составило 51,0 %, для плит с $F_{sw}/F_b = 0,5$ изменение составило 26,6 %, для плит с $F_{sw}/F_b = 0,75$ изменение составило 23,7 %, для плит с $F_{sw}/F_b = 1,0$ изменение составило 20,1 %. Уменьшение влияния масштабного эффекта при росте интенсивности поперечного армирования объясняется участием арматуры в уравнении энергетического баланса.

Во второй серии численных опытов выполнялось исследование влияния пролета среза плиты на ее несущую способность при продавливании. При уменьшении величины пролета среза r_λ происходит рост несущей способности конструкции и деформаций. Наиболее интенсивный рост несущей способности наблюдается при $r_\lambda \leq 4$, что соответствует результатам лабораторных испытаний. При уменьшении величины r_λ с 10 до 2 рост величины τ_n/R_{bt} был примерно одинаковым для образцов с разной величиной h_0 и составил в среднем 26,8 %.

В третьей серии численных опытов выполнялось исследование влияния относительного размера опоры u_0/h_0 на несущую способность плиты. При росте u_0/h_0 с 6 до 12 снижение τ_n/R_{bt} было примерно одинаковым для плит с разной рабочей высотой сечения, с поперечным армированием и без него, и в среднем составило 9,0 %. Таким образом, можно заключить, что уменьшение τ_n/R_{bt} практически не зависит от наличия поперечного армирования и его распределения вокруг опоры. Следовательно, изменение u_0 влияет не только на вклад бетона F_b в несущую способность плиты, но и на вклад поперечного армирования F_{sw} .

В четвертой серии численных опытов выполнялось исследование влияния процента продольного армирования растянутой зоны плиты μ на ее несущую способность при разрушении от продавливания. При увеличении μ с 0,5 % до 2 % увеличение номинальных нормализованных напряжений τ_n/R_{bt} для плит без поперечной арматуры составило в среднем 71,1 %, а для плит с поперечной арматурой – 35,2 %. Более высокий рост несущей способности для плит без поперечного армирования объясняется тем, что изменение процента продольного армирования растянутой зоны оказывает влияние только на вклад бетона F_b .

5. Представлена авторская инженерная методика для расчета железобетонных плит на продавливание, отражающая влияние основных факторов, оказывающих влияние на несущую способность конструкции. С помощью регрессии методом наименьших квадратов, используя алгоритм Левенберга-

Марквардта на основании результатов экспериментальных данных, были получены коэффициенты методики. При сравнении с результатами экспериментальных данных, представленная методика обладает наименьшим коэффициентом вариации (CV) и величиной коэффициента детерминации (R^2), наиболее близкой к 1, среди всех рассмотренных расчетных методик ($CV = 0,16-0,24$, $R^2 = 0,84-0,97$). В рамках сравнения с результатами численных опытов, представленная методика также обладает наименьшим CV среди всех рассмотренных подходов. ($CV = 0,07-0,12$, $R^2 = 0,92-0,98$). Представленная инженерная методика позволяет с высокой точностью выполнять оценку несущей способности железобетонных плит с поперечной арматурой и без нее при их разрушении от продавливания.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

В качестве дальнейшего развития методика расчета железобетонных плитных конструкций на продавливание может быть усовершенствована для учета сосредоточенного изгибающего момента, действующего на опоре, и преднапряжения плиты. Модель бетона может быть усовершенствована для прямого учета сил зацепления. Данная задача может быть достигнута путем применения анизотропной системы трещин в совокупности с энергетическим или вероятностно-кинематическим подходом. Прямой учет сил зацепления позволит исследовать вклад данного фактора в несущую способность конструкции.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК по специальности 2.1.9:

1. Бударин, А. М. Деформационно – прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением / **А. М. Бударин**, Г. И. Ремпель, А. А. Камзолкин, В. Н. Алехин // Вестник МГСУ. – 2023. – №18. – С. 517-532. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.517-532
2. Бударин, А. М. Деформационно – прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением и повреждением / **А. М. Бударин**, Г. И. Ремпель, А. А. Камзолкин, В. Н. Алехин // Вестник МГСУ. – 2024. – №19. – С. 527-543. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.527-543
3. Ремпель, Г. И. Обзор и сравнительный анализ критериев прочности для моделирования нелинейного поведения бетона / Г. И. Ремпель, **А. М. Бударин**, А. П. Долгих [и др.] // Вестник МГСУ. – 2024. – №4. – С. 857-877. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.857-877
4. Бударин, А. М. Методика расчета плит на продавливание, построенная с использованием регрессионного анализа / **А. М. Бударин**, О. Ю. Ушаков, Л. С. Сабитов [и др.] // Вестник МГСУ. – 2025. – №6. – С. 867-887. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.867-887

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК по смежной специальности 2.1.1:

5. Бударин, А. М. Численное исследование влияния масштабного эффекта на продавливание толстых железобетонных плит / **А. М. Бударин**, О. Ю. Ушаков,

Л. С. Сабитов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2025. – №1. – С. 26-33. DOI: 10.25628/UNIP.2025.64.1.029

6. Бударин, А. М. Численное моделирование изгибаемых железобетонных элементов с использованием критерия прочности Друкера—Прагера / **А. М. Бударин**, В. Н. Алехин, М. В. Плетнев // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2018. – №3. – С. 74-77.

Статьи, опубликованные в сборниках трудов конференций, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.:

7. Budarin, A. M. Numerical modelling of the reinforced concrete beam shear failure / **A. M. Budarin**, V. N. Alekhin, L. I. Avdonina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering – 2019. – №687. DOI: 10.1088/1757-899X/687/3/033044

8. Alekhin, V. N. Investigation of longitudinal reinforcement contribution in shear punching of reinforced concrete flat slabs without transverse reinforcement / V. N. Alekhin, **A. M. Budarin**, M. V. Pletnev, L. I. Avdonina // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 279. DOI: 10.1051/mateconf/201927902005.

Подписано в печать: 12.02.2026

Заказ № 21514. Тираж 100 экз.

Бумага офсетная. Формат 60x90/16.

Типография «Автореферат.ру»

ОГРНИП 320774600073831

119313, Москва, ул. Марии Ульяновой, д.3, к.1

+7 (977) 518-13-77, +7 (499) 788-78-56

www.avtoreferat.ru, e-mail: riso@mail.ru